

*Projet caiman**Calcul scientifique, modélisation et analyse
numérique**Sophia Antipolis*

THÈME 4B


*R*apport
d'Activité

2002

Table des matières

1. Composition de l'équipe	1
2. Présentation et objectifs généraux	1
3. Fondements scientifiques	2
3.1. Couplages de modèles et de méthodes	2
3.2. Équations de conservation et volumes finis	4
3.3. Équations intégrales et méthode multipôle rapide en électromagnétisme	5
4. Domaines d'application	7
4.1. Propagation d'ondes électromagnétiques	7
4.2. Mécanique des fluides et problèmes connexes	8
5. Logiciels	9
5.1. AS_ELFIP_FMM - ACTI3S_FMM	9
5.2. MPF	9
5.3. NS3IFS	10
5.4. EM3D/VFC	10
6. Résultats nouveaux	11
6.1. Électromagnétisme	11
6.1.1. Résolution rapide des équations intégrales pour l'électromagnétisme en domaine fréquentiel	11
6.1.2. Couplage de formulations intégrales axisymétriques	11
6.1.3. Volumes finis centrés pour l'électromagnétisme en domaine temporel	12
6.1.4. Méthodes de type Galerkin-Discontinu pour l'électromagnétisme en domaine temporel	12
6.1.5. Volumes finis multi-échelles en espace et en temps pour l'électromagnétisme en domaine temporel	13
6.1.6. Environnement plasmique des satellites	13
6.2. Mécanique des fluides et problèmes connexes	14
6.2.1. Propagation d'ondes acoustiques dans un écoulement	14
6.2.2. Améliorations du solveur fluide dans NS3IFS	14
6.2.3. Simulation et contrôle des effets du vent	14
6.2.4. Simulation des écoulements sanguins	15
6.2.5. Méthodes en maillages mobiles auto-adaptatifs	16
6.2.6. Méthodes de relaxation pour les équations de Navier-Stokes compressible	16
6.2.7. Modèles cinétiques	18
6.3. Méthodes de décomposition de domaine	18
6.3.1. Algorithmes de Schwarz additifs avec et sans recouvrement	18
6.3.2. Méthodes hybrides par décomposition de domaine et multigrille pour le calcul d'écoulements instationnaires	19
6.4. Programmation à objets répartie en Java	19
6.4.1. Programmation orientée objets et calcul distribué en électromagnétisme	20
7. Contrats industriels	20
7.1. Méthode multipôle rapide	20
7.2. Couplage de formulations intégrales (Alcatel)	20
7.3. Charge électrostatique de satellites (Alcatel)	21
8. Actions régionales, nationales et internationales	21
8.1. Actions nationales	21
8.1.1. Résolution parallèle d'équations intégrales	21
8.1.2. Simulation numérique d'effets du vent sur des structures du Génie Civil	21
8.1.3. Biomécanique numérique des fluides	21

9. Diffusion des résultats	23
9.1. Animation de la Communauté scientifique	23
9.1.1. Club des utilisateurs du calcul parallèle	23
9.1.2. Comités de rédaction de revues	23
9.1.3. Divers	23
9.2. Enseignement	23
9.3. Thèses et stages	23
9.3.1. Thèses soutenues en 2002	23
9.3.2. Thèses en cours	24
9.3.3. Directions de thèses et encadrement de stages	24
9.3.4. Rapports et participations à des jurys	24
9.3.5. Stages effectués dans le projet	24
9.4. Post-doctorats, ingénieurs-experts	24
9.5. Participation à des colloques, séminaires, invitations	25
10. Bibliographie	25

1. Composition de l'équipe

CAIMAN est un projet commun à l'INRIA, à l'École Nationale des Ponts et Chaussée via le CERMICS (Centre d'Enseignement et de Recherche en Mathématiques, Informatique et Calcul Scientifique), au CNRS et à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, via le Laboratoire J.-A. Dieudonné (UMR 6621).

Responsable scientifique

Serge Piperno [ICPC, ENPC]

Responsable permanent

Stéphane Lanteri [CR1, INRIA]

Assistante de projet

Sabine Barrère [adjoint administratif, ENPC]

Personnel INRIA

Loula Fezoui [DR2]

Personnel ENPC

Nathalie Glinsky-Olivier [CR1 Équipement, temps partiel à 80%]

Personnel UNSA (UMR 6621)

Frédéric Poupaud [Professeur, UNSA]

Personnel CNRS

Thierry Goudon [en détachement CNRS au Laboratoire J.-A. Dieudonné (UMR 6621)]

Collaborateurs extérieurs

Alexandre Ern [Cermics, ENPC]

Guillaume Sylvand [IPC, EADS, à partir du 1/4]

Chercheur invité

Marwan Moubachir [Doctorant, LCPC, du 8/7 au 19/7 et du 29/8 au 6/9]

Chercheurs doctorants

Marc Bernacki [boursier ENPC, à partir du 1/10]

Emmanuel Bongiovanni [boursier ENPC, puis INRIA, jusqu'au 30/11]

Nicolas Canouet [boursier FT R&D]

Martine Chane-Yook [boursière INRIA, à partir du 16/9]

Gilles Fourestey [boursier ENPC, puis INRIA, jusqu'au 30/11]

Maud Meriaux-Poret [boursière ENPC]

Guillaume Sylvand [IPC, jusqu'au 7/6]

Chercheurs post-doctorants

Nathalie Bartoli [à partir du 1/2]

Olivier Chanrion [jusqu'au 14/3]

Zhongze Li [à partir du 1/9]

Ingénieurs

Emmanuel Briand [ingénieur-expert, à partir du 1/10]

Saïd El Kasmi [ingénieur-associé, à partir du 1/11]

Stagiaires

Marc Bernacki [stage de DEA du 1/4 au 30/9]

Saïd El Kasmi [stage de DESS, du 1/4 au 31/10]

2. Présentation et objectifs généraux

Le projet vise à proposer des améliorations pour la simulation numérique d'écoulements complexes en interaction (interaction fluide-structure, épitaxie,...) et de phénomènes liés à l'électromagnétisme. Les thèmes

scientifiques abordés s'étendent de la modélisation de phénomènes physiques à la mise au point et à l'analyse de méthodes numériques. On s'intéresse également à leur validation sur des configurations réalistes et leur implémentation algorithmique, notamment sur des machines parallèles.

Axes de recherche

- **Électromagnétisme :**
 - Dans le domaine fréquentiel, nous travaillons sur divers aspects relatifs aux équations intégrales (couplage de formulations intégrales, méthode multipôle rapide). Les principales applications sont le calcul de SER (surfaces équivalentes radar) et de diagrammes d'antennes.
 - Dans le domaine temporel, nous développons des méthodes de volumes finis ou de type Galerkin-Discontinu issues de la mécanique des fluides, adaptées à l'électromagnétisme. Nous nous intéressons aux couplages de schémas et à l'utilisation de grilles structurées ou non structurées de tailles différentes avec des pas de temps différents. Enfin, nous examinons certains problèmes de couplage avec des gaz raréfiés chargés (plasmas), dont l'application essentielle est l'environnement spatial des satellites.
- **Écoulements complexes :**
 - En épitaxie, nous cherchons à prendre en compte des lois d'état complexes (gaz non polytropiques) et à examiner en volumes finis non structurés des problèmes de combustion et de dépôt.
 - En interactions fluide-structure, nous cherchons des critères pour construire des algorithmes de couplage (faible, décalé) précis et efficaces. Nous nous intéressons à de nouveaux domaines d'application faisant intervenir des fluides incompressibles (vent en Génie Civil, écoulements sanguins et pulmonaires en génie biomédical).
 - En aéroacoustique, nous cherchons à utiliser les méthodes numériques développées pour l'électromagnétisme, notamment pour la propagation d'ondes acoustiques.

Relations internationales et industrielles

Contrats avec EADS, Alcatel Space Industries, France Télécom R&D. Collaborations avec d'autres projets INRIA, avec l'ENPC, le CSTB, le LCPC, les universités de Nice, de Provence, de Paris 6 et du Colorado à Boulder.

3. Fondements scientifiques

3.1. Couplages de modèles et de méthodes

Mots clés : *couplage, modélisation, électromagnétisme, mécanique des fluides, interaction fluide-structure, analyse numérique, élément fini, volume fini, maillage non structuré.*

Participants : Serge Piperno, Loula Fezoui, Frédéric Poupaud, Gilles Fourestey, Nicolas Canouet, Emmanuel Briand.

Glossaire

couplage interaction entre plusieurs sous-systèmes, dont les évolutions simultanées s'influencent mutuellement. Par exemple, un couplage physique peut intervenir entre plusieurs sous-systèmes d'un modèle. De même, un couplage numérique de différentes méthodes peut s'avérer nécessaire pour la simulation numérique d'un problème couplé.

algorithme de couplage algorithme particulier, construit pour la simulation numérique d'un problème couplé, permettant la réutilisation modulaire de méthodes numériques préexistantes relatives à chaque sous-système. Sans construction particulière, un algorithme de couplage n'hérite pas des propriétés numériques des méthodes sur lesquelles il repose.

L'ensemble des modèles abordés par le projet regroupe des modèles très classiques en électromagnétisme et en mécanique des fluides, qui sont cependant souvent sous une forme particulière (hétérogène, multiespèce, multiphasique, etc...) et qui apparaissent dans des problèmes couplés (Vlasov-Maxwell, interactions fluide-structure, etc...). On s'intéresse aussi bien à la mise au point de méthodes numériques adaptées à chaque sous-problème, efficaces et extensibles à des cas réalistes, qu'à leur couplage proprement dit.

Les thèmes de recherche du projet sont très variés ; ils vont de la propagation d'ondes électromagnétiques à des couplages complexes tels que l'interaction champ-matière ou fluide-structure. Le dénominateur commun à ces différents thèmes est la conception de méthodes numériques fiables et précises pour la simulation sur ordinateur.

Les modèles mathématiques sous-jacents se ramènent néanmoins à quelques équations très classiques comme le système de Maxwell pour la propagation d'ondes électromagnétiques et les équations de Navier-Stokes pour la simulation d'écoulements de fluides. Cependant, la complexité des phénomènes étudiés peut modifier le modèle mathématique connu sous sa forme la plus classique. Ainsi, le système de Maxwell sera à coefficients constants ou variables selon le milieu de propagation considéré (homogène ou non[64]), les équations de Navier-Stokes prendront une forme différente selon le type d'écoulement (compressible ou non) ou la nature du fluide (à une ou plusieurs espèces). Les problèmes de couplage font intervenir d'autres équations, telles que celle de Vlasov dans l'étude du mouvement de charges dans un champ électromagnétique[40] ou une équation d'élasticité dans les interactions fluide-structure. Ces domaines sont assez ouverts aussi bien sur le plan numérique que théorique.

Parallèlement à la construction de méthodes numériques pour la simulation des phénomènes de couplage, le projet investit dans la recherche de résultats plus théoriques tels que la convergence vers l'état périodique du problème continu pour Vlasov/Maxwell[39] ou l'analyse de stabilité du couplage pour l'interaction fluide-structure [7]. Ces travaux jouent un rôle important dans la compréhension des problèmes divers qui surgissent lors de la simulation numérique d'un phénomène de couplage. Par exemple, l'utilisation de méthodes dont la stabilité et la précision sont prouvées pour chacun des sous-modèles ne garantit nullement la stabilité ou la précision de l'ensemble[61].

Un principe commun à l'ensemble des applications envisagées dans le projet sert de guide dans la recherche et la construction des méthodes numériques qui seront retenues. Celles-ci doivent permettre les extensions futures nécessitées par des applications réalistes issues du milieu industriel. Ces extensions incluent l'aspect tridimensionnel, la prise en compte de géométries complexes, le calcul en temps long et l'ouverture vers d'autres applications (possibilités d'extension vers d'autres couplages). Pour donner un exemple, une méthode élégante, fiable et précise, développée pour un modèle scalaire à une variable d'espace pourra s'avérer très coûteuse, voire inapplicable, pour le même modèle mathématique considéré sous la forme d'un système à plusieurs variables, dans une géométrie plus complexe qu'un cube ou un cylindre. Cependant, de tels modèles simplifiés (quand on en dispose) sont précieux pour l'analyse détaillée d'une méthode avant le développement d'un code de calcul tridimensionnel.

La volonté affichée de construire des méthodes numériques extensibles explique l'intérêt que nous portons aux méthodes de type éléments finis et/ou volumes finis en maillages quelconques [4]. Ces méthodes sont en général plus difficiles à mettre en œuvre sur machine et à analyser (stabilité[62] et convergence) dans les contextes réalistes d'utilisation (systèmes d'équations à plusieurs variables). On pallie ce manque de résultats théoriques par des comparaisons numériques réalisées en interne ou en collaboration et par la participation à des ateliers de travail nationaux ou internationaux.

3.2. Équations de conservation et volumes finis

Mots clés : *volume fini, maillage non structuré, électromagnétisme, mécanique des fluides, problème de Riemann, monotonie, formulation ALE, maillage mobile.*

Participants : Serge Piperno, Loula Fezoui, Nathalie Glinsky-Olivier, Stéphane Lanteri, Emmanuel Bongiovanni, Nicolas Canouet, Maud Mériaux-Poret, Marc Bernacki.

Glossaire

volumes finis famille de méthodes numériques reposant sur une partition du domaine en volumes de contrôle, pour lesquels seule une valeur moyenne des inconnues est calculée. Pour des lois de conservation, les échanges entre volumes de contrôle se font par l'intermédiaire de flux, de manière automatiquement conservative.

lois de conservation une loi de conservation est une équation aux dérivées partielles d'une grandeur scalaire, ne faisant intervenir que des dérivées du premier ordre, en temps ou en espace, de fonctions de la grandeur considérée (par exemple, $\partial_t u + \partial_x f(u) = 0$). Pour une inconnue vectorielle, on parle de système de lois de conservation.

solveur de Riemann un solveur de Riemann est une fonction, donnant une valeur exacte ou approchée de la solution d'un problème de Riemann à l'origine. Un problème de Riemann est un problème de Cauchy (pour une loi de conservation) particulier dont la donnée initiale est constituée de deux états constants, de part et d'autre de l'origine. Les deux états constants sont les arguments du solveur de Riemann.

