

## *Projet Caiman*

*Calcul scientifique, modélisation et analyse numérique*

*Sophia Antipolis*

THÈME 4B



*R*apport  
*d'Activité*

2000



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>5</b>
3.1	Couplages de modèles et de méthodes . . . . .	5
3.2	Équations de conservation et volumes finis . . . . .	7
3.3	Équations intégrales et méthode multipôle rapide en électromagnétisme . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>11</b>
4.1	Propagation d'ondes électromagnétiques . . . . .	11
4.2	Mécanique des fluides et problèmes connexes . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Logiciels</b>	<b>13</b>
5.1	MAXWELL/VF . . . . .	13
5.2	Simu_ESD . . . . .	14
5.3	NS3IFS . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>15</b>
6.1	Électromagnétisme . . . . .	15
6.1.1	Méthodes de décomposition de domaines pour l'équation de Helmholtz . . . . .	15
6.1.2	Résolution rapide des équations intégrales pour l'électromagnétisme en domaine fréquentiel . . . . .	15
6.1.3	Électromagnétisme en milieu non régulier ou non-linéaire . . . . .	16
6.1.4	Volumes finis centrés pour l'électromagnétisme en domaine temporel . . . . .	16
6.1.5	Volumes finis multi-échelles en espace et en temps pour l'électromagnétisme en domaine temporel . . . . .	17
6.1.6	État périodique pour les systèmes de Vlasov-Poisson et Vlasov-Maxwell . . . . .	18
6.1.7	Environnement plasmique des satellites . . . . .	18
6.2	Mécanique des fluides et problèmes connexes . . . . .	19
6.2.1	Interaction fluide compressible-structure . . . . .	19
6.2.2	Simulations numériques d'effets du vent sur des structures souples . . . . .	20
6.2.3	Prototype de plate-forme de couplage . . . . .	21
6.2.4	Améliorations du solveur fluide dans NS3IFS . . . . .	21
6.2.5	Méthodes en maillages mobiles auto-adaptatifs . . . . .	21
6.2.6	Méthodes de résolution des équations de Navier-Stokes pour des gaz non polytropiques . . . . .	22
6.2.7	Combustion dans un réacteur à dépôt chimique . . . . .	23
6.3	Interfaçage de programmes . . . . .	24
<b>7</b>	<b>Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>24</b>
7.1	Conseil scientifique pour Alcatel Space Industries . . . . .	24

<b>8</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>25</b>
8.1	Actions nationales . . . . .	25
8.1.1	Simulation numérique d'effets du vent en génie civil . . . . .	25
8.1.2	Biomécanique numérique des fluides . . . . .	25
8.1.3	Environnement plasmique des satellites . . . . .	26
8.2	Actions internationales . . . . .	26
8.2.1	Méthodes non conformes et décomposition de domaines . . . . .	26
<b>9</b>	<b>Diffusion de résultats</b>	<b>27</b>
9.1	Animation de la Communauté scientifique . . . . .	27
9.1.1	Journées Nice-Toulon-Marseille . . . . .	27
9.1.2	GdR Sparch . . . . .	27
9.2	Enseignement . . . . .	27
9.3	Thèses . . . . .	27
9.4	Habilitation . . . . .	28
9.5	Stages, post-doctorats, ingénieurs-experts . . . . .	28
9.6	Participation à des colloques, séminaires, invitations . . . . .	28
<b>10</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>29</b>

## 1 Composition de l'équipe

### Responsable scientifique

Serge Piperno [IPC, ENPC]

### Assistante de projet

Sabine Barrère [adjoint administratif, ENPC]

### Personnel INRIA

Loula Fezoui [DR]

Stéphane Lanteri [CR, à partir du 1/9]

### Personnel ENPC

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

Robert Rivière [ITPE, jusqu'au 1/7 (ingénieur systèmes et réseaux)]

### Collaborateurs extérieurs

Frédéric Poupaud [Professeur, UNSA]

Thierry Goudon [Maître de conférences, UNSA]

### Chercheur invité

Ulrich Hetmaniuk [Doctorant, université du Colorado à Boulder, du 1/6 au 31/7]

### Chercheurs post-doctorants

Emmanuel Briand [post-doc INRIA jusqu'au 1/11]

Malika Remaki [post-doc ENPC et ATER jusqu'au 1/9]

### Chercheurs doctorants

Emmanuel Bongiovanni [boursier ENPC]

Nicolas Canouet [boursier FT R&D]

Olivier Chanrion [boursier CIFRE Alcatel]

Victorita Dolean [boursière CNES/INRIA jusqu'au 1/11, puis INRIA]

Gilles Fourestey [boursier ENPC, service national jusqu'au 1/8]

Maud Meriaux-Poret [boursière ENPC à partir du 1/10]

Guillaume Sylvand [IPC]

### Stagiaires

Maud Meriaux-Poret [stage de DEA du 1/7 au 30/9]

## 2 Présentation et objectifs généraux

CAIMAN est un projet commun avec le CERMICS (laboratoire de recherche commun à l'INRIA et à l'École Nationale des Ponts et Chaussées). Dans un très proche avenir, le projet devrait être commun avec le Laboratoire Jean-Alexandre Dieudonné (unité mixte de recherche du CNRS et de l'université de Nice-Sophia Antipolis).

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 (analyse microlocale, méthode multipôle). 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 issues de la mécanique des fluides, adaptées à l'électromagnétisme. Nous nous intéressons aux couplages de schémas et à l'utilisation de grilles 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 aériens en génie biomédical).

### Relations internationales et industrielles

Participation au Groupe de Recherche Sparch. Contrats avec Aérospatiale-Matra, Alcatel Space Industries, France Télécom R&D. Relations et collaborations avec l'ONERA, les universités de Nice, de Provence, de Paris 6 et 13 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, Emmanuel Briand, Olivier Chanrion, Gilles Fourestey, Nicolas Canouet, Malika Remaki.

#### **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 pré-existantes relatives à chaque sous-système. Sans construction particulière, un algorithme de couplage n'hérite pas des propriétés numériques des méthodes sur lesquelles il repose.

**Résumé :** *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 [19]), les équations de Navier-Stokes prendront une forme différente selon le type d'écoulement (compressible ou non) ou 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 [9] 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 <sup>[Bos99]</sup> ou l'analyse de stabilité du couplage pour l'interaction fluide-structure [17]. 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 [6].

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 [2]. Ces méthodes sont en général plus difficiles à mettre en œuvre sur machine et à analyser [18] (stabilité 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.

---

[Bos99] M. BOSTAN, *Schémas numériques pour la résolution du système de Vlasov-Maxwell*, Thèse en mathématiques appliquées, université de Nice - Sophia Antipolis, avril 1999.



### 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, Emmanuel Bongiovanni, Maud Mériaux-Poret, Nicolas Canouet, Malika Remaki.

**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 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.

**Résumé :** *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 <sup>[Rem99]</sup> ou non [11]) 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 [Sod78]. 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. Le principe en est simple : on considère comme espace d'approximation les fonctions constantes par morceaux, ces morceaux ou cellules

---

[Rem99] M. REMAKI, *Méthodes numériques pour les équations de Maxwell stationnaires en milieu hétérogène*, Thèse en mathématiques appliquées, École Nationale des Ponts & Chaussées, décembre 1999.