Les méthodes de volumes finis sont utilisées depuis longtemps pour la simulation numérique en mécanique des fluides. Elles permettent d'approcher des solutions presque nécessairement discontinues, tout en conservant de bonnes propriétés (conservativité, précision, monotonie, etc...). Ces méthodes ont trouvé une seconde jeunesse avec leur application à l'électromagnétisme, notamment pour les cas hétérogènes, et les applications de la mécanique des fluides où les domaines sont déformables (interactions fluide-structure, écoulements moteur, etc...)

L'éventail des problèmes considérés dans le projet semble large, mais, pour une grande partie, les équations modèles sont très proches de la mécanique des fluides compressibles : on s'intéresse à des équations et systèmes hyperboliques (linéaires[66] ou non[45]) caractérisés par la propagation d'ondes (électromagnétiques, chocs, etc...). La communauté scientifique s'est d'abord intéressée aux systèmes hyperboliques non-linéaires de la mécanique des fluides[67]. Pour ceux-ci, il n'existe pas dans le cas général de solution régulière, même pour une donnée initiale régulière. Des discontinuités apparaissent et les solutions que l'on cherche à approcher numériquement sortent rapidement des bons espaces attachés aux approximations en éléments finis.

La méthode des volumes finis a été alors proposée. Son principe est simple : on considère comme espace d'approximation les fonctions constantes par morceaux, ces morceaux ou cellules ou volumes finis étant choisis par l'utilisateur et issus par exemple d'un maillage de type éléments finis - notamment non structuré - ce qui permet de prendre en compte des géométries complexes. Cette vision des volumes finis est néanmoins réductrice, et fortement influencée par l'approche éléments finis (les volumes finis peuvent être vus comme des éléments finis de type P0).

Cependant, les méthodes en volumes finis prennent un autre sens quand on s'intéresse à une loi ou à un système de lois de conservation. Les valeurs numériques dans chaque cellule peuvent être vues comme des approximations de valeurs moyennes sur la cellule, dont les variations ne dépendent que des flux aux bords de la cellule. Ainsi, il suffit de construire des fonctions de flux numériques, donnant de bonnes approximations de ce qui passe d'une cellule à ses voisines. Automatiquement, la méthode produite est conservative (ce qui sort d'une cellule rentre exactement dans sa voisine). Les flux de bords sont alors construits à l'image de la méthode de Godunov, par un solveur de Riemann exact ou approché (fondé sur des méthodes de décentrage sélectionnant les ondes en fonction de leur provenance) [6]. Dans la mesure du possible, la méthode ainsi construite possède des propriétés de monotonie (principe du maximum, schémas TVD et LED), de consistance,

de stabilité, etc... La précision est classiquement élevée grâce à l'adjonction d'une interpolation (par exemple de type MUSCL) et de limiteurs de pente[60].

Ces méthodes peuvent être appliquées dans la grande majorité des domaines d'application abordés par le projet, des écoulements multiespèces ou multiphasiques à l'électromagnétisme en général. Dans ce domaine particulier (où le système hyperbolique est linéaire), nous sommes particulièrement intéressés par des configurations hétérogènes où les caractéristiques des matériaux peuvent être fortement discontinues[64]. Nous continuons à développer des méthodes numériques adaptées, et nous avons également construit un nouveau schéma de type volumes finis[65], ayant des propriétés [16] et un coût comparables à ceux de l'universel schéma de Yee [8], schéma aux différences finies limité aux géométries simplistes. Une nouvelle voie très intéressante, à mi-chemin entre volumes finis et éléments finis, est celle des méthodes de type Galerkin-Discontinu. Elles comportent dans chaque volume de contrôle une description plus précise que celle des volumes finis. Contrairement aux éléments finis, cette description n'est pas censée être continue à l'interface entre volumes de contrôle.

Enfin, il est important de rappeler ici que les méthodes de volumes finis s'adaptent très simplement pour la simulation numérique de lois de conservation en formulation Arbitrairement Lagrangienne Eulérienne (ALE), en maillages dynamiques à topologie constante, passage presque nécessaire pour la simulation de la plupart des interactions fluide-structure (où le domaine fluide, complémentaire de la structure, varie avec le temps). De nombreux travaux portent sur l'extension des propriétés habituelles des méthodes de volumes finis (en commençant par celles découlant de la conservation des volumes[53]). Nous sommes également intéressés par des méthodes en maillages mobiles à topologie variable (retraits et ajouts de points).

3.3. Équations intégrales et méthode multipôle rapide en électromagnétisme

Mots clés : système de Maxwell, acoustique, domaine fréquentiel, élément fini, équation intégrale, méthode multipôle, calcul parallèle.

Participants : Guillaume Sylvand, Guillaume Alléon [Centre Commun de Recherche Louis Blériot, EADS], Nathalie Bartoli.

Glossaire

matrice pleine, matrice creuse une matrice creuse est une matrice dont on sait que les termes sont presque tous nuls (par exemple, une matrice tridiagonale de grande taille est creuse). Par opposition, une matrice pleine est une matrice dont les termes sont *a priori* non nuls.

équation intégrale équation fonctionnelle dont l'inconnue apparaît sous un signe d'intégration ; en calcul scientifique, et notamment pour des problèmes en domaine fréquentiel (électromagnétisme, acoustique, mécanique), on utilise une formulation en équation intégrale parce qu'elle permet de ramener des problèmes volumiques (par exemple sur un domaine tridimensionnel englobant un objet) à des problèmes posés sur le contour bidimensionnel de cet objet ; pour les problèmes qui nous intéressent, les systèmes linéaires résultants sont (hélas !) pleins, puisque la formulation intégrale fait intervenir une fonction de Green non locale.

méthode multipôle algorithme récursif qui permet d'effectuer des produits matrice-vecteur de manière très rapide pour les matrices pleines résultant, après discrétisation, du passage sous forme d'équation intégrale ; fondamentalement, on utilise le fait que les termes de la matrice représentent des interactions entre multipôles élémentaires, dont l'intensité dépend de leurs positions relatives.

Pour des problèmes de diffraction d'ondes en domaine fréquentiel, on peut utiliser une formulation intégrale posée sur un contour, mais dont la discrétisation fait intervenir un noyau de Green non local et conduit à des systèmes linéaires pleins. La méthode multipôle rapide est un algorithme récursif et parallélisable qui permet d'accélérer les produits matrice-vecteur utilisés lors des inversions itératives de ces systèmes.

Un des problèmes classiques en électromagnétisme consiste à calculer l'écho radar (ondes électromagnétiques diffractées par un objet) renvoyé par un objet (afin d'optimiser ultérieurement sa furtivité, par exemple). Pour simplifier, on peut donc étudier le cas d'un objet parfaitement conducteur Ω de frontière Γ soumis par exemple à une onde plane électromagnétique incidente notée E_{inc} . On cherche à calculer les courants électriques existants sur Γ , afin d'en déduire le champ électromagnétique diffracté.

La résolution des équations de Maxwell en domaine fréquentiel se ramène alors à résoudre un problème formulé en équation intégrale sous forme variationnelle : trouver $\phi \in X$ tel que $\forall \phi^t \in X$ on ait :

$$\int_{\Gamma} \int_{\Gamma} (\phi(x) \cdot \phi^t(x') - \frac{1}{k^2} \text{div} \phi(x) \cdot \text{div} \phi^t(x')) \cdot K(x, x') \cdot dx \cdot dx' = - \langle E_{inc}, \phi^t \rangle,$$

où ϕ désigne l'inconnue (i.e. le champ de courant sur Γ), ϕ^t est une fonction-test, X est un certain espace de fonctions, et $K(x, x')$ désigne le noyau de Green (solution élémentaire des équations de Maxwell au sens des distributions) :

$$K(x, x') = \frac{e^{ik\|x-x'\|}}{\|x-x'\|}.$$

On résout cette équation par une méthode d'éléments finis de surface, ce qui nous conduit à inverser un système linéaire complexe, plein (les fonctions de Green ne sont pas locales, donc tous les termes de la matrices seront non nuls a priori) et symétrique. Ceci peut se faire par une méthode itérative de type QMR, par exemple. Celle-ci nécessite de réaliser des produits matrice-vecteur, ce qui implique un temps de calcul et un espace de stockage proportionnels à n^2 , où n est le nombre d'inconnues du problème. Pour des fréquences élevées (GigaHertz) et des objets de grande taille (avions), n peut facilement dépasser le million [3]. Ce n^2 est la principale limitation à ce type de calcul.

La méthode multipôle rapide [5] permet de s'en affranchir. Elle consiste à remplacer un produit matrice-vecteur "classique" par un produit matrice vecteur approché (voir [2] pour une description pédagogique). On sépare les interactions entre éléments en fonction de leur caractère proche ou lointain, les interactions lointaines étant regroupées afin d'être gérées collectivement. On distingue les algorithmes mono-niveau de complexité en $n^{3/2}$ (la surface Γ est découpée en domaines de diamètre $\lambda/2$, où λ est la longueur d'onde de E_{inc}) des algorithmes multi-niveaux de complexité en $n \log n$ (Γ est découpée récursivement). L'algorithme multi-niveaux (Fast Multipole Method - FMM) s'articule autour d'un *octree*. Il s'agit d'un arbre 3D dont la racine est un cube contenant Γ . Le niveau 1 est obtenu en divisant ce cube en 8 sous-cubes identiques, dont on ne conserve que ceux qui coupent Γ . On répète ce processus de division jusqu'à ce que les feuilles de l'arbre aient une arête suffisamment petite (de l'ordre de $\lambda/2$ en pratique). Lors de la réalisation d'un produit matrice vecteur $Y = AX$, on commence par répartir les valeurs du vecteur X dans les feuilles de l'*octree*. Ensuite, le calcul complet se fait en 6 étapes :

1. interactions proches : chaque feuille de l'arbre interagit avec ses voisines via une petite matrice d'interaction pleine ;
2. initialisation : on calcule pour chaque feuille sa fonction de radiation sortante \mathcal{F} en fonction des valeurs de X ;
3. montée : on parcourt l'arbre des feuilles vers la racine en calculant à chaque niveau les fonctions de radiation sortante \mathcal{F} ;
4. transfert : on transforme les fonctions sortantes \mathcal{F} en fonctions rentrantes \mathcal{G} ;
5. descente : on parcourt l'arbre de la racine vers les feuilles en calculant à chaque niveau les fonctions de radiation rentrante \mathcal{G} ;
6. intégration : les fonctions de radiation rentrante \mathcal{G} des feuilles sont intégrées. Le résultat de cette intégration est ajouté au calcul des interactions proches pour donner Y .

Les différentes étapes du calcul sont traitées niveau par niveau, à chaque fois une phase de communication précède une phase de calcul. Le contenu de ces phases est stocké sous la forme d'une liste chaînée de tâches élémentaires. Celle-ci est créée au début du calcul sur chaque processeur, puis elle est relue à chaque produit matrice-vecteur.

4. Domaines d'application

4.1. Propagation d'ondes électromagnétiques

Mots clés : *télécommunications, santé, ingénierie, transports, environnement des satellites, compatibilité électromagnétique, furtivité radar, acoustique, antenne.*

Nous nous intéressons à la propagation d'ondes en domaine temporel, aux problèmes de diffraction en domaine fréquentiel, et enfin aux plasmas et au transport de particules chargées dans un champ électromagnétique. Les applications visées concernent les satellites, les antennes, la furtivité (électromagnétique et acoustique), la compatibilité électromagnétique.

Les méthodes numériques que nous développons pour la simulation numérique de phénomènes électromagnétiques en domaine temporel (sans supposer d'oscillations harmoniques à fréquence donnée) et en domaine fréquentiel nous permettent d'attaquer des environnements physiques très différents et donc des domaines d'applications riches, en télécommunications ou en ingénierie : calcul, caractérisation et optimisation d'antennes, compatibilité électromagnétique, furtivité radar, modélisation de matériaux absorbants entre autres.

Pour ce qui est des simulations en domaine temporel, notre but est de construire des méthodes précises et efficaces en vue de simulations numériques complexes : géométries quelconques, milieux hétérogènes, sources de courant filaires ou surfaciques, etc... Pour atteindre ce but, nous commençons par adapter des méthodes existantes (volumes finis centrés aux sommets du maillage ou confondus avec les éléments, flux numériques décentrés[62] ou centrés [16], milieu PML[38]) au cas du système de Maxwell, en prenant désormais en compte un milieu éventuellement fortement hétérogène[64]. Ensuite, ces méthodes sont comparées avec d'autres méthodes beaucoup plus couramment utilisées (schéma aux différences finies de Yee par exemple [8]) en termes de précision, stabilité et efficacité. Enfin, nous cherchons à construire des méthodes hybrides combinant les avantages des différentes méthodes, en utilisant les méthodes adéquates dans les parties du domaine de calcul où elles s'avèrent les mieux adaptées[66]. Sur ce thème précis, nous travaillons actuellement à la construction d'une méthode complète en volumes finis, permettant de traiter des maillages non structurés, pour des problèmes éventuellement hétérogènes (par exemple pour des applications dans le domaine de la santé), par des schémas explicites efficaces sur plusieurs sous-domaines (avec pas de temps et tailles de grilles adaptés localement). Signalons également que nous avons commencé un nouveau cycle de développement dans des méthodes inspirées des équations intégrales dans le domaine temporel. Il s'agit plus précisément d'une implémentation de la méthode des potentiels retardés, fondée sur la méthode multipôle rapide.

En domaine fréquentiel, la méthode des éléments finis de frontière, fondée sur une formulation intégrale, permet de traiter des problèmes de grande taille de manière efficace (problèmes multi-secondes membres), à condition de pouvoir résoudre des systèmes linéaires de plusieurs millions d'inconnues. Sur ce point, le projet a investi dans des approches prometteuses, comme la discrétisation microlocale[46] (en approximation haute fréquence) ou plus récemment la méthode multipôle rapide [5], cette dernière étant facilement adaptable à l'acoustique (équation de Helmholtz), pour laquelle nous nous intéressons également à la formulation mathématique de méthodes de sous-domaines (décomposition de domaine) efficaces. Une application possible est la furtivité acoustique d'un sous-marin par exemple. La méthode multipôle peut s'appliquer à différentes formulations intégrales. Notre expertise d'accélération peut donc s'étendre à divers codes ou problèmes.

Nous nous intéressons enfin aux plasmas et au transport de particules chargées en général, dont une application directe est l'étude de l'environnement électromagnétique et plasmique spatial des satellites. Ceux-ci sont soumis à des ondes, présentent de fortes différences de potentiels (causes d'ionisation et de décharges

électrostatiques) et baignent dans un nuage de particules, chargées ou non, dont la nature se rapproche de celle du plasma en certains points et de celle du fluide continu en d'autres (notamment à la sortie des propulseurs chimiques ou plasmiques). Même si la physique des satellites est plutôt électrostatique (système de Vlasov-Poisson), les techniques mises en œuvre dans d'autres domaines électromagnétiques, notamment à propos du transport de particules chargées (couplage d'une méthode de volumes finis et d'une méthode particulière déterministe pour le système de Vlasov-Maxwell), peuvent être utilisées. Sur ce domaine d'application, un gros effort de choix de modèles mais aussi de validation numérique est encore nécessaire. Nous pouvons mettre nos compétences au service d'interlocuteurs soucieux du sens physique des résultats expérimentaux ou numériques dont ils disposent.

4.2. Mécanique des fluides et problèmes connexes

Mots clés : *santé, ingénierie, transports, environnement, télécommunications, algorithme de couplage, interaction fluide-structure, milieu multiphasique, combustion, gaz réel, volume fini, élément fini, maillage non-structuré, ordre élevé, maillage dynamique, feu de forêt, génie civil, écoulement sanguin.*

Nous nous intéressons à plusieurs problèmes physiques, pour lesquels la mécanique des fluides classique est couplée à d'autres phénomènes, notamment les interactions entre un fluide (compressible ou non) et une structure, et les écoulements réalistes multiphasiques et/ou réactifs. Les applications visées concernent l'aéronautique, le Génie Civil (stabilité aéroélastique des structures), les écoulements sanguins et l'épitaxie. Également, nous abordons l'aéroacoustique, plus précisément la propagation d'ondes acoustiques dans un écoulement stationnaire non uniforme, où nous utilisons les méthodes numériques développées dans le contexte de l'électromagnétisme dans le domaine temporel en milieu hétérogène.

Nous nous intéressons à plusieurs problèmes physiques, pour lesquels la mécanique des fluides classique est couplée à d'autres phénomènes. C'est par exemple le cas des interactions fluide-structure, de la propagation d'ondes aéroacoustiques ou des écoulements de gaz réels à loi d'état complexe.

Le domaine d'application des interactions fluide-structure est multiple, on en retrouve par exemple dans les domaines de la santé, des transports et de l'ingénierie en général. On peut distinguer les applications où le fluide est supposé compressible (écoulement gazeux où le nombre de Mach est supérieur à 0.3) des applications où le fluide est incompressible (écoulements liquides ou gazeux avec faible nombre de Mach). Le principal domaine d'application des cas compressibles est l'aéronautique. Les instabilités aéroélastiques jouent un rôle prépondérant dans la limitation des domaines de vol des avions en général (civils et militaires), pour lesquels on recherche à la fois une manœuvrabilité et une efficacité optimales. Nous travaillons dans ce cadre avec l'équipe du Professeur Charbel Farhat à l'université du Colorado à Boulder, plus particulièrement sur les algorithmes de couplage[61]. La définition de ces algorithmes est déterminante pour optimiser le compromis habituel entre l'efficacité et la précision des codes ainsi assemblés. Les domaines d'applications des cas incompressibles sont divers. Nous commençons à définir des problèmes modèles d'écoulements sanguins, et, en collaboration notamment avec les projets M3N et MACS, dans le cadre de l'ARC VitesV, nous espérons simuler le comportement de vaisseaux collabables (susceptibles de s'écraser) et d'anévrismes. D'autre part, nous nous intéressons à la simulation de l'effet du vent sur de grandes constructions du Génie Civil[59]. Dans ce cadre, nous sommes partenaires d'un thème de recherche du LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), qui concerne entre autres le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et le SETRA (Service d'études Techniques des Routes et Autoroutes).

Nous nous intéressons également à des écoulements réalistes en mécanique des fluides multiphasiques et/ou réactifs. Nous avons acquis une certaine expertise sur les modèles de combustion (en milieu multiphasique ou en épitaxie dans un réacteur de dépôt chimique). Cette dernière technique, l'épitaxie[50], d'une importance industrielle considérable, consiste à injecter des précurseurs dans un réacteur chauffé contenant un substrat sur lequel se dépose une fine couche cristalline. La géométrie complexe du réacteur implique l'utilisation de maillages non structurés. La modélisation du réacteur doit prendre en compte les phénomènes de transfert thermique, l'écoulement tridimensionnel de type convection mixte et la cinétique chimique. Enfin, de nombreux problèmes, dont le problème de l'épitaxie cité plus haut, concernent des écoulements à haute température pour

lesquels le gaz ne peut être considéré comme polytropique, c'est-à-dire que la relation entre l'énergie interne et la température n'est plus linéaire, mais donnée par une loi polynomiale ou parfois même seulement par des tables. On étudie alors une méthode de relaxation d'énergie[43], pour laquelle un solveur classique peut être utilisé et adapté simplement. Le but ici est de produire à terme un logiciel de simulation d'épitaxie en géométrie complexe tridimensionnelle.

Enfin, nous avons abordé récemment la simulation numérique de la propagation d'ondes acoustiques dans un écoulement stationnaire (aéroacoustique). La problématique est simple : les nuisances sonores, par exemple des véhicules terrestres ou aériens sont de plus en plus combattues par des normes toujours plus contraignantes. Les ondes acoustiques générées (soit par les moteurs ou réacteurs, soit par l'écoulement turbulent lui-même) ne se propagent pas dans un écoulement établi comme dans un gaz au repos. Nous ne nous intéressons pas à proprement parler à la génération des perturbations acoustiques, sujet vaste en soi. Nous mettons à profit les méthodes numériques développées pour l'électromagnétisme linéaire hétérogène. Elles trouvent un cadre d'application naturel, où les paramètres locaux de propagation des ondes peuvent varier continûment ou non.

5. Logiciels

5.1. AS_ELFIP_FMM - ACTI3S_FMM

Mots clés : *électromagnétisme, acoustique, équations de Maxwell, système de Helmholtz, domaine fréquentiel, élément fini, équation intégrale, méthode multipôle, calcul parallèle.*

Participants : Guillaume Sylvand [Correspondant], Guillaume Alléon [Centre Commun de Recherche Louis Blériot, EADS].

Le code AS_ELFIP est un logiciel développé en interne par EADS pour résoudre les équations de Maxwell fréquentielles via une formulation intégrale. Le programme résout un système linéaire plein par une méthode directe ou itérative. Nous avons implémenté dans ce code une méthode multipôle rapide parallèle permettant de traiter des problèmes beaucoup plus volumineux en des temps bien inférieurs. Le logiciel obtenu, nommé AS_ELFIP_FMM (FMM pour Fast Multipole Method), permet par exemple de résoudre un problème à 25,6 millions d'inconnues en 18 heures sur une machine IBM/SP3 à 64 processeurs (ce qui avec une méthode "classique" reviendrait à inverser une matrice pesant ...5,2 millions de GigaOctets). Nous avons implémenté cette année des fonctionnalités supplémentaires, comme la prise en compte des fils, des matériaux diélectriques et absorbants. A ce jour, AS_ELFIP_FMM est dans son domaine un logiciel au top-niveau mondial.

ACTI3S_FMM est le pendant acoustique du logiciel AS_ELFIP_FMM en électromagnétisme. Il permet en plus d'aborder des formulations complexes (type complément de Schur) que la méthode multipôle rapide peut également résoudre.

5.2. MPF

Mots clés : *algèbre linéaire, solveur direct, solveur itératif, méthode multipôle rapide, calcul parallèle, implémentation out-of-core.*

Participants : Guillaume Sylvand [Correspondant], Guillaume Alléon [Centre Commun de Recherche Louis Blériot, EADS].

MPF une bibliothèque écrite en C et fortran 77 (presque 200.000 lignes) par EADS-CCR, et qui est déjà utilisée dans des codes industriels en électromagnétisme (AS_ELFIP_FMM) et en acoustique (ACTI3S_FMM). Globalement, c'est une bibliothèque de résolution de systèmes linéaires. Elle inclut :

- des structures de données, pour stocker les matrices et les vecteurs ;
- des solveurs, directs et itératifs ;
- des outils pour aider à la gestion de la mémoire, des fichiers, etc... ;
- des méthodes et des structures avancées, comme la gestion des octrees ou des méthodes multipôles rapides (c'est cette partie qui a été implémentée par le projet).

Du point de vue des fonctionnalités, MPF est :

- multiplateforme, testée sur à peu près tout ce qui existe ;
- parallélisée, via MPI, pour toute machine à mémoire distribuée ;
- capable de fonctionner en mode out-of-core, puisque toutes les données peuvent être stockées sur disque ;
- optimisée, par l'usage systématique des bibliothèques BLAS et LAPACK.
- commentée et documentée, au moins partiellement.

EADS autorise la diffusion gratuite mais "contrôlée" de cette bibliothèque, après signature d'un contrat de licence spécifique (MPF n'est donc pas un logiciel libre).

5.3. NS3IFS

Mots clés : *interaction fluide-structure, fluide visqueux incompressible, maillage mobile, élément fini, coque, modulef, génie civil, écoulement sanguin.*

Participants : Serge Piperno [Correspondant], Gilles Fourestey, Marina Vidrascu [projet MACS], Dominique Chapelle [projet MACS], Marc Thiriet [projet M3N et LAN université Paris 6], Jean-Frédéric Gerbeau [projet M3N], Stéphanie Salmon [projet M3N].

Le logiciel NS3IFS permet la simulation d'un écoulement incompressible visqueux (équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible) instationnaire en maillage mobile, ainsi que la simulation couplée de la dynamique d'une structure simple. Allié au COUPLEUR[37] développé dans le cadre de l'ARC "Simulations numériques d'interactions fluide-structure en Génie Civil et ingénierie biomédicale"[63], ce programme permet maintenant de simuler des écoulements autour de structures modélisées par des coques (comme des vaisseaux sanguins par exemple), grâce à la bibliothèque MODULEF[41], maintenant disponible librement. Pour l'instant, ces programmes (NS3IFS et COUPLEUR) sont en accès restreints aux membres de l'ARC et du Thème de Recherche LCPC en cours. Leur forme est plutôt celle d'un logiciel prototype. Le logiciel est encore au centre de l'ARC Vitesv[70]. Dans ce cadre, des algorithmes efficaces de couplage fort itératif avec relaxation (nécessaire pour des simulations d'écoulements sanguins) ont été implémentés dans COUPLEUR.

5.4. EM3D/VFC

Mots clés : *électromagnétisme, équations de Maxwell, domaine temporel, volume fini, milieu hétérogène, calcul parallèle.*

Participant : Loula Fezoui, Stéphane Lanteri, Serge Piperno.

Cette année, le projet CAIMAN a finalisé le développement d'une première version du logiciel EM3D/VFC[55] qui permet la simulation de la propagation d'ondes électromagnétiques par résolution numérique du système d'équations de Maxwell 3D en domaine temporel. Ce logiciel repose sur la méthode de type volumes finis centrée aux éléments d'un maillage tétraédrique précédemment proposée par M. Remaki[65]. Les principales caractéristiques de cette méthode sont l'utilisation d'un schéma centré pour le calcul des flux des quantités physiques et d'un schéma explicite de type saute-mouton pour l'intégration en temps. De plus, ce logiciel a été parallélisé par une stratégie classique combinant un partitionnement du maillage de calcul et une programmation parallèle dans un modèle par transfert de messages (utilisation de l'environnement standard MPI). Ce logiciel continue d'évoluer et, dans sa prochaine version, devrait intégrer les résultats de recherches en cours qui concernent d'une part, la mise au point d'un schéma d'intégration en temps implicite et, d'autre part, l'amélioration de la précision du schéma de discrétisation en espace. Par ailleurs, on souhaite aussi permettre la simulation numérique et la validation de calculs plus réalistes (diffraction d'ondes sur un objet de forme complexe).

6. Résultats nouveaux

6.1. Électromagnétisme

6.1.1. Résolution rapide des équations intégrales pour l'électromagnétisme en domaine fréquentiel

Mots clés : système de Maxwell, acoustique, domaine fréquentiel, élément fini, équation intégrale, méthode multipôle rapide, Fast Multipole Method (FMM), calcul parallèle.

Participants : Guillaume Sylvand, Armel de La Bourdonnaye [Ministère de l'équipement], Guillaume Alléon [Centre Commun de Recherche Louis Blériot, EADS], Luc Giraud [CERFACS].

Dans le but de contribuer à la simulation numérique des phénomènes de propagation d'ondes électromagnétiques, nous nous intéressons à la résolution itérative rapide des systèmes (complexes, non hermitiens) linéaires issus de la formulation intégrale du système de Maxwell en domaine fréquentiel, après discrétisation en éléments finis de surface. Les systèmes obtenus sont pleins et le problème est souvent multi-second membre. D'autre part, l'objet doit être discrétisé assez finement (ici au moins huit points par longueur d'onde) et les systèmes linéaires deviennent très gros dès que la taille de l'objet augmente (par exemple, on atteint un système linéaire de taille un million pour un avion de diamètre égal à soixante longueurs d'onde). La méthode multipôle rapide (Fast Multipole Method, FMM) permet d'accélérer notablement les produits matrice-vecteur et de rendre une résolution itérative bien plus rapide.

Nous avons cette année affiné les performances de notre code multipôle en parallèle. Sur IBM/SP3 et Origin3800 (au CINES), nous avons résolu des cas de calculs réalistes (c'est-à-dire non sphériques) ayant près de 13,5 millions d'inconnues (soit un diamètre supérieur à 250 longueurs d'onde) en moins de 8 heures sur 64 processeurs, ce qui place notre implémentation de la méthode multipôle rapide parmi les plus performantes.

Nous avons enrichi ses fonctionnalités en permettant de traiter des calculs comprenant des fils et des matériaux diélectriques (y compris les matériaux absorbants). Nous avons également écrit les équations permettant de calculer des champs proches et lointains avec la méthode multipôle rapide.

Nous avons par ailleurs amplifié notre collaboration avec le CERFACS sur tous les sujets touchant aux solveurs et aux préconditionneurs. En particulier, nous avons conjointement développé un solveur sans équivalent appelé "Flexible GMRES" utilisant la précision ajustable de la FMM pour accélérer très efficacement la convergence.