[Sod78] G. A. SOD, « A survey of several finite difference methods for systems of non-linear hyperbolic conservation laws », *Journal of Computational Physics* 27, 1978, p. 1–31.

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 de 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) [4]. 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 [PD98].

Ces méthodes peuvent être appliquées dans la grande majorité des domaines d'application abordés par le projet, des écoulements multispèces 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 [19]. Nous continuons à développer des méthodes numériques adaptées, et nous avons également construit un nouveau schéma de type volumes finis [22], ayant des propriétés et un coût comparable à ceux de l'universel schéma de Yee, schéma aux différences finies limité aux géométries simplistes.

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 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 [5]). 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

---

[PD98] S. PIPERNO, S. DEPEYRE, « Criteria for the design of limiters yielding efficient high resolution TVD schemes », *Computers and fluids* 27, 2, 1998, p. 183–197.

intégrale, méthode multipôle, calcul parallèle.

**Participants :** Guillaume Sylvand, Armel de La Bourdonnaye.

**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 contours bidimensionnel de cet objet ; pour les problèmes qui nous intéressent, les systèmes linéaires résultants sont (hélas!) pleins, puisque la formulation intégrale fait intervenir un noyau non local.

**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.

**Résumé :** *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  $\Omega$  de frontière  $\Gamma$  soumis par exemple à une onde plane électromagnétique incidente notée  $E_{inc}$ . On cherche à calculer les courants électriques existants sur  $\Gamma$ , 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  $\phi$  désigne l'inconnue (i.e. le champ de courant sur  $\Gamma$ ),  $\phi^t$  est une fonction-test,  $X$  est un certain espace de fonction, 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, 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 est 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. Ce  $n^2$  est la principale limitation à ce type de calcul.

La méthode multipôle rapide [3] permet de s'en affranchir. Elle consiste à remplacer un produit matrice-vecteur "classique" par un produit matrice vecteur approché. 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 temps en  $n^{3/2}$  (la surface  $\Gamma$  est découpée en domaines de diamètre  $\lambda/2$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde de  $E_{inc}$ ) des algorithmes multi-niveaux de temps en  $n \log n$  ( $\Gamma$  est découpée récursivement). L'algorithme multi-niveaux (Fast Mutlipole Method - FMM) s'articule autour d'un *octree*. Il s'agit d'un arbre 3D dont la racine est un cube contenant  $\Gamma$ . Le niveau 1 est obtenu en divisant ce cube en 8 sous-cubes identiques, dont on ne conserve que ceux qui coupent  $\Gamma$ . 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 racines 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'applications

### 4.1 Propagation d'ondes électromagnétiques

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

**Résumé :** *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, milieu hétérogène, 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, éléments finis discontinus <sup>[RF99]</sup>, milieu PML <sup>[BP97]</sup>) au cas du système de Maxwell, en prenant désormais en compte un milieu éventuellement fortement hétérogène [19]. Ensuite, ces méthodes sont comparées avec d'autres méthodes plus utilisées (schéma aux différences finies de Yee par exemple [7]) 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 <sup>[Rem99]</sup>. 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).

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

---

[RF99] M. REMAKI, L. FEZOU, « Comparison between a Discontinuous Galerkin method and a Finite Volume Time-Domain method in solving Maxwell equations, in heterogeneous media », *in: Conference Proceedings, 15th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics*, Naval Postgraduate School, Monterey, Ca, USA, 15-20 mars 1999.

[BP97] F. BONNET, F. POUPAUD, « Bérenger absorbing boundary condition with time finite volume scheme for triangular meshes », *Applied Numerical Mathematics* 25, 4, 1997, p. 333-354.

[Rem99] M. REMAKI, *Méthodes numériques pour les équations de Maxwell instationnaires en milieu hétérogène*, Thèse en mathématiques appliquées, École Nationale des Ponts & Chaussées, décembre 1999.

millions d'inconnues. Sur ce point, le projet développe des approches prometteuses, comme la discrétisation microlocale [dLB98] (en approximation haute fréquence) ou la méthode multipôle [3], 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) et baignent dans un nuage de particules, chargées ou non, qui se rapproche du plasma en certains points et 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.

**Résumé :** *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) et les écoulements sanguins d'une part, les feux de forêt et l'épitaixie, d'autre part.*

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 combustion en milieu multiphasique et 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

---

[dLB98] A. DE LA BOURDONNAYE, *Aspects récents en méthodes numériques pour les équations de Maxwell*, Collection Didactique, INRIA, 1998.

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 de plus en plus 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 [6]. 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 construire des problèmes modèles d'écoulements sanguins, et, en collaboration notamment avec M3N, nous espérons simuler le comportement de vaisseaux collabables (susceptibles de s'écraser en forme de huit) et d'anévrismes. D'autre part, nous nous intéressons à la simulation de l'effet du vent sur de grandes constructions du génie civil [15]. 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 (qui s'applique aux incendies de forêt par exemple). D'autre part, la simulation numérique d'un réacteur de dépôt chimique est une activité en plein essor dans le projet. Cette technique, l'épitaxie [EGS97], 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 au sein du réacteur, 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 [CP98], 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.

## 5 Logiciels

### 5.1 MAXWELL/VF

**Mots clés :** électromagnétisme, équations de Maxwell, domaine temporel, volume fini,

---

[EGS97] A. ERN, V. GIOVANGIGLI, M. SMOOKE, « Detailed modeling of three-dimensional chemical vapor deposition », *Journal of Crystal Growth* 180, 1997, p. 670–679.

[CP98] F. COQUEL, B. PERTHAME, « Relaxation of energy and approximate Riemann solvers for general pressure laws in fluid dynamics », *SIAM Journal of Numerical Analysis* 35, 1998, p. 2223–2249.

milieu hétérogène, calcul parallèle.

**Participant** : Loula Fezoui [Correspondant].

Le logiciel MAXWELL/VF est un code développé par le projet et SIMULOG qui permet la simulation de la propagation d'ondes électromagnétiques instationnaires par une méthode de volumes finis centrés aux nœuds. Il s'insère dans une chaîne logicielle allant du mailleur à la visualisation en passant par la décomposition de maillages pour des traitements en mode parallèle. Des simulations de calcul en grande taille sont possibles sur des réseaux de stations ou de PC. Ce code est fondé sur des méthodes numériques issues de la dynamique des fluides. La diffusion numérique inhérente le rend peu précis pour des calculs de résonance. La prochaine version viendra à maturité dans un ou deux ans.

## 5.2 Simu\_ESD

**Mots clés** : équation de Poisson, équation de dérive-diffusion, équation d'Euler, ionisation, décharge sous vide, désorption, plasma.

**Participant** : Serge Piperno [Correspondant].

Le logiciel Simu\_ESD simule la propagation d'une décharge électrostatique de type diélectrique. Il est basé sur une méthode de type fluide. La décharge est produite par un couplage entre trois types de particules (électrons, ions, molécules neutres). Ce couplage se fait via les phénomènes de désorption, d'ionisation, de recombinaison ainsi que par l'équation de Poisson. Ce code utilise des méthodes de différences finies, de volumes finis et d'éléments finis, qui sont couplées. Il a plutôt la forme d'un prototype très pointu que d'un code industriel. Néanmoins, il pourrait servir de base à d'autres développements.

## 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).

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 <sup>[Bec]</sup> développé dans le cadre de l'ARC "Simulations numériques d'interactions fluide-structure en génie civil et ingénierie biomédicale" <sup>[Pip]</sup>, ce programme permet maintenant de simuler des écoulements autour de structures modélisées par des coques (comme des vaisseaux sanguins par exemple), grâce à la librairie MODULEF <sup>[mod]</sup>, maintenant disponible librement. Pour

---

[Bec] R. BECKER, «COUPLEUR», <http://www-sop.inria.fr/caiman/AIIFS/perspectives.html>.

[Pip] S. PIPERNO, <http://www-sop.inria.fr/caiman/AIIFS/>.

[mod] <http://www-rocq.inria.fr/modulef/>.



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.

## 6 Résultats nouveaux

### 6.1 Électromagnétisme

#### 6.1.1 Méthodes de décomposition de domaines pour l'équation de Helmholtz

**Mots clés** : méthode de décomposition de domaine, problème de Helmholtz, domaine fictif, condition absorbante.

**Participants** : Ulrich Hetmaniuk (Université du Colorado, Boulder (US)), Serge Piperno, Charbel Farhat (Université du Colorado, Boulder (US)).

Dans la continuité de l'étude d'une méthode de décomposition de domaines [13] pour l'équation de Helmholtz (avec l'ONERA et l'Université du Colorado), nous poursuivons une étude sur la possibilité d'utiliser des sous-domaines fictifs notamment pour simuler la vibro-acoustique d'un sous-marin, en exploitant la géométrie approximativement axisymétrique de la structure. Ulrich Hetmaniuk a séjourné un mois dans le projet, pour travailler sur une formulation en domaine fictif axisymétrique du problème de Helmholtz.

#### 6.1.2 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, calcul parallèle.

**Participants** : Guillaume Sylvand, Armel de La Bourdonnaye.

Toujours 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 dix 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 une sphère de diamètre égal à trente longueurs d'onde). La méthode multipôle permet d'accélérer notablement les produits matrice-vecteur et de rendre une résolution itérative bien plus rapide.

Nous avons cette année continué l'implantation de la méthode multipôle rapide multi-niveaux, notamment avec le calcul distribué (SIMD, à mémoire distribuée, sous MPI) entre les processeurs de l'octree (sur lequel est fondé l'algorithme multi-niveaux). Nous avons pris du temps à optimiser le code, sur plusieurs types d'architectures (Cray T3E, IBM POWER SP2/3, SGI Origin2000, NEC SX5) aussi bien pour des calculs électromagnétiques et acoustiques, avec

comme résultat le passage de cas à un million d'inconnues (sur une sphère, la taille de l'objet comptant plus que sa forme, du point de vue de la méthode multipôle). Par la suite, nous espérons pouvoir atteindre dans le courant de l'année 2001 des nombres d'inconnues plus importants, de l'ordre de  $5.10^6$ , sur 64 processeurs, en moins de 2 heures.

### 6.1.3 Électromagnétisme en milieu non régulier ou non-linéaire

**Mots clés** : système de Maxwell, domaine temporel, matériau fortement hétérogène, matériau anisotrope, effet Kerr, existence et unicité, théorème de Hille-Yosida, auto-focalisation, filamentation, méthode de Godunov, problème de Riemann, volume fini, solveur de Roe.

**Participants** : Malika Remaki, Frédéric Poupaud, Armel de La Bourdonnaye.

Nous nous intéressons aux solutions du système de Maxwell pour des milieux anisotropes fortement hétérogènes, pour lesquels la permittivité et la perméabilité sont des matrices symétriques définies positives dépendant non nécessairement continûment de la variable d'espace. Nous avons cherché à étendre le résultat d'existence et d'unicité de la solution du problème de Cauchy pour le système de Maxwell (donnée initiale essentiellement  $L^2$  et  $H_{rot}$  et conditions aux limites mixtes métalliques ou absorbantes). La démonstration [19] s'appuie sur le théorème de Hille-Yosida, et l'unique solution obtenue est  $L^2$  en espace et  $C^1$  en temps.

En milieu non-linéaire, nous avons commencé une recherche bibliographique du besoin de simulation. Lorsque le besoin apparaîtra plus clairement, nous reprendrons l'étude initiée par Armel de La Bourdonnaye sur le système de Maxwell-Kerr, modèle important pour la compréhension du comportement des champs forts dans des milieux isotropes (il permet en particulier de prédire les phénomènes de rotation de la polarisation et de comprendre l'auto-focalisation effective seulement en deux et trois dimensions d'espace). Nous comptons aller plus loin dans l'utilisation de volumes finis [11] dans ce domaine.

### 6.1.4 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** : Malika Remaki, Serge Piperno, Loula Fezoui, Nicolas Canouet.

Pour le système de Maxwell en domaine temporel, nous avons proposé un nouveau schéma en volumes finis centrés sur les éléments (de forme quelconque) d'un maillage structuré ou non-structuré [22]. Ce schéma est particulièrement simple, puisqu'il est fondé sur des flux numériques totalement centrés entre cellules et sur un schéma en temps explicite et de type saute-mouton. Par une méthode d'énergie, nous avons démontré la stabilité  $L^2$  d'un schéma en volumes finis décentrés d'ordre un [18] sur une partition en volumes finis quelconques, en toutes dimensions. Nous avons étendu ce résultat au schéma centré proposé par Malika Remaki. La démonstration de la stabilité repose encore sur une méthode d'énergie. D'autre part, contrairement au cas décentré, une énergie discrète se conserve exactement, ce qui prouve l'absence de diffusion dans le schéma proposé par Malika Remaki. Rappelons que ce schéma

produit une dispersion comparable à celle du schéma de Yee (schéma aux différences finies, limité aux maillages cartésiens) [7], est d'un coût équivalent au schéma de Yee sur des grilles structurées mais permet cependant d'attaquer des géométries complexes de manière naturelle, contrairement au schéma de Yee.

Nous avons collaboré avec Aérospatiale-Matra sur la validation du schéma proposé sur des configurations industrielles, notamment en incluant une conductivité non nulle par éléments [26] : nous avons donc testé le nouveau schéma sur un problème de compatibilité électromagnétique, un cas-test de type antenne (avec maillage raffiné) et un problème de diffraction par des objets composites.

Nous avons proposé deux nouveaux schémas centrés, dont un s'adapte mieux aux discontinuités de tailles de mailles. Nous avons prouvé leur stabilité en une dimension d'espace, ce qui devra être étendu aux dimensions supérieures.