6.1.2. Couplage de formulations intégrales axisymétriques

Mots clés : système de Maxwell, domaine fréquentiel, équation intégrale, axisymétrie méthode multipôle rapide, couplage, décomposition de domaine, calcul parallèle.

Participants : Nathalie Bartoli, Serge Piperno, Christelle Jamonac [Alcatel Space Industries], Denis Pogarieloff [Alcatel Space Industries].

En collaboration avec Alcatel Space Industries (site de Cannes), nous nous sommes intéressés à l'optimisation et à la validation d'un logiciel de calcul de rayonnements électromagnétiques EchoLight. Ce logiciel permet de coupler plusieurs structures rayonnantes axisymétriques, avec des axes de révolution non nécessairement colinéaires. Nous avons optimisé le logiciel et introduit de nouvelles fonctionnalités : optimisation du script shell, possibilité d'alimenter le dispositif avec plusieurs sources, introduction d'un processus itératif avec la mise en place d'un critère d'arrêt. La version itérative a permis de retrouver des résultats de mesure dans le cadre d'un cas réaliste de septet (six antennes cieres disposées en cercle autour d'une antenne cierge alimentée). Nous avons parallélisé le script et utilisé la ferme de PC de l'Inria pour sa validation. Ces premières modifications ont permis de réduire considérablement les temps de calcul : par exemple, dans le cas du septet, le temps de calcul a été divisé par 4. L'ensemble des optimisations et des validations effectuées a fait l'objet d'un rapport technique [26] et la nouvelle version du logiciel a été installée à Alcatel Space.

Cependant, le calcul des interactions entre les différents objets reste encore une étape très coûteuse. Une première simplification dans l'une des routines a permis de réduire encore son temps de calcul d'un tiers et de

réduire d'autant le temps global d'exécution du logiciel `EchoLight`. Nous envisageons d'accélérer davantage ces interactions en adaptant un code `Cerfacs` (dans le cadre d'une collaboration avec ce laboratoire) fondé sur une méthode multipôle rapide, connue pour calculer rapidement le champ électromagnétique à partir de la connaissance de courants et étudiée par Guillaume Sylvand dans le projet [11]. La mise en place du code multipôle nécessite certaines modifications dans le code `EchoLight` et une étude de faisabilité est en cours.

6.1.3. *Volumes finis centrés pour l'électromagnétisme en domaine temporel*

Mots clés : *système de Maxwell, domaine temporel, maillage non structuré, volume fini, schéma centré élément, stabilité, schéma de Yee.*

Participants : Loula Fezoui, Nicolas Canouet, Serge Piperno, Stéphane Lanteri, Claude Dedebean [France Télécom R&D].

Les problèmes électromagnétiques font souvent intervenir des objets de tailles très différentes. Nous étudions en collaboration avec France Télécom R&D des schémas explicites en temps permettant de traiter le système des équations de Maxwell avec des maillages raffinés localement. L'année passée, nous avons proposé pour le cas monodimensionnel un schéma en volumes finis utilisant des flux centrés, nommé β -schéma. Le paramètre β nous permettait d'obtenir une précision d'ordre 4 dans toute zone où le maillage était régulier. Les phénomènes de dispersion étaient ainsi maîtrisés.

Nous avons travaillé cette année à l'extension de cette méthode aux dimensions supérieures sur des maillages structurés. En deux dimensions d'espace, nous proposons d'introduire deux paramètres (un pour chaque direction). Dans toute zone régulière du maillage, nous sommes alors capables de minimiser le terme d'ordre 2 de la relation de dispersion discrète (en fait, le terme d'erreur d'ordre 2 dans la vitesse de propagation des ondes). Les résultats obtenus sur des maillages raffinés de manière conforme (les intersections entre hexaèdres voisins sont des faces de ces hexaèdres) ou non-conforme (les intersections entre hexaèdres voisins peuvent être des portions de faces de ces hexaèdres) sont très satisfaisants. Dans le cas tridimensionnel, de bons résultats ont été obtenus sur des maillages structurés conformes. Nous avons cependant observé des phénomènes d'instabilité sur des grilles non-conformes. Nous avons alors choisi d'étudier une autre voie très facilement généralisable : les formulations de type Galerkin-Discontinu.

6.1.4. *Méthodes de type Galerkin-Discontinu pour l'électromagnétisme en domaine temporel*

Mots clés : *système de Maxwell, domaine temporel, maillage non structuré, volume fini, Galerkin-Discontinu, stabilité.*

Participants : Serge Piperno, Loula Fezoui, Nicolas Canouet, Stéphane Lanteri, Claude Dedebean [France Télécom R&D].

Toujours pour la simulation numérique de la propagation d'ondes électromagnétiques, nous avons lancé cette année plusieurs études sur des méthodes de type Galerkin-Discontinu pour le domaine temporel. Ces méthodes de plus en plus utilisées, sont à mi-chemin entre les éléments finis (une représentation polynomiale des champs inconnus est utilisée) et les volumes finis (aucune continuité n'est requise entre deux cellules voisines). Comme les problèmes électromagnétiques peuvent faire intervenir des objets de tailles très différentes et peuvent requérir des maillages dont les éléments (même voisins) peuvent avoir des tailles assez différentes, ces méthodes représentent une généralisation naturelle de nos travaux précédents.

En collaboration avec France Télécom R&D, dans le cadre de maillages structurés raffinés localement, nous avons recherché dans ces méthodes de Galerkin-Discontinu une solution à nos problèmes d'instabilités numériques sur des grilles tridimensionnelles non-conformes. Le nouveau schéma proposé repose sur l'association d'une approximation temporelle de type saute-mouton et d'un calcul de flux centrés. Dans le cas structuré, l'introduction d'un paramètre dans le calcul des flux nous permet de contrôler la dispersion. De forts taux de raffinements sont alors autorisés : nous avons obtenus de bons résultats en 3D avec des maillages dont le rapport entre les différentes mailles est 10. Nous avons établi que ce schéma conserve une énergie discrète dans le cas tridimensionnel et ceci même sur des maillages non-conformes. La méthode est ainsi stable.

Similairement, sur des maillages tridimensionnels non-structurés en tétraèdres, nous avons établi qu'un schéma en temps de type saute-mouton et une discrétisation en éléments P1 discontinus menaient à un schéma qui conserve exactement l'énergie, et qui est stable sous une condition de type CFL. Les premiers résultats numériques sur un code prototype tridimensionnel montrent une très grande supériorité sur le solveur en volumes finis.

6.1.5. *Volumes finis multi-échelles en espace et en temps pour l'électromagnétisme en domaine temporel*

Mots clés : *système de Maxwell, domaine temporel, maillage non structuré, maillage non conforme, volume fini, schéma centré élément, stabilité.*

Participants : Serge Piperno, Loula Fezoui, Nicolas Canouet, Claude Dedebean [France Télécom R&D].

Dans le but de résoudre les équations de Maxwell en domaine temporel, par sous-domaines et avec des maillages adaptés et raffinés, nous collaborons avec France Télécom R&D sur une étude de schémas multi-échelles en temps et en espace, fondés sur les volumes finis. Les résultats rapportés ci-dessus nous apportent de nombreuses briques élémentaires pour coupler différents schémas de résolution des équations de Maxwell dans différentes configurations. Pour des approches conformes en temps (pas de temps unique pour tout le domaine de calcul), les schémas de type volumes finis avec approche MUSCL (β -schémas) ou les méthodes de type Galerkin-Discontinu permettent de manière très souple de coupler des grilles de tailles différentes, conformes ou non conformes. Pour des approches vraiment multi-échelles en temps (pas de temps différents par sous-domaines, le pas de temps étant petit là où le maillage est fin), nous avons reformulé des algorithmes initialement proposés pour des interactions fluide-structure linéaires. Ceux-ci sont construits de manière à conserver exactement une énergie, ce qui permet ensuite de montrer la stabilité couplée de l'algorithme, quel que soit le nombre de sous-cycles effectués dans le sous-domaine à maille très fine.

Nous nous limitons cependant à une seule famille d'algorithmes de couplage : ceux pour lesquels l'intégration en temps peut être complètement explicite (aucune information sur l'évolution future des autres sous-domaines n'est nécessaire, contrairement à ce qui a pu être proposé[42]). Néanmoins, l'algorithme idéal n'a pas encore été trouvé, puisque le couplage stable de méthodes performantes peut quand-même s'accompagner de réflexions parasites aux interfaces entre sous-domaines, problème qu'il nous faudra régler en une dimension avant de nous attaquer à des problèmes réalistes.

6.1.6. *Environnement plasmique des satellites*

Mots clés : *plasma, propulseur plasmique, magnétosphère, ionisation, équation de Vlasov-Poisson, équation d'Euler isotherme, couplage de modèles.*

Participants : Olivier Chanrion, Martine Chane-Yook, Frédéric Poupaud, Thierry Goudon, Anne Nouri [LATP, CMI, Université de Provence], Serge Piperno, Sébastien Clerc [Alcatel Space Industries], Thierry Dargent [Alcatel Space Industries].

En collaboration avec Alcatel Space Industries, nous menons une étude sur les problèmes de charges de satellites. Les satellites de communication sont en effet pollués par des dépôts de charges à leur surface. Ces charges peuvent provenir d'une part du plasma spatial environnant et, d'autre part, du combustible éjecté par des moteurs à plasma qui sont de plus en plus utilisés pour le contrôle d'orbite et de positionnement des satellites. Or ces polluants peuvent provoquer des décharges électrostatiques qui peuvent endommager les panneaux solaires ou les dispositifs embarqués. Comprendre les mécanismes qu'ils engendrent a donc un enjeu industriel important.

Olivier Chanrion, qui avait soutenu sa thèse (bourse CIFRE Alcatel) en fin d'année dernière, a transmis le code de simulation au département Recherche de Alcatel Space. Ce code de simulation est fondé sur une hypothèse d'axisymétrie (donc avec une complexité bidimensionnelle), ce qui ne permet que des calculs de dimensionnement pour des éléments de satellites réels. Néanmoins ce code jetait les bases nécessaires pour des développements futurs : notamment résolution du système de Vlasov-Poisson (méthode particulière couplée à une méthode d'éléments finis-infinis), découpage du domaine de calcul en trois sous-domaines pour tenir

compte des différents modèles pertinents pour chaque zone du problème considéré (des longueurs de Debye très différentes suivant les zones demandent de changer de modèle).

Nous avons donc donné cette année une suite logique à ces travaux : Martine Chane-Yook (arrivée parmi nous en deuxième année de thèse, sa directrice de thèse étant Anne Nouri) va développer un code similaire, cette fois tridimensionnel, fondé sur les algorithmes proposés par Olivier Chanrion et sur un squelette tridimensionnel construit en interne par Sébastien Clerc.

6.2. Mécanique des fluides et problèmes connexes

6.2.1. Propagation d'ondes acoustiques dans un écoulement

Mots clés : *équation de Navier-Stokes, fluide incompressible, élément fini, méthode des caractéristiques, ordre élevé, problème de Stokes généralisé, .*

Participants : Marc Bernacki, Serge Piperno.

Nous avons cette année lancé une thèse sur un sujet nouveau mais comportant de nombreuses connexions avec les activités du projet. Spécialisés initialement dans la résolution d'équations aux dérivées partielles modélisant la mécanique des fluides par des méthodes de volumes finis, nous avons appliqué les mêmes techniques à l'électromagnétisme, puis opté pour des schémas non diffusifs (avec flux totalement centrés et schéma en temps de type saute-mouton par exemple). Les méthodes que nous avons alors développées ont de plus la propriété d'être applicables naturellement à des matériaux hétérogènes (voire anisotropes).

Un contexte particulièrement attractif pour ces méthodes est celui de l'aéroacoustique, où l'on étudie la propagation d'ondes acoustiques dans un écoulement (parfois stationnaire, très rarement uniforme). Les équations sont alors linéaires et représentent la propagation d'ondes dans un milieu continûment variable. Le but de cette thèse est donc le développement, l'analyse et la validation de méthodes numériques de type "volumes finis" capables de simuler la propagation de bruits générés par des sources (sources mécaniques, moteurs d'avions ou de voitures par exemple, ou par les structures turbulentes d'un écoulement stationnaire dans un premier temps).

Les premiers résultats [27] montrent que la méthode est très prometteuse. La précision est très satisfaisante en maillages réguliers et la méthode est bien non-diffusive pour un écoulement uniforme. De nombreuses questions restent à étudier : stabilité pour une linéarisation des équations d'Euler autour d'un écoulement non uniforme, construction de conditions aux limites d'ordre élevé, utilisation de méthodes de type Galerkin-Discontinu pour des maillages quelconques (éventuellement étirés), etc...

6.2.2. Améliorations du solveur fluide dans NS3IFS

Mots clés : *équation de Navier-Stokes, fluide incompressible, élément fini, méthode des caractéristiques, ordre élevé, problème de Stokes généralisé, .*

Participants : Gilles Fourestey, Serge Piperno.

Pour la résolution des équations de Navier-Stokes instationnaires pour un fluide incompressible, plus précisément pour le code NS3IFS fondé sur un schéma en temps et une méthode des caractéristiques d'ordre un en maillage fixe [58], nous avons implémenté un nouveau schéma globalement d'ordre deux en temps, y compris en maillage mobile, dans un solveur bidimensionnel et dans le code NS3IFS. Nous avons cette année évalué la possibilité et l'impact de l'utilisation de cette nouvelle méthode sur des problèmes réalistes (écoulements autour de profils de ponts). La méthode donne des résultats satisfaisants lorsqu'elle ne produit pas les instabilités numériques que nous avons étudiées l'an dernier ou lorsque celles-ci peuvent être corrigées. Cependant, son utilisation s'avère assez délicate. Il convient néanmoins de signaler que la méthode initiale d'ordre un rajoute une grande quantité de diffusion numérique, limitant les calculs à un nombre de Reynolds effectif peu élevé.

6.2.3. Simulation et contrôle des effets du vent

Mots clés : *équation de Navier-Stokes, fluide incompressible, élément fini, méthode des caractéristiques, ordre élevé, problème de Stokes généralisé, problème de Stokes linéarisé, contrôle et optimisation.*

Participants : Gilles Fourestey, Marwan Moubachir [LCPC], Serge Piperno.

En collaboration avec Marwan Moubachir (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), qui a séjourné un mois dans le projet, on cherche ici à utiliser nos travaux sur la simulation numérique d'écoulements tridimensionnels, incompressibles, visqueux autour de constructions souples (donc éventuellement mobiles) du Génie Civil et à les étendre dans une problématique de contrôle et d'identification.

Pour cela, ne disposant pas d'une formulation adjointe (c'est hélas ce genre de formulation qui fournit un algorithme efficace pour des problèmes d'optimisation et de contrôle lorsque le nombre de paramètres devient grand), on résout un problème d'optimisation par le calcul en parallèle de dérivées de type Gâteau (par différences finies donc) de la solution du problème couplé par rapport aux paramètres d'optimisation. On montre que ce calcul se résume, pour chaque paramètre, à la résolution en temps direct (et non en temps rétrograde comme pour la formulation adjointe) des équations de Navier-Stokes et d'équations linéarisées (proches des précédentes) en parallèle.

Nous avons cette année développé un code complet de contrôle optimal en interactions fluide/structure. Pour les méthodes des caractéristiques utilisées, un accent particulier doit être mis sur la construction des courbes caractéristiques (suivant la stratégie d'approximation de ces courbes, la dérivabilité des formulations de Lagrange-Galerkin n'est pas assurée). Notre stratégie de contrôle optimal repose sur le couplage entre notre solveur fluide et un code d'optimisation utilisant un algorithme de type quasi-Newton. Ce couplage est implémenté grâce à une librairie de communication par messages (PVM). La résolution des problèmes linéarisés attachés à chaque paramètre d'optimisation a été validée, sur un code expérimental bidimensionnel et sur le code tridimensionnel NS3IFS, pour des caractéristiques construites en maillages fixes ou mobiles, à l'ordre un ou deux.

Nous nous sommes ensuite intéressés à la résolution de problèmes classiques d'optimisation. En particulier, nous avons tenté de résoudre le problème de réduction de la traînée d'un cylindre en rotation. En contrôlant cette vitesse de rotation, nous avons réussi à réduire la traînée dans des proportions conformes à celles obtenues dans différentes références. Enfin, nous avons réussi à identifier les coefficients d'un développement harmonique de conditions aux limites en entrée pour le fluide à partir de la connaissance des coefficients aéroélastiques d'une structure fixe ou mobile.

6.2.4. Simulation des écoulements sanguins

Mots clés : *approche multimodèles, parallélisme, algorithme de couplage, programmation objet, génie biomédical, génie civil.*

Participants : Serge Piperno, Marina Vidrascu [projet MACS], Dominique Chapelle [projet MACS], Jean-Frédéric Gerbeau [projet M3N], Stéphanie Salmon [projet M3N].

Nous avons collaboré avec plusieurs équipes de l'INRIA dans le cadre de deux ARC successives (l'une sur les interactions fluide-structure en général[63] et l'autre, qui se termine cette année, sur le système vasculaire[70]). Nous disposons depuis deux ans d'un coupleur[37], doté d'algorithmes de couplage robustes, permettant notamment de simuler des cas difficiles, comme par exemple la propagation d'une onde de pression dans un vaisseau déformable (modélisé par une coque). Pour ce problème, nous avons développé des algorithmes de piétinement et de recherche de point fixe avec relaxation, qui permettent d'avancer à coup sûr. Il s'agit alors à chaque pas de temps de trouver un point fixe dans le "cycle d'interaction" suivant : (1) trouver la position future de la structure, (2) la transmettre au fluide, (3) intégrer le fluide en domaine mobile, (4) calculer la force exercée par le fluide, (5) en déduire une nouvelle position de la structure ayant subi en avançant en temps les forces calculées précédemment.

Cette année, nous avons validé et amélioré ces algorithmes. Hélas, nous avons rencontré des difficultés pour la simulation de cas-test bien documentés et reproduits avec d'autres modèles physiques similaires. Nos résultats présentent des défauts dans la propagation des ondes couplées coque-fluide. Il semblerait que le coupleur et le solveur fluide NS3IFS ne soient pas en cause, mais que le problème provienne de l'élément fini de coque choisi pour la paroi vasculaire. Ce modèle de coque, qui n'est pas le plus robuste, avait été choisi par

les projets participants parce qu'il est disponible en éléments de surface triangulaires, ce qui rendait la chaîne suivante facilement automatisable (c'était l'objectif central de l'ARC VitesV) :

1. imagerie médicale,
2. maillages de surfaces en triangles,
3. maillages volumiques en tétraèdres,
4. simulation numérique.

Sur ce thème, nous ne comptons pas investir davantage sur des solveurs fluide différents (hexaèdres par exemple). Notre contribution ultérieure dépendra de la disponibilité d'un élément de coque en triangles, robuste et permettant la propagation d'une onde par exemple.

6.2.5. Méthodes en maillages mobiles auto-adaptatifs

Mots clés : *volume fini, maillage non structuré, maillage mobile, maillage adaptatif, mécanique des fluides, formulation ALE, problème de Riemann, schéma mixte implicite/explicite, monotonie, schéma TVD.*

Participants : Maud Mériaux-Poret, Serge Piperno.

Dans le cadre des simulations numériques d'interactions entre un fluide compressible et une structure, nous poursuivons notre étude sur des méthodes en volumes finis écrites en maillage mobile à topologie variable. L'idée de départ est simple. À partir du moment où l'on conçoit de faire bouger un maillage à cause d'une déformation de structure, pourquoi ne pas en profiter pour l'adapter, éventuellement à topologie non constante ?

Pour la résolution numérique d'équations hyperboliques monodimensionnelles (advection linéaire, équation de Burgers), nous nous étions précédemment intéressés à l'implémentation de méthodes conservatives d'abord à topologie constante uniquement, puis à topologie variable : des points pouvant donc être ajoutés ou supprimés. L'ajout correspond à un raffinement local, la suppression permet de réduire le nombre de points inutiles.

Cette année, ces modifications topologiques ont été implémentées effectivement dans un code monodimensionnel en volumes finis. Plusieurs aspects ont demandé un travail soigneux et approfondi. D'abord, les nombreux algorithmes envisagés peuvent ou non dépendre de paramètres de contrôle et leur utilisation est censés être facile pour différentes équations. Il s'est avéré que tous les algorithmes envisagés sont assez difficiles à optimiser, et que leur efficacité (ou la précision des résultats obtenus) dépend assez fortement des cas-tests considérés. Néanmoins, nous avons été plutôt trop exigeants sur ces algorithmes d'adaptation de maillage dans cette étude monodimensionnelle, puisque une étude comparable sera plus difficile en plusieurs dimensions. Un autre aspect qui a demandé quelques reformulations des méthodes initialement imaginées est relié aux futures implémentations en deux et trois dimensions d'espace : nous avons en effet recherché des formalismes qui sont a priori capables de s'étendre relativement simplement en plus d'une dimension. L'implémentation en deux dimensions a été lancée en fin d'année.

6.2.6. Méthodes de relaxation pour les équations de Navier-Stokes compressible

Mots clés : *équation de Navier-Stokes, méthode de relaxation, estimation d'entropie, développement de Enskog-Chapman, gaz réel, volume fini.*

Participants : Emmanuel Bongiovanni, Nathalie Glinsky-Olivier, Alexandre Ern [CERMICS].

De nombreuses applications des sciences de l'ingénieur font intervenir des écoulements de gaz compressibles régis par les équations de Navier-Stokes. Pour la fermeture de ce système, il est nécessaire d'exprimer la pression p et la température T en fonction des variables conservatives. Une modélisation thermodynamique particulièrement simple est celle du gaz thermiquement parfait et calorifiquement parfait (TPCP, encore appelé gaz parfait polytropique) pour lequel :

1. la pression est une fonction bilinéaire de la densité ρ et de l'énergie spécifique interne ε sous la forme $p = (\gamma - 1)\rho\varepsilon$, où $\gamma > 1$ est une constante (qui est également donnée par le rapport entre les capacités calorifiques à pression constante et à volume constant) ;

2. la température ne dépend pas de ρ et est linéaire en ε : $T = (\gamma - 1) \varepsilon / R$, où R est une constante (la constante des gaz parfaits divisé par la masse molaire du gaz).

De par sa simplicité, le modèle de gaz TPCP a été souvent considéré dans les applications. Il existe donc de nombreux codes dédiés à l'approximation numérique des équations de Navier-Stokes pour un fluide compressible dans ce cadre, par exemple par des méthodes de type volumes finis.

Cependant, pour de nombreux gaz, il est nécessaire de considérer une modélisation thermodynamique plus complexe. C'est le cas, par exemple, pour les gaz polyatomiques où les molécules possèdent des degrés de liberté internes (rotation et vibration). Dans ces conditions, la dépendance de la pression et de la température en ε est non-linéaire, la pression étant par ailleurs proportionnelle à la densité et à la température. Un autre exemple faisant intervenir des lois de pression et de température plus complexes est celui des écoulements à haute pression (typiquement au-dessus de 1000 atm). Dans ces conditions, les forces intermoléculaires ont un impact significatif sur la dynamique des collisions microscopiques, ce qui conduit à une loi de pression non-linéaire, tant en la densité qu'en l'énergie interne spécifique. Dans ce cas, le gaz est thermiquement parfait mais calorifiquement imparfait (TPCI).

Une approche intéressante pour traiter les lois de pression et de température générales consiste à utiliser une méthode de relaxation. Pour les équations d'Euler, une méthode de relaxation a été développée récemment par Coquel et Perthame[43]. Le principe de la méthode consiste à relaxer la loi de pression non-linéaire en considérant une décomposition de l'énergie interne spécifique de la forme $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$. L'énergie interne ε_1 est typiquement associée à une loi de gaz TPCP et ε_2 représente la perturbation non-linéaire. Durant le processus de relaxation, la perturbation non-linéaire ε_2 est convectée par l'écoulement tandis que le gradient de pression présent dans l'équation de conservation de l'impulsion ne dépend que de ε_1 . Dans la limite d'un taux de relaxation infini, on retrouve le système des équations d'Euler avec la loi de pression initiale. D'un point de vue théorique, le résultat principal est que, sous certaines conditions "sous-caractéristiques", la stabilité du processus de relaxation est garantie par la positivité de la production d'entropie. D'un point de vue pratique, un avantage important de la méthode de relaxation est qu'elle permet d'étendre, avec très peu de modifications, les solveurs dédiés aux gaz TPCP à la simulation des équations d'Euler avec des lois de pression générales.

On s'est intéressé plus particulièrement au développement d'un nouveau schéma de relaxation pour résoudre les équations de Navier-Stokes pour un fluide compressible avec des lois de pression et de température générales. La différence essentielle avec les équations d'Euler est que la présence des flux diffusifs, et notamment du flux de chaleur, demande de prendre en compte non seulement la loi de pression du gaz réel mais également sa loi de température. Tout en conservant la même décomposition de l'énergie interne que celle introduite par Coquel et Perthame afin d'assurer la stabilité des flux convectifs, nous introduisons une décomposition pondérée du flux de chaleur et du tenseur des contraintes visqueuses. Ainsi, sous certaines hypothèses sur les coefficients pondérateurs et sous les mêmes conditions "sous-caractéristiques" que pour les équations d'Euler, nous prouvons la positivité de la production d'entropie et donc la stabilité du processus de relaxation.

Le nouveau système est résolu par une méthode mixte volumes finis/éléments finis applicable à des maillages triangulaires non structurés. Les flux convectifs sont calculés en utilisant un schéma de Roe. Le solveur de Riemann est une extension très simple de celui considéré pour un gaz TPCP en l'absence de relaxation. Le schéma est d'ordre 3 en espace grâce à la combinaison de la méthode MUSCL et d'un β -schéma. Le schéma est explicite en temps et basé sur une méthode de Runge-Kutta à 4 pas. Les flux diffusifs ainsi que les termes supplémentaires provenant de la méthode de relaxation sont approchés par une technique d'interpolation éléments finis P1.

Cette méthode a été validée cette année sur plusieurs cas tests bidimensionnels d'écoulements visqueux dont la difficulté numérique est croissante :

- tout d'abord, l'étude de la convection d'un réseau périodique de tourbillons, cas test isotherme, permet une première validation pour des écoulements visqueux. Ce cas test est effectué dans le cadre d'une modélisation TPCP pour le gaz réel ;

- la prise en compte de la décomposition du flux de chaleur se fait avec le second cas test : l'interaction d'un spot de température convecté avec un choc faible. Cette étude est réalisée en considérant une loi de gaz TPCP, mais également deux lois de gaz TPCI. Ces deux cas tests ont été étudiés et documentés[68] dans le cas d'un gaz TPCP ;
- pour terminer cette série de cas tests, nous considérons un écoulement dans une cavité fermée dans laquelle un choc se réfléchit sur une paroi, entraînant son interaction avec une couche limite. La nature même de ces phénomènes en fait un cas test numériquement très difficile à traiter et constitue donc un bon moyen d'évaluer la robustesse de la méthode de relaxation. Les résultats de ce dernier cas test sont comparés avec ceux obtenus par Daru et Tenaud[44].

6.2.7. Modèles cinétiques

Mots clés : *modèle cinétique, dérive-diffusion, transition de phase, modèles de coagulation-fragmentation, système de Lifschitz-Slyozov.*

Participants : Thierry Goudon, Frédéric Poupaud.

On s'intéresse ici à divers problèmes de perturbation singulière pour des équations cinétiques, de type "limites hydrodynamiques". Ces questions sont motivées notamment par des problèmes d'ingénierie nucléaire ou de modélisation de dispositifs semi-conducteurs. On cherche ainsi à justifier l'approximation par la diffusion et à déterminer les coefficients de diffusion (et éventuellement de dérive) des équations limites [32]. L'un des apports majeurs réside dans le fait que l'approche utilisée permet de traiter des situations où la variable de vitesse est discrète. Une part des travaux réalisés combine cette approche avec des questions d'homogénéisation [34][33].

6.3. Méthodes de décomposition de domaine

On s'intéresse ici à la mise au point, l'analyse et l'évaluation d'algorithmes par décomposition de domaine pour la résolution de systèmes d'EDPs hyperboliques ou mixtes hyperboliques-paraboliques. En mécanique des fluides, l'étroite similarité formelle existant entre les méthodes hiérarchiques de type multigrille et celles par décomposition de domaine nous conduit à étudier plus profondément leur lien et les possibilités de couplage des deux approches.