### 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 Dedeban (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 avons commencé une collaboration avec France Télécom R&D, dont le thème est l'étude de schémas multi-échelles en temps et en espace, fondés sur les volumes finis. Nous avons fait quelques premiers pas intéressants sur le couplage de grilles spatiales de tailles significativement différentes, le couplage de pas de temps significativement différents (on sous-cycle un des sous-domaines, parce que, à terme, le maillage y sera plus raffiné, et la condition de stabilité de type CFL nous imposera plus tard un pas de temps nettement plus petit). Dans les deux cas, nous avons proposé en une dimension d'espace de nouveaux algorithmes de couplage qui ont toutes les bonnes propriétés :

- consistance, faible dispersion, absence d'ondes parasites,
- conservation d'une énergie discrète globale,
- construction explicite des inconnues à l'interface.

Nous avons proposé toujours en une dimension d'espace un algorithme pour des sous-domaines avec nombre de Courant constant (donc pas de temps et d'espace différents). Cet algorithme provoque encore trop d'oscillations parasites pour être étendu en plusieurs dimensions.

Nous menons parallèlement des tests numériques sur les schémas centrés proposés en volumes finis sur des partitions non conformes (une arête peut en couper une autre ailleurs que sur une des ses extrémités).

### 6.1.6 État périodique pour les systèmes de Vlasov-Poisson et Vlasov-Maxwell

**Mots clés :** Vlasov-Poisson, Vlasov-Maxwell, régime permanent.

**Participants :** Mihai Bostan, Frédéric Poupaud.

Les régimes permanents dans les dispositifs modélisés par les systèmes de Vlasov-Poisson ou de Vlasov-Maxwell sont caractérisés par des solutions stationnaires ou périodiques. Ces dernières sont difficilement obtenues par des méthodes classiques. Nous avons abordé le problème théorique pour obtenir des conditions sur les données qui permettent d'assurer l'existence de ces régimes périodiques. Des démonstrations mathématiques rigoureuses sont données dans [9] pour le cas Vlasov-Poisson en toutes dimensions et dans [10] en une dimension d'espace pour Vlasov-Maxwell.

### 6.1.7 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, Loula Fezoui, Frédéric Poupaud, Thierry Goudon, Serge Piperno, Sylvie Brosse (Alcatel Space Industries), Thierry Dargent (Alcatel Space Industries).

Les satellites en vol baignent dans un mélange de particules chargées (et éventuellement de particules neutres). Des électrons et des ions issus de ce plasma interagissent avec les surfaces du satellite et vont ainsi modifier sa charge électrostatique. Nous sommes intéressés particulièrement par ces phénomènes de charge en considérant des plasmas provenant de la magnétosphère et d'un propulseur électrique. Le but est de simuler l'influence de ce type de propulsion sur la charge électrostatique d'un satellite en vol. Pour obtenir des simulations numériques réalistes, il faut choisir des modèles pertinents et des méthodes numériques précises et efficaces.

Nous avons poursuivi l'étude de modèles monodimensionnels particulière pour la description du plasma magnétosphérique. Pour le modèle Vlasov-Poisson stationnaire abordé précédemment, nous avons obtenu un résultat d'existence de solutions, après avoir corrigé les incompatibilités de conditions aux limites que nous avons mises en évidence. Nous avons étudié en outre, des modèles de type fluide pour simuler à la fois des modèles unidimensionnels, et sphériques. Le modèle permettant de décrire les ions est un modèle fluide isotherme. Pour modéliser les électrons, nous considérons qu'ils s'équilibrent selon une distribution de type Maxwell-Boltzmann. Pour le modèle unidimensionnel, les problèmes de conditions limites sont de nouveau rencontrés, pour le modèle sphérique, nous obtenons la convergence. Néanmoins ce modèle n'est pas adapté au cadre géostationnaire : gaine épaisse, absence de collisions.

Pour comprendre l'effet des réémissions, nous avons étudié les phénomènes de charge d'espace qu'elles engendrent. Pour ce faire, nous avons étudié un modèle semi-lagrangien monodimensionnel (non extensible au multidimensionnel) permettant de résoudre les équations de Vlasov-Poisson. Ce modèle nous a permis de comprendre que nous ne pourrions pas négliger les effets de charge d'espace induits par les réémissions par la suite.

Pour ce qui est des méthodes numériques de résolution, nous avons analysé les méthodes

connues existantes. Une première méthode efficace pour résoudre le problème de charge en environnement magnétosphérique a été développée par le RIAME - Research Institute on Applied Mechanics and Electrodynamics du Moscow Aviation Institute - (code ESCAPE) ou par Maxwell Technologies (NASCAP 2000). Ce modèle est une méthode particulière. Il permet de négliger la charge d'espace du fait que la longueur de Debye est grande et de calculer les courants incidents aux surfaces en remontant les trajectoires ; cette méthode est bien moins coûteuse qu'une méthode particulière directe mais ne permet bien entendu pas de prendre en compte les effets de charge d'espace induits par les réémissions. Une méthode efficace pour calculer de manière précise le jet issu du propulseur repose dans des méthodes de type particulière, les collisions inélastiques entre neutres lents et ions rapides étant prises en compte par des algorithmes de type Monte-Carlo. Nous pouvons, en plus, bénéficier du fait que la longueur de Debye est petite pour imposer la neutralité du plasma. Ces modèles, issus du Jet Propulsion Laboratory (NASA et CIT) ou des récents travaux de l'université de Toulouse, restent très coûteux, notamment dans l'optique du couplage avec les conditions magnétosphériques.

Pour coupler les deux problèmes, nous proposons de résoudre l'équation de Poisson par une méthode volumique au voisinage du satellite (pour tenir compte des phénomènes de charge d'espace induite par les réémissions et par le propulseur) à une méthode intégrale pour récupérer la condition limite à l'infini. Pour la méthode de calcul des courants en surface provenant de la magnétosphère, nous nous proposons d'implémenter la méthode du RIAME avec condition limite maxwellienne pour les densités de particules au niveau de l'interface. Pour calculer la plume du propulseur nous nous proposons d'utiliser un modèle fluide, celui-ci ne pouvant être aussi fin qu'un modèle particulière.

Parallèlement, dans le but de valider le futur modèle d'expansion de jet, nous avons aussi réalisé une campagne de mesures au Laboratoire de Physique des Milieux Ionisés de l'école Polytechnique sur un propulseur de type SPT-50. Le propulseur fonctionnait relativement mal mais cela nous a quand même permis, grâce à des outils d'interpolation, de récupérer des données suffisamment fournies. Ces mesures, uniquement de grandeurs macroscopiques, ne nous permettent pas de valider la pertinence du modèle, mais sont néanmoins cohérentes avec le modèle envisagé, qui est donc parfaitement raisonnable.

Enfin, des équations de type Boltzmann pouvant modéliser des plasmas spatiaux ont été étudiées <sup>[PD99]</sup>. Nous nous sommes aussi intéressés à des régimes de diffusion assez généraux qui pourraient avoir des applications dans ce cadre [20, 12, 14].

## 6.2 Mécanique des fluides et problèmes connexes

### 6.2.1 Interaction fluide compressible-structure

**Mots clés** : algorithme de couplage, interaction fluide-structure, fluide compressible,

---

[PD99] F. P. E. C. S. PIERRE DEGOND, JOSE LUIS LOPEZ, « Existence of solutions of a kinetic equation modelling cometary flows », *J. Statist. Phys.* 96, 1-2, 1999, p. 361–376.

maillage dynamique, volume fini, schéma d'ordre élevé.