6.3.1. Algorithmes de Schwarz additifs avec et sans recouvrement

Mots clés : *équations d'Euler, décomposition de domaine, algorithme de Schwarz additif, conditions d'interface.*

Participants : Victorita Dolean [Université d'Evry et CMAP, École Polytechnique], Stéphane Lanteri, Frédéric Nataf [CMAP, École Polytechnique].

Dans le prolongement de la thèse de Victorita Dolean[47], nous avons poursuivi nos travaux concernant la mise au point d'algorithmes par décomposition de domaine pour la résolution des systèmes d'équations de la mécanique des fluides compressibles et, plus particulièrement, le système d'équations d'Euler. Cette année, nos contributions ont été de deux natures. D'une part, l'étude de convergence de l'algorithme de Schwarz additif basé sur des conditions d'interface naturelles (continuité des flux normaux), précédemment abordée[47], a été généralisée en deux et trois dimensions d'espace avec la prise en compte d'une zone de recouvrement entre sous-domaines voisins via l'introduction dans l'analyse d'un nouveau paramètre spécifiant la taille de cette zone. On obtient ainsi des expressions du taux de convergence valables pour une famille de méthodes[49]. D'autre part, en collaboration avec le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales, Centre Spatial d'Evry), nous avons étudié la mise en œuvre de l'algorithme de Schwarz additif basé sur des conditions d'interface naturelles dans le logiciel CPS (Code de Propulsion Solide) pour la résolution numérique des systèmes d'Euler et de Navier-Stokes en deux dimensions. Une particularité de ce logiciel est de reposer sur une formulation en volumes finis centrés aux éléments d'un maillage hybride triangulaire/quadrangulaire. Pour le reste, les méthodes numériques du logiciel CPS sont essentiellement celles adoptées dans les logiciels

de l'INRIA (solveur de Riemann approché de Roe, méthode MUSCL, schéma implicite linéarisé pour l'intégration en temps) justifiant ainsi l'étude réalisée.

6.3.2. Méthodes hybrides par décomposition de domaine et multigrille pour le calcul d'écoulements instationnaires

Mots clés : *équations de Navier-Stokes, décomposition de domaine, algorithme de Schwarz additif, conditions d'interface, sous-structuration, complément de Schur, multigrille par agglomération, calcul parallèle.*

Participants : Victorita Dolean [Université d'Evry et CMAP, École Polytechnique], Stéphane Lanteri.

On s'intéresse ici à la mise au point de méthodes multigrilles linéaires parallèles pour l'accélération de calculs d'écoulements instationnaires de fluides visqueux. Les méthodes en question doivent offrir un bon compromis entre efficacité numérique et efficacité parallèle. Or il est bien connu qu'une parallélisation globale par application directe de la stratégie de parallélisation de la grille fine aux opérations effectuées sur les grilles grossières n'est pas une solution viable du point de vue de l'efficacité parallèle. En effet, avec ce type de parallélisation, lorsque le traitement progresse depuis la grille fine vers la grille la plus grossière, le poids des communications devient prépondérant (alors que le nombre d'opérations arithmétiques diminue) au détriment des performances parallèles. Cette situation est à l'origine d'un certain nombre de méthodes multigrilles modifiées telle que la formulation envisagée dans la thèse de L. Fournier[51]. Elle consiste à utiliser une technique de filtrage de résidu afin de permettre un traitement simultané (et donc potentiellement parallèle) des différents niveaux de grille. Des résultats prometteurs ont été obtenus dans le cadre de la résolution des équations d'Euler bidimensionnelles en maillages triangulaires. Il reste à étendre la méthode aux équations de Navier-Stokes.

La stratégie considérée ici et pour laquelle une étude préliminaire avait été menée dans le cadre de la thèse de V. Dolean, repose sur une approche hybride par décomposition de domaine et multigrille dans le cadre de la résolution des équations de Navier-Stokes en deux dimensions. Plus précisément, on utilise un algorithme de Schwarz additif basé sur des conditions d'interface naturelles pour la réalisation d'une itération d'une méthode d'intégration en temps implicite d'ordre deux initialement proposée par R. Martin et H. Guillard en 1996[56]. D'un point de vue algébrique, l'algorithme de Schwarz peut être interprété comme une méthode de relaxation de Jacobi appliquée à la résolution d'un système linéaire dont la matrice a une structure par blocs particulière. Une technique de sous-structuration est alors appliquée à cette matrice afin d'obtenir un système réduit (système interface). Il en résulte un algorithme par décomposition de domaine du type complément de Schur où le système interface est résolu au moyen d'une méthode GMRES. Dans ce contexte, une méthode multigrille par agglomération de volumes est utilisée pour résoudre les systèmes locaux contribuant à la formation des produits matrice/vecteur avec l'opérateur interface.

Cette année a vu la consolidation de cette méthode dans le cadre de la résolution numérique d'écoulements instationnaires autour d'un profil d'aile 2D. Nous avons notamment mené une série d'expériences numériques sur des fermes de PC avec des technologies d'interconnexion différentes (Ethernet 100 Mbit/s et 1 Gbit/s, Myrinet 2 Gbit/s) afin de préciser les potentialités de l'approche proposée lorsqu'elle est comparée à une méthode multigrille parallèle classique[48].

6.4. Programmation à objets répartie en Java

Les applications du calcul scientifique, en particulier celles requérant la résolution numérique de systèmes d'EDP, font de plus en plus appel à la programmation orientée objets comme alternative à la programmation procédurale en Fortran 77 ou en C. Cette évolution est notamment motivée par la nécessité de programmer des algorithmes manipulant des structures de données complexes (irrégulières, hiérarchiques, adaptatives) mais aussi par la volonté de factoriser sous la forme de bibliothèques génériques les développements communs à plusieurs méthodes numériques (par exemple, ceux communs aux formulations en volumes finis centrés aux sommets ou aux éléments). La plupart des travaux dans ce domaine utilisent le langage C++ ou, tout simplement, le langage C. Le langage Java, bien que largement adopté par ailleurs, n'a jusqu'ici que peu pénétré le milieu du calcul scientifique.

6.4.1. Programmation orientée objets et calcul distribué en électromagnétisme

Mots clés : *équations de Maxwell, domaine temporel, volume fini, calcul distribué, métacomputing.*

Participants : Françoise Baude [projet OASIS], Roland Bertuli [projet OASIS], Denis Caromel [projet OASIS], Christian Delbe [projet OASIS], Saïd El Kasmi, Stéphane Lanteri.

Nous avons initié cette année une collaboration avec des membres du projet OASIS dans le but d'évaluer le langage Java pour la programmation orientée objets en électromagnétisme. Dans le cadre du stage de DESS de Saïd El Kasmi, nous avons spécifié et partiellement programmé une bibliothèque de classes dédiée à la programmation de méthodes de type volumes finis en maillages non-structurés. Ces classes permettent de traiter des géométries en deux et trois dimensions d'espace, de considérer plusieurs types d'élément (triangle, quadrangle, tétraèdre et hexaèdre) et des formulations en volumes finis centrés aux sommets ou aux éléments du maillage. Cette bibliothèque a été utilisée pour programmer une version orientée objets, nommée JEM3D, d'un logiciel de résolution numérique des équations de Maxwell en trois dimensions en domaine temporel par une méthode de volumes finis centrés aux éléments d'un maillage tétraédrique. Comme on pouvait s'y attendre, la principale limitation d'une telle approche réside dans les performances du logiciel résultant en comparaison de son homologue programmé en Fortran 77. Cependant, les efforts en cours autour de l'évolution de Java pour rendre ce langage plus viable pour les applications du calcul scientifique[52] laissent présager des améliorations importantes dans un avenir proche.

Par ailleurs, le choix du langage Java a aussi été motivé par ses caractéristiques intrinsèques pour le calcul distribué sur le réseau Internet, premier pas vers le métacomputing. Malheureusement, les composants Java standards tels que RMI (Remote Method Invocation) n'aident en fait pas à construire de manière transparente des applications séquentielles, multi-processus, ou distribuées : l'exécution d'une même application sur une architecture multiprocesseurs à mémoire partagée, sur une ferme de PC, ou encore sur une combinaison hiérarchique des deux via Internet (grille de calcul), reste un objectif particulièrement difficile à atteindre. Dans ce contexte, notre objectif a été d'évaluer la bibliothèque 100% Java ProActive[57], développée par le projet OASIS, dans le cadre de la programmation d'une version distribuée du logiciel JEM3D. Ces travaux font l'objet d'une proposition de communication[36] à la future conférence IPDPS qui se déroulera à Nice en avril 2003.

7. Contrats industriels

7.1. Méthode multipôle rapide

Participants : Guillaume Sylvand, Guillaume Alléon [Centre Commun de Recherche Louis Blériot, EADS]. EADS (CCR) soutient depuis plusieurs années nos recherches sur la méthode multipôle rapide. Cette année, un contrat pour la thèse de Guillaume Sylvand s'est achevé et un autre est en voie de signature pour des études ultérieures correspondant à l'optimisation du code AS_ELFIP_FM, à l'enrichissement de ses fonctionnalités (fils et matériaux diélectriques, calculs des champs proches et lointains avec la méthode multipôle rapide, version acoustique du code) et le développement de la bibliothèque MPF de résolution de systèmes linéaires.

7.2. Couplage de formulations intégrales (Alcatel)

Participants : Nathalie Bartoli, Serge Piperno, Christelle Jamonac [Alcatel Space Industries], Denis Pogarieloff [Alcatel Space Industries].

Ce contrat concerne l'optimisation et à la validation d'un logiciel de calcul de rayonnements électromagnétiques EchoLight. Ce logiciel, développé par Alcatel Space, permet de coupler plusieurs structures rayonnantes axisymétriques, avec des axes de révolution non nécessairement colinéaires. Nous avons optimisé le logiciel (optimisation du script shell, introduction d'un processus itératif avec la mise en place d'un critère d'arrêt) et introduit de nouvelles fonctionnalités (possibilité d'alimenter le dispositif avec plusieurs sources), parallélisé le script et validé le tout sur une ferme de PC. Ces premières modifications ont permis de diviser par

4 les temps de calcul sur des configurations complexes. Le calcul des interactions entre objets a été lui-même optimisé et une étude de faisabilité de l'utilisation d'une méthode multipôle rapide est en cours.

7.3. Charge électrostatique de satellites (Alcatel)

Participants : Martine Chane-Yook, Frédéric Poupaud, Serge Piperno, Sébastien Clerc [Alcatel Space Industries], Thierry Dargent [Alcatel Space Industries].

Nous avons achevé une collaboration avec Alcatel Space Industries sur les problèmes de charges de satellites, notamment dus à la propulsion plasmique. Olivier Chanrion (thèse CIFRE avec Alcatel) avait réalisé une étude comportant un gros travail de modélisation des phénomènes et le développement d'un code de simulation pour une géométrie axisymétrique. Alcatel a proposé de continuer cette étude sous la forme d'un contrat de recherche finançant les deux dernières années de thèse de Martine Chane-Yook. Le but est de développer un code tridimensionnel, fondé sur les algorithmes proposés par Olivier Chanrion et un squelette tridimensionnel construit en interne par Sébastien Clerc.

8. Actions régionales, nationales et internationales

8.1. Actions nationales

8.1.1. Résolution parallèle d'équations intégrales

Participants : Guillaume Sylvand, Luc Giraud [Cerfacs], Bruno Carpentieri [Cerfacs], Francis Collino [Cerfacs], Florence Millot [Cerfacs].

Nous continuons une collaboration avec l'équipe parallélisme du Cerfacs sur les problèmes de solveurs itératifs (GMRES flexible et multi-secondes membres) et de préconditionneurs (SPAI et LRU) exploitant "notre" méthode multipôle. Par ailleurs, nous collaborons avec l'équipe électromagnétisme du Cerfacs (Francis Collino, Florence Millot) sur la Fast Multipole Method (choix des paramètres, techniques d'optimisation, comparaisons de codes).

8.1.2. Simulation numérique d'effets du vent sur des structures du Génie Civil

Participants : Serge Piperno, Gilles Fourestey, Emmanuel Briand, Dominique Chapelle [projet MACS], Frédéric Bourquin [LCPC].

Dans le cadre d'un thème de recherche LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), intitulé « Effets du vent sur les structures du Génie Civil », et dont les principaux partenaires sont le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et le SETRA (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes), Emmanuel Briand (ingénieur expert) a cherché à faire une synthèse des résultats obtenus avec le code NS3IFS (cf. 5.3). Rappelons que, nous cherchons à retrouver numériquement les résultats expérimentaux obtenus par le CSTB en soufflerie autour de profils de pont (en statique ou en mouvements libre ou forcé), notamment les grandeurs intégrées ou les profils de pression. En fait, il semblerait que le code NS3IFS ne permette pas de reproduire correctement les résultats du CSTB (en fait, la reproduction de profils de pression semble beaucoup plus difficile que la restitution de grandeurs intégrales comme la traînée ou la portance[59]). Nous essayons d'établir définitivement l'origine de ces assez mauvais résultats (notamment comparés à d'autres codes de calcul). Les possibilités à envisager sont multiples : modèles de turbulence inadaptés, maillages trop grossiers, lois de parois mal utilisées, etc...

8.1.3. Biomécanique numérique des fluides

Participants : Stéphane Lanteri, Serge Piperno, Marc Thiriet [projet M3N et Laboratoire Jacques-Louis Lions (université Paris 6)].

Le groupe de travail "Biomécanique Numérique des Fluides"[69] a été créé au début de l'année 2000. Il est animé par Marc Thiriet et est actuellement constitué de chercheurs des projets CAIMAN de l'Unité de Sophia Antipolis, M3N, GAMMA et MACS de l'Unité de Rocquencourt, du Laboratoire Jacques-Louis Lions

(université Pierre et Marie Curie, Paris 6), et du Département de Mathématiques et Applications de l'ENS Ulm.

Ce groupe s'intéresse à la mise au point d'outils pour la modélisation et l'exploration de certaines parties du système anatomique humain. Les applications cibles relèvent de la biomécanique cardio-vasculaire et de la biomécanique respiratoire. Il s'agit en fait d'une activité multidisciplinaire qui nécessite notamment des interactions avec des biomécaniciens, mais aussi avec des spécialistes de l'imagerie médicale, de la géométrie algorithmique et de la génération de maillage pour la construction de modèles géométriques réalistes de tronçons des systèmes ciblés.

Dans ce contexte, notre contribution porte avant tout sur les aspects relevant de la modélisation numérique des écoulements en question et de la mise au point d'outils de simulation appropriés. Nous nous fondons bien évidemment sur les travaux que nous avons réalisés par le passé, dans le cadre d'applications plus classiques de la mécanique des fluides compressibles et incompressibles.

Dans le domaine cardio-vasculaire, le projet CAIMAN est partenaire depuis début 2001 de l'Action de Recherche Coopérative "VitesV"^[70] (Visualisation Tridimensionnelle et Exploration du Système Vasculaire) qui implique aussi les projets EPIDAURE et PRISME de l'Unité de Sophia Antipolis, les projets M3N, GAMMA et MACS de l'Unité de Rocquencourt, le Laboratoire Jacques-Louis Lions de l'université Pierre et Marie Curie (Paris 6) et l'équipe de mécanique des fluides numérique du CERFACS à Toulouse. Cette ARC s'inscrit dans le cadre d'un programme ambitieux dont le but est de mettre à la disposition du monde de la santé un système combinant :

1. des outils de reconstruction de la géométrie tridimensionnelle des vaisseaux sanguins à partir d'images médicales,
2. des codes de calcul pour la simulation numérique de l'écoulement sanguin en interaction avec les parois déformables des vaisseaux ou artères (interaction fluide/structure),
3. des outils de visualisation du modèle géométrique et des résultats de la simulation numérique.

Un tel système a deux applications majeures : permettre, d'une part une meilleure prédiction de l'évolution de maladies liées à l'athérosclérose et, d'autre part, la planification thérapeutique.

Dans le domaine respiratoire, le projet CAIMAN est partenaire du projet RMOD labélisé en 2001 par le Réseau National des Techniques de la Santé (RNTS). Ce projet est coordonné par Air Liquide CRCD (Centre de Recherche Claude Delorme) et implique aussi les équipes suivantes : le CIERM/U2R2M (CHU Kremlin Bicêtre), l'U494/INSERM (Hôpital Pitié-Salpêtrière, Service de Radiologie), l'Unité de Projet ARTEMIS de l'Institut National des Télécommunications (INT), l'U492/INSERM (Faculté de Médecine, Créteil), le Laboratoire Jacques-Louis Lions de l'université Pierre et Marie Curie (Paris 6). L'objectif de ce projet est de développer un simulateur morphofonctionnel des voies respiratoires pour l'aide au diagnostic, au geste médico-chirurgical et à l'administration de médicaments par inhalation. Jusqu'à ce jour un tel outil n'est pas disponible dans les services cliniques. Son caractère innovant réside dans sa capacité à visualiser et à caractériser la dynamique des écoulements gazeux dans les voies respiratoires à partir des paramètres anatomiques, physiologiques et pathologiques spécifiques du patient. Ce projet pluridisciplinaire, d'une durée de 36 mois, met en synergie divers domaines de compétence depuis l'imagerie médicale et la modélisation physique et numérique en passant par la physiopathologie et jusqu'à la validation expérimentale. La contribution principale du projet CAIMAN à RMOD concerne la modélisation numérique des écoulements gazeux via la résolution des équations de Navier-Stokes 3D pour un fluide compressible à faible nombre de Mach. Cette approche est confrontée à l'approche incompressible du logiciel NS3IFS et des logiciels commerciaux (FIDAP/FLUENT) utilisés par Air Liquide.

9. Diffusion des résultats

9.1. Animation de la Communauté scientifique

9.1.1. Club des utilisateurs du calcul parallèle

Stéphane Lanteri est co-animateur du club des utilisateurs du calcul parallèle sur Sophia Antipolis et dans la région PACA[54] mis en place à l'INRIA Sophia Antipolis, en association avec la région PACA, en novembre 2001. Cette année a notamment vu l'organisation d'une journée de séminaires sur le thème du calcul distribué et de la grille de calcul avec des participations de Franck Capello (LRI, université Paris-Sud), Frédéric Desprez (projet REMAP, INRIA Rhône-Alpes) et Christian Perez (projet PARIS, IRISA) et d'une série de mini-cours par Jack Dongarra (université du Tennessee, département d'informatique).

9.1.2. Comités de rédaction de revues

- Serge Piperno est membre du comité de rédaction de la revue **Progress in computational fluid dynamics, an international journal** (Inderscience).

9.1.3. Divers

Stéphane Lanteri est membre nommé du CNU 26ème section (collège MCF) de l'Université Claude Bernard Lyon 1.

Serge Piperno a fait partie des jurys (soutenances intermédiaires et finales) du Mastère de Mécanique Numérique de l'ENSMP.

Serge Piperno fait partie du CCCC du Cines (Comité des Chercheurs Calculant au Cines).

9.2. Enseignement

- *Introduction au calcul parallèle*, Stéphane Lanteri, Mastère de Mécanique Numérique, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (18 heures).
- *Calcul numérique parallèle*, Stéphane Lanteri, École Supérieure des Sciences Informatiques, filière Calcul Scientifique pour l'Ingénieur (31 heures).
- *Équations intégrales, Interactions fluide-structure, Électromagnétisme*, Serge Piperno, Mastère de Mécanique Numérique, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (18 heures).
- Organisation par Serge Piperno d'une "semaine d'ouverture" à l'INRIA Sophia Antipolis pour les élèves de l'ENPC.

9.3. Thèses et stages

9.3.1. Thèses soutenues en 2002

1. Emmanuel Bongiovanni, *Méthodes de relaxation pour les équations de Navier-Stokes compressibles*, ENPC, soutenue le 13 décembre. Jury : Alexandre Ern et Nathalie Olivier (codirecteurs), Rémi Abgrall (rapporteur), Bruno Després (rapporteur), Frédéric Coquel, Raphaèle Herbin.
2. Guillaume Sylvand, *La méthode multipôle rapide en électromagnétisme : performances, parallélisation, applications*, ENPC, soutenue le 7 juin. Jury : Armel de La Bourdonnaye (directeur), Luc Giraud (rapporteur), Olivier Pironneau (rapporteur), Abderrahmane Bendali, Guillaume Alléon, Alain Bachelot, Mikhael Balabane, Denis Pogarieloff.
3. Gilles Fourestey, *Simulations numériques de couplages aéroélastiques "écoulement incompressible - structure souple". Applications aux ouvrages d'art*, ENPC, soutenue le 11 décembre. Jury : Serge Piperno (directeur), Frédéric Hecht (rapporteur), Boniface N'Konga (rapporteur), Frédéric Bourquin, Alexandre Ern, Frédéric Poupaud.

9.3.2. Thèses en cours

1. Marc Bernacki, Schémas en volumes finis avec flux centrés appliqués à l'aéroacoustique, ENPC
2. Nicolas Canouet, Schémas multi-échelles pour la résolution numérique des équations de Maxwell, ENPC (CDD FT R&D)
3. Martine Chane-Yook, Modélisation et simulation 3D de la charge d'un satellite en environnement plasmique, université de Provence.
4. Maud Mériaux-Poret, Méthodes en maillages mobiles auto-adaptatifs pour des systèmes hyperboliques en une et deux dimensions d'espace - Application aux interactions fluide-structure, ENPC

9.3.3. Directions de thèses et encadrement de stages

1. Loula Fezoui dirige la thèse de Nicolas Canouet.
2. Nathalie Glinsky a co-dirigé, avec Alexandre Ern, la thèse d'Emmanuel Bongiovanni.
3. Serge Piperno a dirigé la thèse de Gilles Fourestey. Il dirige celles de Marc Bernacki et Maud Mériaux-Poret. Il a encadré le stage de DEA de Marc Bernacki.
4. Stéphane Lanteri a encadré le stage de DESS de Saïd El Kasmi.
5. Serge Piperno a encadré le stage de Mastère de Mécanique Numérique (ENSMP) de Florent Garandet (PSA, modélisation des échanges convectifs pour les calculs d'aérothermique sous-capot).

9.3.4. Rapports et participations à des jurys

Thierry Goudon a rapporté sur la thèse de Asma El Ayyadi (INSA Toulouse) et a participé au jury de thèse de Antoine Mellet (Univ. Toulouse 3, examinateur).

Serge Piperno a rapporté sur les thèses de Grégoire Derveaux (École Polytechnique), Mihaela Teodorescu (ENSMP), Julien Bohbot (ENSAM) et Bruno Lombard (université d'Aix-Marseille 2) et fait partie de leur jury. Il a également participé aux jurys de thèse de Gilles Fourestey (Directeur, ENPC), Ulrich Hetmaniuk (Université du Colorado à Boulder, USA), Marwan Moubachir (ENPC), Valérie Labbé (ENSMP) et Bruno Carpentieri (CERFACS).

9.3.5. Stages effectués dans le projet

1. Saïd El Kasmi, *JAVA-EM3D : programmation à objets répartie en JAVA pour le calcul intensif en électromagnétisme*, stage de DESS, Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille.
2. Marc Bernacki, *Schémas en volumes finis avec flux centrés appliqués à l'aéroacoustique*, stage de DEA, Université de Nice-Sophia Antipolis.

9.4. Post-doctorats, ingénieurs-experts

- Nathalie Bartoli, dans le cadre d'un contrat avec Alcatel Space Industries, en séjour post-doctoral depuis le 1/2. Notre contribution concerne l'optimisation et à la validation d'un logiciel de calcul de rayonnements électromagnétiques *EchoLight* qui permet de coupler plusieurs structures rayonnantes axisymétriques. L'étude comporte également une étude de faisabilité de l'utilisation d'une méthode multipôle rapide.
- Emmanuel Briand, dans le cadre du thème de recherche LCPC « Effets du vent sur les structures du Génie Civil », à partir du 1/10. Emmanuel Briand est chargé de faire une synthèse des résultats obtenus avec le code NS3IFS. Il semblerait que ce code ne soit pas en mesure de reproduire (aussi précisément que d'autres codes éventuellement commerciaux) les mesures expérimentales des profils de pression autour d'une section de pont (en statique ou en mouvement libre ou forcé). Si c'est possible, nous chercherons à établir définitivement l'origine de ces résultats.

- Zhongze Li, dans le cadre de l'ARC ICEMA-2, à partir du 1/9. Les contributions du projet CAIMAN à l'ARC ICEMA-2 visent à l'amélioration des performances du logiciel Yav++ pour la simulation de l'activité électromécanique du coeur en abordant des aspects liés à la parallélisation des modèles numériques sous-jacents et à l'utilisation de méthodes de résolution efficaces des systèmes discrets.

9.5. Participation à des colloques, séminaires, invitations

- Conférence invitée de Serge Piperno à l'"International Workshop on Modelling and Simulation of Fluid/Structure/Acoustic interaction", Allemagne, 9-11 septembre.
- Organisation par Serge Piperno du mini-symposium "FMM" à l'"European Symposium on Numerical Methods in Electromagnetics", Toulouse, 6-8 mars.
- Communications de Maud Mériaux-Poret, Nicolas Canouet et Guillaume Sylvand au 34ème Congrès National d'Analyse Numérique (SMAI), Anglet, 27-31 mai.
- Communications de Nicolas Canouet, Serge Piperno et Guillaume Sylvand à l'"European Symposium on Numerical Methods in Electromagnetics", Toulouse, 6-8 mars.
- Communications de Nathalie Glinsky-Olivier, Nicolas Canouet et Serge Piperno au "3rd International Symposium on Finite Volumes for Complex Applications", Porquerolles, 24-28 juin.
- Communication de Guillaume Sylvand au 2nd International Workshop on "Parallel Matrix Algorithms and Applications (PMAA'02)", Neuchatel, 9-10 novembre.
- Communication de Serge Piperno au colloque MS4CMS'02 (Modélisation & Simulation pour la Médecine et la Chirurgie Assistée par Ordinateur), INRIA Rocquencourt, 12-15 novembre.
- Participation de Guillaume Sylvand à l'International Symposium on Antennas (JINA 2002), Nice, 12-14 novembre.
- Participation de Serge Piperno à MS4CMS'02 (Modélisation et Simulation pour la Médecine et la Chirurgie Assistée par Ordinateur), INRIA Rocquencourt, 12-15 novembre.
- Séminaire de Gilles Fourestey à l'EPFL intitulé "A high order Lagrange/Galerkin method in moving grids", le 2 mai.
- Séminaire de Stéphane Lanteri au CEMEF, Ecole des Mines de Paris, sur "Calculation of 2D unsteady compressible flows using a mixed element/volume solver on unstructured triangular meshes", 24 mai.
- Séminaire de Serge Piperno au CEMEF, Ecole des Mines de Paris, sur les "Méthodes de volumes finis en électromagnétisme", 12 avril.
- Séminaire de Serge Piperno au Laboratoire Jean-Alexandre Dieudonné, dans le cadre des "Rencontres électromagnétisme numérique UNSA-INRIA-KTH", intitulé "Energy-conserving FVTD schemes for the Maxwell equations", 14 juin.
- Séminaire de Serge Piperno au CMAP (École Polytechnique) sur la "Construction d'algorithmes stables pour la résolution instationnaire de problèmes couplés", 19 novembre.
- Séminaire de Guillaume Sylvand au CRESPO, INRIA Rocquencourt sur "les Méthodes multipôles", le 28 novembre.
- Séminaire de Guillaume Sylvand au CEA/CESTA lors des "Journées multipôles", le 11 février.
- Séminaire de Guillaume Sylvand au CNES (Toulouse) sur les "Méthodes multipôles rapides", le 27 juin.

10. Bibliographie

Bibliographie de référence

- [1] F. BONNET, J.-P. CIONI, L. FEZOU, F. POUPAUD. *FVTD schemes using conformal hybrid meshes and a PML medium technique*. in « ACES 97 Symposium », Monterey, Californie, 1997.