**Participants** : Serge Piperno, Charbel Farhat (Université du Colorado, Boulder (US)).

La mise au point d'algorithmes de couplage pour la simulation numérique de phénomènes d'interaction entre un fluide compressible et une structure dans un cadre ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) tridimensionnel a été poursuivie [24, 23]. En collaboration avec Charbel Farhat, nous avons continué à appliquer la méthode d'évaluation quantitative de schémas de couplage de type décalé, pour construire de nouveaux algorithmes, toujours de type décalé, mais avec un décalage permettant un traitement simultané des sous-systèmes (parallélisme inter-modèle), contrairement à ce que nous avons fait par le passé. La méthode se révèle alors imprécise, ce qui remet en jeu sa pertinence. Nous devons revenir maintenant à un modèle simple, linéaire mais complet pour comprendre ce phénomène.

### 6.2.2 Simulations numériques d'effets du vent sur des structures souples

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

**Participants** : Serge Piperno, Dominique Chapelle (Macs), Frédéric Bourquin (LCPC), Xavier Amandolèse (LCPC), Olivier Flamand (CSTB).

Pour la simulation numérique de l'effet du vent sur les constructions souples du génie civil, le code NS3IFS (cf. 5.3) pour la simulation d'interactions fluide incompressible-structure a peu évolué. Rappelons que ce code avait été validé sur plusieurs types d'expériences classiques en soufflerie expérimentale (reproduction des caractéristiques aéroélastiques de profils de pont rectangulaires en mouvement forcé, simulation du mouvement libre dans un vent permanent). Cependant, la reproduction de profils de pression semblait beaucoup plus difficile que la restitution de grandeurs intégrales (traînée, portance, moment) [15].

Dans le cadre d'un thème de recherche LCPC, portant sur l'effet du vent sur les ouvrages d'art, nous avons donc choisi de revenir à la validation du code, notamment pour les profils de pression, en essayant de reproduire le plus fidèlement possible certains résultats expérimentaux obtenus en soufflerie au CSTB. Les outils élémentaires (développés l'année dernière) pour décoder des résultats bruts de soufflerie expérimentale et pour visualiser des grandeurs importantes (comme la pression, l'énergie cinétique turbulente, etc...) le long du profil nous ont permis de constater que le code actuel ne permettait pas de reproduire correctement les résultats du CSTB, même en réactivant un modèle de turbulence plus poussé.

Il se trouve que, parallèlement, Xavier Amandolèse (en thèse au LCPC) a décortiqué les résultats expérimentaux du CSTB, pour aboutir à la conclusion que ceux-ci sont extrêmement "retravaillés" (filtrés, bruités, déphasés), ce qui les rend peu cohérents et difficilement comparables à des résultats numériques. Pour la dernière année du thème de recherche LCPC, nous sommes donc revenus un peu en arrière, et nous allons chercher à redéfinir des expériences simples avec le CSTB, éventuellement repartir à la recherche d'autres résultats expérimentaux, et conclure sur la capacité des codes existants de répondre aux besoins des utilisateurs potentiels.

### 6.2.3 Prototype de plate-forme de couplage

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

**Participants** : Serge Piperno, Marina Vidrascu (Macs), Dominique Chapelle (Macs).

Le code NS3IFS (cf. 5.3) pour la simulation d'interactions fluide-structure, a très légèrement évolué. Rappelons que ce code est capable de simuler une interaction entre une structure simple et un fluide de trois manières différentes : de manière séquentielle (un seul process), de manière pseudo-parallèle (plusieurs process avec échanges de données par fichier) et de manière parallèle (sous PVM) sous les directives d'un coupleur. Nous avons harmonisé le <sup>[Bec]</sup> disponible avec le formalisme souhaité notamment par les autres projets de l'ancienne ARC.

Nous souhaitons maintenant avancer bien plus vite sur les domaines d'applications visés. Gilles Fourestey (en génie civil) et Stéphane Lanteri vont s'impliquer plus fortement dans des développements autour de NS3IFS.

### 6.2.4 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, sous-domaine, parallélisme, complément de Schur dual.

**Participants** : Gilles Fourestey, Serge Piperno, Cédric Mouret (ONERA), François-Xavier Roux (ONERA).

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 <sup>[PM92]</sup>, nous avons proposé un nouveau schéma globalement d'ordre deux en temps (schéma global implicite et méthode des caractéristiques), y compris lorsqu'on se place dans un maillage mobile (formulation ALE). Nous avons mené des comparaisons numériques entre les méthodes sur un code développé entièrement, et nous espérons les inclure dans un avenir proche au code NS3IFS.

Parallèlement, l'étude sur la résolution parallèle par sous-domaines (approche FETI) du problème de Stokes se poursuit à l'ONERA. À terme, nous espérons accélérer considérablement les simulations d'écoulements incompressibles visqueux tridimensionnels en général, et d'interactions fluide-structure en particulier.

### 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

---

[Bec] R. BECKER, « COUPLEUR », <http://www-sop.inria.fr/caiman/AIIFS/perspectives.html>.

[PM92] 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.

implicite/explicite, monotonie, schéma TVD.

**Participants** : Maud Mériaux-Poret, Serge Piperno.

Nous avons démarré une étude sur des méthodes en volumes finis sur maillages mobiles à topologie non constante. Dans le cadre des simulations numériques d'interactions entre un fluide compressible et une structure (volumes finis conservatifs), nous avons pour l'instant considéré uniquement des méthodes à topologie constante. D'autre part, une recherche importante menée dans plusieurs projets et conjointement à l'université du Colorado à Boulder a porté sur la conservation géométrique des méthodes en maillage mobile. Nous souhaitons donc faire une avancée sur ces questions.

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?

Dans une étude préliminaire, nous avons prouvé que les propriétés habituelles des schémas en volumes finis décentrés du premier ordre (principe du maximum, décroissance de la variation totale et de l'énergie  $L^2$ ) pouvaient être conservées pour des maillages mobiles à topologie non constante, sur diverses équations hyperboliques scalaires en une dimension d'espace (advection linéaire, équation de Burgers). Les méthodes que nous avons considérées sont conservatives et localement implicites, afin de traiter efficacement les zones de maillage raffiné.

Par la suite, nous devons nous concentrer sur le raffinement "à la volée" proprement dit (critères éventuellement instationnaires) et sur l'adaptation de ces concepts en deux puis trois dimensions d'espace, dans des cas stationnaires et instationnaires.

### 6.2.6 Méthodes de résolution des équations de Navier-Stokes pour des gaz non polytropiques

**Mots clés** : équation de Navier-Stokes, gaz réel, méthode de relaxation.

**Participants** : Emmanuel Bongiovanni, Nathalie Glinsky-Olivier, Alexandre Ern (CERMICS-ENPC).

De nombreux problèmes industriels, notamment la combustion dans un réacteur à dépôt chimique, concernent des écoulements à haute température pour lesquels le gaz ne peut être considéré comme polytropique (la relation entre l'énergie interne et la température n'est plus linéaire mais donnée par une loi polynomiale ou parfois seulement par des tables).

Nous nous étions précédemment intéressés à l'implémentation de la méthode de relaxation d'énergie proposée par Coquel et Perthame [CP98] et appliquée aux schémas WENO par Montarnal et Shu [MS99] pour résoudre les équations d'Euler dans le cas d'un gaz réel. Rappelons que cette méthode consiste à décomposer l'énergie interne en une partie vérifiant une loi polytropique pour laquelle un solveur classique peut être utilisé et une partie résiduelle vérifiant

---

[CP98] F. COQUEL, B. PERTHAME, «Relaxation of energy and approximate Riemann solvers for general pressure laws in fluid dynamics», *SIAM Journal of Numerical Analysis* 35, 1998, p. 2223–2249.

[MS99] P. MONTARNAL, C. SHU, «Real gas computation using an energy relaxation method and high-order WENO schemes», *Journal of Computational Physics* 148, 1999, p. 59–80.



une équation de convection.

Les bons résultats obtenus par cette méthode nous conduisent naturellement à envisager son extension au cas des équations de Navier-Stokes dans le cas d'un gaz non polytropique. L'idée est de décomposer l'énergie interne comme dans le cas des équations d'Euler, mais, à présent, la relaxation ne concerne plus seulement le terme de pression mais également le gradient de température, l'énergie interne étant une fonction non-linéaire de la température.

Nos efforts ont porté sur une justification de cette méthode d'un point de vue mathématique. Des résultats préliminaires ont montré la faisabilité de la méthode et les mêmes conditions sous-caractéristiques que dans le cas des équations d'Euler sont des conditions suffisantes à l'obtention de solutions physiques du problème. Parallèlement, une implémentation de l'algorithme est en cours.

### 6.2.7 Combustion dans un réacteur à dépôt chimique

**Participants :** Emmanuel Bongiovanni, Nathalie Glinsky-Olivier, Alexandre Ern (CERMICS-ENPC).

**Mots clés :** combustion, volume fini, élément fini, maillage non-structuré, petit nombre de Mach.

On souhaite simuler numériquement un réacteur de dépôt chimique. Cette technique, 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 au sein du réacteur, l'écoulement tridimensionnel de type convection mixte et la cinétique chimique.

Le modèle physique a été développé et validé par Alexandre Ern sur des géométries simplifiées utilisant une méthode aux différences finies. Afin de simuler de tels phénomènes dans des géométries réelles de réacteurs, on utilise un solveur des équations de Navier-Stokes pour un gaz réel basé sur la méthode mixte volumes finis/éléments finis pour des maillages triangulaires non-structurés.

On s'intéresse actuellement à un problème simplifié d'écoulement dans un tube dont une partie de la paroi inférieure est chauffée. Cet écoulement est à très petit nombre de Mach et les effets de convection sont dominants. Le schéma explicite est très peu efficace dans ce cas et nous envisageons d'étendre au cas d'un gaz réel la méthode de relaxation de Roe-Turkel développée par Cécile Viozat <sup>[Vio98]</sup> pour les écoulements de gaz parfaits à petit nombre de Mach.

Dans le cadre de ces travaux, un premier contact a été établi avec le CNRS-CRHEA (Centre de Recherche sur l'Hétéro-Epitaxie et ses Applications) à Sophia Antipolis où sont réalisées des expériences et des mesures.

---

[Vio98] C. VIOZAT, *Calcul d'écoulements stationnaires et instationnaires à petit nombre de Mach et en maillages étirés*, Thèse en mathématiques appliquées, université de Nice - Sophia Antipolis, octobre 1998.

### 6.3 Interfaçage de programmes

**Mots clés** : programmation objet, interfaçage de programmes.

**Participants** : Emmanuel Briand, Robert Rivière, Loula Fezoui.

Nous avons terminé la première phase d'étude et de développement d'une librairie de classes C++ destinées à définir une représentation standard des données utilisées par les codes de calcul développés au sein du projet, aujourd'hui en très grande majorité Fortran. L'objectif était d'aboutir à un ensemble de classes de "fondation", relatives à la problématique des éléments finis/volumes finis, capables d'être interfacées le plus simplement possible avec les programmes Fortran existants, et de servir de support à de nouveaux modules ou codes programmés en C++.

Dans l'état actuel du projet, COSI (Caiman Object Solver Interface) fournit aux concepteurs de solveurs en maillage non-structuré un environnement de programmation C++/Fortran (API: Application Programming Interface) et une interface graphique d'utilisation (GUI: Graphical User Interface). L'API est constituée de classes de maillages non-structurés 2D et 3D, et de classes de base pour les solveurs. Le concepteur d'un nouveau solveur a pour tâche d'implémenter certaines méthodes du solveur de base et éventuellement d'étendre une classe de maillage à ses besoins particuliers. Le GUI permet de piloter l'exécution du solveur sur une machine locale ou distante, et de visualiser l'évolution de ses variables internes.

Outre sa grande capacité à traiter des types différents de solveurs, ce schéma permet de fournir une interface standard vers les solveurs et de diminuer grandement le travail de maintenance. Dans la plupart des cas, les calculs lourds sont effectués en Fortran à partir des sous-routines des solveurs initiaux (les classes C++ n'investissent pas les structures de données les plus fines comme dans d'autres projets intégralement objet <sup>[BM99]</sup>). Il n'y a donc pas de dégradation des performances et le travail d'intégration des solveurs est relativement simple. Le prix à payer pour ces deux avantages est que la structure objet des classes de maillage n'est pas intégralement respectée dans la mesure où les données internes de la structure sont accessibles directement depuis l'extérieur.

Trois solveurs sont donnés comme exemples : un solveur des équations d'Euler en deux dimensions, centré nœud, et deux solveurs des équations de Maxwell en trois dimensions (centré nœud et centré élément). L'avenir immédiat de ce projet est d'y intégrer les solveurs en cours de développement dans l'équipe et de tester son adaptabilité et sa facilité d'utilisation. Une évolution à plus long terme serait de donner la possibilité de traiter des maillages mobiles, à topologie variable ou non.

## 7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

### 7.1 Conseil scientifique pour Alcatel Space Industries

**Mots clés** : environnement des satellites, équation de Poisson, équation d'Euler,

---

[BM99] E. BERTOLAZZI, G. MANZINI, «P2MESH : a collection of generic classes for PDE solvers on unstructured 2-D grids», 1999, <http://dragon.ian.pv.cnr.it/~marco/p2mesh.ps.gz>.

ionisation, décharge sous vide, désorption, plasma.

**Participants** : Serge Piperno, Loula Fezoui, Frédéric Poupaud, Thierry Goudon, Olivier Chanrion.

Le projet a une activité de conseil scientifique vis-à-vis d'Alcatel Space Industries sur les sujets liés à l'environnement électrostatique et plasmique des satellites, aux questions de vibro-acoustique, aux problèmes de choix de modélisation (fluide continu, raréfié, équation de Boltzmann, etc...) et plus généralement sur toutes les applications du calcul scientifique de notre domaine de compétences. Notre conseil porte aussi sur le choix des méthodes numériques envisageables et des logiciels disponibles ou à développer, indépendamment ou en collaboration avec l'équipe (cf. 6.1).