- [2] R. COIFMAN, V. ROKHLIN, S. WANDZURA. *The FMM for the wave equation : A pedestrian description*. in « IEEE Trans. on Ant. and Prop. », numéro 3, volume 35, 1993, pages 7-12.
- [3] E. DARVE. *Méthodes multipôles rapides : Résolution des équations de Maxwell par formulations intégrales*. thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, 1999.
- [4] L. FEZOU, B. STOUFFLET. *A class of implicit upwind schemes for Euler simulations with unstructured meshes*. in « Journal of Computational Physics », volume 84, 1989, pages 174-206.
- [5] C. HAFNER, R. BALLISTI. *The multiple multipole method (MMP)*. in « COMPEL- The International Journal for Computation and Mathematics in Electric and Electronic Engineering », volume 2, 1983, pages 1-7.
- [6] A. HARTEN, P. D. LAX, B. VAN LEER. *On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws*. in « SIAM Review », numéro 1, volume 25, 1983, pages 36-61.
- [7] S. PIPERNO, C. FARHAT, B. LARROUTUROU. *Partitioned procedures for the transient solution of coupled aeroelastic problems. Part I : Model Problem, Theory, and Two-Dimensional Application*. in « Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering », numéro 1-2, volume 124, 1995, pages 79-112.
- [8] K. S. YEE. *Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media*. in « IEEE Transactions on Antennas and Propagation », numéro AP-16, 1966, pages 302-307.

Thèses et habilitations à diriger des recherche

- [9] E. BONGIOVANNI. *Méthodes de relaxation pour les équations de Navier-Stokes compressibles*. thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, décembre, 2002.
- [10] G. FOURESTEY. *Simulations numériques de couplages aéroélastiques "écoulement incompressible - structure souple". Applications aux ouvrages d'art*. thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, décembre, 2002.
- [11] G. SYLVAND. *La méthode multipôle rapide en électromagnétisme : performances, parallélisation, applications*. thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, juin, 2002.

Articles et chapitres de livre

- [12] J.-F. COLLET, T. GOUDON, F. POUPAUD, A. VASSEUR. *The Becker-Döring system and its Lifshitz-Slyozov limit*. in « SIAM J. Appl. Math. », numéro 5, volume 62, 2002, pages 1488-1500.
- [13] V. DOLEAN, S. LANTERI. *A domain decomposition approach to finite volume solutions of the Euler equations on unstructured triangular meshes*. in « Int. J. Numer. Meth. Fluid », numéro 6, volume 37, 2001, pages 625-656.
- [14] V. DOLEAN, S. LANTERI, F. NATAF. *Construction of interface conditions for solving the compressible Euler equations by non-overlapping domain decomposition methods*. in « Int. J. Numer. Meth. Fluid », 2002, à paraître.

- [15] V. DOLEAN, S. LANTERI, F. NATAF. *Optimized interface conditions for domain decomposition methods in fluid dynamics*. in « Int. J. Numer. Meth. Fluid », 2002, à paraître.
- [16] S. PIPERNO, M. REMAKI, L. FEZOUÏ. *A non-diffusive finite volume scheme for the 3D Maxwell equations on unstructured meshes*. in « SIAM J. Numer. Anal. », numéro 6, volume 39, 2002, pages 2089-2108.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [17] E. BONGIOVANNI, A. ERN, N. GLINSKY-OLIVIER. *A new relaxation method for the compressible Navier-Stokes equations*. in « Finite Volumes for Complex Applications III », Hermes Penton Science, London, éditeurs R. HERBIN, D. KRÖNER., pages 293-300, Porquerolles, France, 2002.
- [18] N. CANOUEÏ, L. FEZOUÏ, S. PIPERNO. *A Finite Volume Time-Domain Method for the solution of Maxwell's Equations on Locally Refined Grids*. in « Finite Volumes for Complex Applications III », Hermes Penton Science, London, éditeurs R. HERBIN, D. KRÖNER., pages 713-720, Porquerolles, France, 2002.
- [19] N. CANOUEÏ, L. FEZOUÏ, S. PIPERNO. *Méthodes de Volumes Finis pour la Résolution du système de Maxwell sur des grilles raffinées non-conformes*. in « 34ème Congrès National d'Analyse Numérique, SMAI », pages 267, Anglet, France, 2002.
- [20] M. MÉRIAUX-PORET, S. PIPERNO. *Méthodes en maillages mobiles à topologie variable pour la résolution d'équations hyperboliques*. in « 34ème Congrès National d'Analyse Numérique, SMAI », pages 245, Anglet, France, 2002.
- [21] S. PIPERNO, L. FEZOUÏ, N. CANOUEÏ. *Energy-conserving FVTD schemes for the Maxwell equations*. in « European Symposium on Numerical Methods in Electromagnetics », ONERA, éditeurs B. MICHIELSEN, F. DECAVELE., pages 389-394, Toulouse, France, 2002.
- [22] S. PIPERNO. *Energy-conserving partitioned procedures for the solution of acoustics, elastoacoustics and electromagnetics in the time domain*. in « International Workshop on Modelling and Simulation of Fluid/Structure/Acoustic interaction », Stuttgart, Allemagne, 2002.
- [23] G. SYLVAND, G. ALLÉON. *The Parallel Fast Multipole Method in Electromagnetics : An Industrial Implementation*. in « European Symposium on Numerical Methods in Electromagnetics », ONERA, éditeurs B. MICHIELSEN, F. DECAVELE., pages 127-132, Toulouse, France, 2002.
- [24] G. SYLVAND. *A Parallel Solver using the Fast Multipole Method in Electromagnetics*. in « 2nd International Workshop on Parallel Matrix Algorithms and Applications (PMAA'02) », Neuchatel, Suisse, 2002.
- [25] G. SYLVAND. *La Méthode Multipôle Rapide en Électromagnétisme : Une Implémentation Parallèle Haute Performance*. in « 34ème Congrès National d'Analyse Numérique, SMAI », pages 148, Anglet, France, 2002.

Rapports de recherche et publications internes

- [26] N. BARTOLI. *Documentation du logiciel Echo_light_n : Optimisation et Validation*. rapport technique, numéro RT-0267, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rt-0267.html>.

- [27] M. BERNACKI. *Schémas en volumes finis avec flux centrés : application à l'aéroacoustique*. rapport technique, numéro RR-4506, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4506.html>.
- [28] E. BONGIOVANNI, A. ERN, N. GLINSKY-OLIVIER. *Une nouvelle méthode de relaxation pour les équations de Navier-Stokes compressibles. II : validation numérique*. rapport technique, numéro RR-4605, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4605.html>.
- [29] E. BONGIOVANNI, A. ERN, N. GLINSKY-OLIVIER. *Une nouvelle méthode de relaxation pour les équations de Navier-Stokes compressibles. I : cadre théorique*. rapport technique, numéro RR-4604, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4604.html>.
- [30] G. FOURESTEY. *Stabilité des méthodes de Lagrange-Galerkin du premier et du second ordre*. rapport technique, numéro RR-4505, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4505.html>.
- [31] G. FOURESTEY. *Une méthode des caractéristiques d'ordre deux sur maillages mobiles pour la résolution des équations de Navier-Stokes incompressible par éléments finis*. rapport technique, numéro RR-4448, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4448.html>.
- [32] T. GOUDON, P.-E. JABIN, A. VASSEUR. *Hydrodynamic limits for the Vlasov-Navier-Stokes equations : parabolic scaling*. rapport technique, Université de Nice Sophia Antipolis, 2002.
- [33] T. GOUDON, A. MELLET. *Homogenization and diffusion asymptotics of the linear Boltzmann equation*. rapport technique, Université de Nice Sophia Antipolis, 2002.
- [34] T. GOUDON, F. POUPAUD. *Homogenization of transport equations ; weak mean field approximation*. rapport technique, Université de Nice Sophia Antipolis, 2002.
- [35] M. MOUBACHIR, G. FOURESTEY. *Optimal Control of Navier-Stokes equations using Lagrange-Galerkin Methods*. rapport technique, numéro RR-4609, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4609.html>.

Bibliographie générale

- [36] F. BAUDE, R. BERTULI, D. CAROMEL, C. DELBE, S. EL KASMI, S. LANTERI. *An object-oriented application for 3D electromagnetism*. 2003, soumis pour publication à IPDPS'03 (International Parallel and Distributed Symposium 2003).
- [37] R. BECKER. COUPLEUR. 1999, <http://www-sop.inria.fr/caiman/AIIFS/perspectives.html>.
- [38] F. BONNET, F. POUPAUD. *Bérenger absorbing boundary condition with time finite volume scheme for triangular meshes*. in « Applied Numerical Mathematics », numéro 4, volume 25, 1997, pages 333-354.
- [39] M. BOSTAN. *Schémas numériques pour la résolution du système de Vlasov-Maxwell*. Thèse en mathématiques appliquées, université de Nice - Sophia Antipolis, avril, 1999.
- [40] M. BOSTAN, F. POUPAUD. *Periodic solutions of the Vlasov Poisson system with boundary conditions*. in « Math. Models Methods Appl. Sci. », numéro 5, volume 10, 2000, pages 651-672.

- [41] D. CHAPPELLE. 1999, <http://www-rocq.inria.fr/modulef/>.
- [42] F. COLLINO, T. FOUQUET, P. JOLY. *Construction d'une méthode de raffinement de maillage spatio-temporelle stable pour les équations de Maxwell*. rapport technique, numéro RR-3888, INRIA, 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3888.html>.
- [43] F. COQUEL, B. PERTHAME. *Relaxation of energy and approximate Riemann solvers for general pressure laws in fluid dynamics*. in « SIAM Journal of Numerical Analysis », volume 35, 1998, pages 2223-2249.
- [44] V. DARU, C. TENAUD. *Evaluation of TVD high resolution schemes for unsteady viscous shocked flows*. in « Computers and fluids », volume 30, 2001, pages 89-113.
- [45] A. DE LA BOURDONNAYE. *High Order Scheme for a Non Linear Maxwell System Modelling Kerr Effect*. in « Journal of Computational Physics », numéro 2, volume 160, 2000, pages 500-521.
- [46] A. DE LA BOURDONNAYE. *Aspects récents en méthodes numériques pour les équations de Maxwell*. série Collection Didactique, INRIA, 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/d-018.html>.
- [47] V. DOLEAN. *Algorithmes par décomposition de domaine et accélération multigrille pour le calcul découlements compressibles*. Thèse en Mathématiques, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2001.
- [48] V. DOLEAN, S. LANTERI. *Performances of parallel multigrid methods for the calculation of compressible flows on clusters of PCs*. 2003, en préparation.
- [49] V. DOLEAN, F. NATAF, S. LANTERI. *Convergence analysis of additive Schwarz for the Euler equations*. 2003, soumis pour publication à Appl. Numer. Math..
- [50] A. ERN, V. GIOVANGIGLI, M. SMOOKE. *Detailed modeling of three-dimensional chemical vapor deposition*. in « Journal of Crystal Growth », volume 180, 1997, pages 670-679.
- [51] L. FOURNIER. *Algorithmes multigrilles parallèles pour l'accélération de calcul découlements complexes en maillages non-structurés 2D et 3D*. Thèse en Sciences de l'Ingénieur, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2001.
- [52] Java Grande Forum. 2002, <http://www.javagrande.org/>.
- [53] B. KOOBUS, C. FARHAT. *Second-Order Time-Accurate and Geometrically Conservative Implicit Schemes for Flow Computations on Unstructured Dynamic Meshes*. in « Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering », volume 170, 1999, pages 103-130.
- [54] S. LANTERI. *Club des utilisateurs du calcul parallèle*. 2002, <http://www-sop.inria.fr/caiman/personnel/Stephane.Lanteri/clubPC-fr.html>.
- [55] S. LANTERI. *EM3D/VFC*. 2002, <http://www-sop.inria.fr/caiman/personnel/Stephane.Lanteri/em3D-vfc/em3D-vfc.html>.

- [56] R. MARTIN, H. GUILLARD. *A second order defect correction scheme for unsteady problems*. in « Computers and fluids », numéro 1, volume 25, 1996, pages 9-27.
- [57] OASIS. *ProActive*. 2002, <http://www-sop.inria.fr/oasis/ProActive>.
- [58] C. PARES MADRONAL. *Étude mathématique et approximation numérique de quelques problèmes aux limites de la mécanique des fluides*. thèse de doctorat, université de Paris VI, 1992.
- [59] S. PIPERNO, P.-E. BOURNET. *Numerical simulations of wind effects on flexible civil engineering structures*. in « Revue Européenne des Eléments Finis », numéro 5-6, volume 8, 1999, pages 659-687.
- [60] S. PIPERNO, S. DEPEYRE. *Criteria for the design of limiters yielding efficient high resolution TVD schemes*. in « Computers and fluids », numéro 2, volume 27, 1998, pages 183-197.
- [61] S. PIPERNO, C. FARHAT, B. LARROUTUROU. *Partitioned procedures for the transient solution of coupled aeroelastic problems - Part I : Model Problem, Theory, and Two-Dimensional Application*. in « Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering », numéro 1-2, volume 124, 1995, pages 79-112.
- [62] S. PIPERNO. *L^2 -stability of the upwind first order finite volume scheme for the Maxwell equation in two and three dimensions on arbitrary unstructured meshes*. in « RAIRO Modél. Math. Anal. Numér. », numéro 1, volume 34, 2000, pages 139-158.
- [63] S. PIPERNO. 1999, <http://www-sop.inria.fr/caiman/AIIFS/>.
- [64] F. POUPAUD, M. REMAKI. *Existence et unicité des solutions du système de Maxwell pour des milieux hétérogènes non réguliers*. in « Note aux C.R.A.S. », volume t. 330 Série I, 2000, pages 99-103.
- [65] M. REMAKI. *A New Finite Volume Scheme for Solving Maxwell's System*. in « COMPEL- The International Journal for Computation and Mathematics in Electric and Electronic Engineering », numéro 3, volume 19, 2000, pages 913-931.
- [66] M. REMAKI. *Méthodes numériques pour les équations de Maxwell instationnaires en milieu hétérogène*. Thèse en mathématiques appliquées, École Nationale des Ponts & Chaussées, décembre, 1999.
- [67] G. A. SOD. *A survey of several finite difference methods for systems of non-linear hyperbolic conservation laws*. in « Journal of Computational Physics », volume 27, 1978, pages 1-31.
- [68] C. TENAUD, E. GARNIER, P. SAGAUT. *Evaluation of some high-order shock capturing schemes for direct numerical simulation of unsteady two-dimensional free flows*. in « Int. J. Numer. Meth. Fluid », volume 33, 2000, pages 249-278.
- [69] M. THIRIET. 2001, <http://www-rocq.inria.fr/Marc.Thiriet/BMNFgp/>.
- [70] VITESV. 2001, <http://www-rocq1.inria.fr/Marc.Thiriet/Vitesv/>.