## 8 Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1 Actions nationales

#### 8.1.1 Simulation numérique d'effets du vent en génie civil

**Participants** : Serge Piperno, Gilles Fourestey, Dominique Chapelle (Macs), Frédéric Bourquin (LCPC), Xavier Amandolèse (LCPC), Olivier Flamand (CSTB).

Le groupe de travail INRIA sur l'interaction fluide-structure a continué à se réunir 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).

Plus précisément, nous cherchons à retrouver numériquement les résultats expérimentaux obtenus en soufflerie autour de profils de pont (en statique ou en mouvement libre ou forcé), notamment les grandeurs intégrées ou les profils de pression. Le CSTB apporte les résultats expérimentaux. Enfin, le LCPC est intéressé par un couplage entre le code NS3IFS et un code de structure utilisant un modèle plus simple que les coques, pour l'appliquer aux structures du génie civil.

#### 8.1.2 Biomécanique numérique des fluides

**Participants** : Stéphane Lanteri, Serge Piperno, Marc Thiriet (projet M3N et LAN université Paris 6).

Le groupe de travail "Biomécanique Numérique des Fluides" – BNF<sup>1</sup> 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 d'Analyse Numérique (LAN de l'université Pierre et Marie Curie (Paris 6), et du Département de Mathématiques et Applications de l'ENS Ulm.

---

1. <http://www-rocq.inria.fr/Marc.Thiriet/BMNFgp/>

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 maillages 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 fonderons 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.

L'année 2000 a avant tout été consacrée à la constitution du groupe BNF ainsi qu'à la recherche de collaborations avec la communauté médicale et avec des équipes connaissant cette communauté, par exemple de l'INSERM, de façon à mieux définir les besoins des utilisateurs et les objectifs du groupe.

### 8.1.3 Environnement plasmique des satellites

**Participant** : Olivier Chanrion.

Dans le but de valider le futur modèle d'expansion de jet, nous avons réalisé une campagne de mesures au Laboratoire de Physique des Milieux Ionisés de l'école Polytechnique sur un propulseur de type SPT-50. Ces mesures, uniquement de grandeurs macroscopiques, ne nous permettent pas de valider la pertinence du modèle, mais sont néanmoins cohérentes avec le modèle envisagé.

## 8.2 Actions internationales

### 8.2.1 Méthodes non conformes et décomposition de domaines

**Participants** : Serge Piperno, Ulrich Hetmaniuk (Université du Colorado, Boulder (US)), Victorita Dolean.

Le projet participe au Programme International de Coopération Scientifique sur les méthodes non conformes et la décomposition de domaines (partenaires US : Charbel Farhat (Université du Colorado à Boulder), Ian Mandel (Université du Colorado à Denver) et Olof Widlund (Courant Institute of Mathematical Science) ; partenaire CNRS : Yvon Maday (ASCI et CNRS)). Nous gérons le volet INRIA/NSF de cette collaboration tripartite, intitulé « Décomposition de Domaine et Parallélisation en Calcul Scientifique » (partenaires INRIA : Alain Dervieux (Sinus), Marina Vidrascu et Patrick Le Tallec (Macs)).

## 9 Diffusion de résultats

### 9.1 Animation de la Communauté scientifique

#### 9.1.1 Journées Nice-Toulon-Marseille

Le projet a pris en route le déroulement des journées Nice-Toulon-Marseille, dont le but est d'animer la communauté scientifique locale de la région. Ces journées permettent de partager nos intérêts pour des thèmes scientifiques ciblés, en faisant intervenir des grands noms pour des exposés plus pédagogiques et des chercheurs locaux pour faire le point sur leurs recherches. Grâce à un financement COLOR de l'Unité de Recherche de Sophia Antipolis, nous avons financé et co-organisé (avec Thierry Goudon et Stéphanie Lohrengel du Laboratoire Jean-Alexandre Dieudonné) les troisièmes rencontres sur le thème de l'électromagnétisme.

#### 9.1.2 GdR Sparch

Le projet fait partie du Groupe de Recherche Sparch (Simulation de particules chargées).

### 9.2 Enseignement

- *Initiation à la simulation numérique d'écoulements compressibles*, Serge Piperno, Nathalie Glinsky-Olivier, Semaine européenne, ENPC (30 heures)
- *Équations intégrales*, Serge Piperno, Mastère de Mécanique Numérique, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (6 heures).
- *Interactions fluide-structure*, Serge Piperno, Mastère de Mécanique Numérique, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (6 heures).
- *Électromagnétisme*, Serge Piperno, Malika Remaki, Mastère de Mécanique Numérique, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (6 heures).

### 9.3 Thèses

– **Thèses en cours :**

1. Emmanuel Bongiovanni, Méthodes numériques pour les écoulements de gaz parfaits non polytropiques. Application à l'épitaxie, ENPC
2. Nicolas Canouet, Schémas multi-échelles pour la résolution numérique des équations de Maxwell, ENPC (bourse CIFRE FT R&D)
3. Olivier Chanrion, Modélisation des effets de la propulsion électrique sur la charge électrostatique d'un satellite, ENPC (bourse CIFRE ASPI)
4. Victorita Dolean, Algorithmes par décomposition de domaine et accélération multigrille pour le calcul d'écoulements compressibles, UNSA
5. Gilles Fourestey, Simulations numériques de couplages aéroélastiques « écoulement incompressible - structure souple ». Applications aux ouvrages d'art, ENPC

6. 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
7. Guillaume Sylvand, Méthodes numériques rapides pour la résolution des équations intégrales en électromagnétisme, ENPC

#### 9.4 Habilitation

– **Habilitation soutenue dans le projet :**

1. Serge Piperno, Contribution à l'étude mathématique et à la simulation numérique de phénomènes d'interaction fluide-structure, mai, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6

#### 9.5 Stages, post-doctorats, ingénieurs-experts

- Maud Mériaux-Poret, Méthodes en maillages mobiles à topologie non constante pour des systèmes hyperboliques en une dimension d'espace, stage de DEA d'Analyse Numérique, université de Valenciennes.
- Emmanuel Briand, en séjour post-doctoral jusqu'au 1/11, a développé une librairie de classes C++ pour l'interfaçage de programmes.

#### 9.6 Participation à des colloques, séminaires, invitations

- Co-organisation par Serge Piperno du colloque «NTM3 - Électromagnétisme» à l'INRIA Sophia Antipolis, les 6 et 7 octobre, dans le cadre d'une COLOR de l'UR de Sophia Antipolis.
- Conférence invitée de Serge Piperno (avec Charbel Farhat) au V Congresso Nazionale della SIMAI, Ischia Porto, Italie, 5-9 juin.
- Conférence invitée de Serge Piperno au Colloque "Le risque et le Génie Civil", ENPC, Champs-sur-Marne, 16 mars.
- Séminaire de Serge Piperno sur les "Interactions fluide-structure" au laboratoire Dieudonné à l'UNSA.
- Séminaire de Serge Piperno sur les "Méthodes de volumes finis pour l'électromagnétisme" au laboratoire Dieudonné à l'UNSA.
- Séminaire de Serge Piperno sur les "Interactions fluide-structure" à l'IMFT.

## 10 Bibliographie

### Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] F. BONNET, J.-P. CIONI, L. FEZOUI, F. POUPAUD, «FVTD schemes using conformal hybrid meshes and a PML medium technique», *in : ACES 97 Symposium*, Monterey, Californie, 1997.
- [2] L. FEZOUI, B. STOUFFLET, «A class of implicit upwind schemes for Euler simulations with unstructured meshes», *Journal of Computational Physics* 84, 1989, p. 174–206.
- [3] C. HAFNER, R. BALLISTI, «The multiple multipole method (MMP)», *COMPEL- The International Journal for Computation and Mathematics in Electric and Electronic Engineering* 2, 1983, p. 1–7.
- [4] A. HARTEN, P. D. LAX, B. VAN LEER, «On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws», *SIAM Review* 25, 1, 1983, p. 36–61.
- [5] B. KOOBUS, C. FARHAT, «Second-Order Time-Accurate and Geometrically Conservative Implicit Schemes for Flow Computations on Unstructured Dynamic Meshes», *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 170, 1999, p. 103–130.
- [6] S. PIPERNO, C. FARHAT, B. LARROUTUROU, «Partitioned procedures for the transient solution of coupled aeroelastic problems», *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 124, 1-2, 1995, p. 79–112.
- [7] K. S. YEE, «Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media», *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-16, 1966, p. 302–307.

### Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [8] S. PIPERNO, *Contribution à l'étude mathématique et à la simulation numérique de phénomènes d'interaction fluide-structure*, Habilitation à diriger des recherches, mathématiques appliquées et applications des mathématiques, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, France, 31 mai 2000.

### Articles et chapitres de livre

- [9] M. BOSTAN, F. POUPAUD, «Periodic solutions of the Vlasov Poisson system with boundary conditions», *Math. Models Methods Appl. Sci.* 10, 5, 2000, p. 651–672.
- [10] M. BOSTAN, F. POUPAUD, «Time periodic solution for the Vlasov-Maxwell system in 1D», *Math. Methods Appl. Sci.*, 23, 2000, p. 1195–1221.
- [11] A. DE LA BOURDONNAYE, «High Order Scheme for a Non Linear Maxwell System Modelling Kerr Effect», *Journal of Computational Physics* 160, 2, 2000, p. 500–521.
- [12] P. DEGOND, T. GOUDON, F. POUPAUD, «Diffusion Limit for Non Homogeneous and Non-Micro-Reversible Processes», *Indiana Univ. Math. J.*, 2000, à paraître.
- [13] C. FARHAT, A. MACEDO, M. LESOINNE, F. X. ROUX, F. MAGOULÈS, A. DE LA BOURDONNAYE, «Two-level Domain Decomposition Methods with Lagrange Multipliers for the Fast Iterative Solution of Acoustic Scattering Problems», *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 184, 2000, p. 213–240.

- [14] T. GOUDON, F. POUPAUD, «Approximation by homogenization and diffusion of kinetic equations», *Comm. Partial Differential Equations*, 2000, à paraître.
- [15] S. PIPERNO, P.-E. BOURNET, «Numerical simulations of wind effects on flexible civil engineering structures», *Revue Européenne des Eléments Finis* 8, 5-6, 1999, p. 659–687.
- [16] S. PIPERNO, C. FARHAT, «Design of efficient partitioned procedures for the transient solution of aeroelastic problems», *Revue Européenne des Eléments Finis*, 2000, à paraître.
- [17] S. PIPERNO, C. FARHAT, «Partitioned Procedures for the Transient Solution of Coupled Aeroelastic Problems - Part II: Energy Transfer Analysis and Three-Dimensional Applications», *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, à paraître.
- [18] 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», *RAIRO Modél. Math. Anal. Numér.* 34, 1, 2000, p. 139–158.
- [19] F. POUPAUD, M. REMAKI, «Existence et unicité des solutions du système de Maxwell pour des milieux hétérogènes non réguliers», *Note aux C.R.A.S. t. 330 Série I*, 2000, p. 99–103.
- [20] F. POUPAUD, J. SOLER, «Parabolic Limit and Stability of the Vlasov-Poisson-Fokker-Planck System», *Math. Models Methods Appl. Sci.* 10, 7, 2000, p. 1027–1045.
- [21] M. REMAKI, F. POUPAUD, L. FEZOUI, O. CHANRION, «Couplage de modèles et de méthodes numériques pour l'électromagnétisme en domaine temporel», *Revue Européenne des Eléments Finis* 8, 5-6, 1999, p. 639–658.
- [22] M. REMAKI, «A New Finite Volume Scheme for Solving Maxwell's System», *COMPEL- The International Journal for Computation and Mathematics in Electric and Electronic Engineering* 19, 3, 2000, p. 913–931.

### Communications à des congrès, colloques, etc.

- [23] S. PIPERNO, C. FARHAT, «Energy-based analysis of partitioned procedures for transient nonlinear aeroelastic problems», *in: V Congresso Nazionale della SIMAI*, Ischia Porto, Italie, 5-9 juin 2000.
- [24] S. PIPERNO, C. FARHAT, «Energy Based Design and Analysis of Staggered Solvers for Nonlinear Transient Aeroelastic Problems», *in: 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM*, Atlanta, Georgie, 3-6 avril 2000. AIAA paper 2000-1447.
- [25] S. PIPERNO, «Effets du vent sur les constructions souples du Génie Civil», *in: Colloque "Le risque et le Génie Civil"*, ENPC, Champs-sur-Marne, France, 16 mars 2000.
- [26] M. REMAKI, L. FEZOUI, S. PIPERNO, E. DUCEAU, «A Centered Finite Volume Scheme for Solving Maxwell's Equations in Heterogeneous Media», *in: Fifth International Conference on Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation*, Santiago de Compostella, Espagne, 10-14 juillet 2000.



---

## Rapports de recherche et publications internes

- [27] P.-E. BOURNET, « Validation du code NS3IFS et comparaison avec des données expérimentales pour des écoulements autour de tabliers de ponts », *rapport de recherche n° RR-3875*, INRIA, 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3875.html>.
- [28] E. BRIAND, « Manuel d'Utilisation de COSI 0.1 », *Rapport Technique n° RT-0245*, INRIA, 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rt-0245.html>.
- [29] M. MÉRIAUX, S. PIPERNO, « Méthodes de volumes finis en maillages variables pour des équations hyperboliques en une dimension », *rapport de recherche n° RR-4042*, INRIA, 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4042.html>.

## Divers

- [30] O. CHANRION, « Caractérisation expérimentale d'un jet de plasma d'un propulseur à effet Hall de type SPT-50 », Rapport interne Alcatel Space Industries, 2000.
- [31] F. POUPAUD, L. FEZOU, S. PIPERNO, « Rapport sur le programme JET », Rapport de Contrat INRIA-Alcatel Space Industries, 2000.