

LRC M 06  
"Mathématiques pour l'Industrie et la Physique"

Rapport d'activité pour l'Année 2003  
et  
Perspectives pour l'Année 2004

## 1. Présentation générale

La création du Laboratoire de Recherche Correspondant du CEA date de janvier 2002. L'année 2003 correspond donc à la deuxième année d'activité du LRC. Le nombre de chercheurs permanents impliqués côté MIP a augmenté par l'émergence d'un nouveau thème, la mécanique de la rupture (voir noms et grades en annexe 1).

Les thèmes de recherche recensés dans le programme de recherches défini pour l'année 2003 étaient les suivants :

1. Electromagnétisme et calculs de SER
2. Optique non linéaire : équations de Maxwell-Bloch
3. Simulation de plasmas atmosphériques
4. Modèles hybrides et équation de Fokker-Planck

A ces 4 thèmes s'est rajouté en cours d'année un cinquième thème :

5. Mécanique de la rupture

A côté des actions de recherche spécifiques effectuées dans chacun des thèmes listés ci-dessus, le LRC a organisé un certain nombre d'activités générales, en particulier dans le domaine de l'animation scientifique.

Dans le document ci-dessous, nous détaillons le bilan des activités du LRC durant l'année 2003 dans chacun de ces domaines puis nous traçons les perspectives pour l'année 2004.

## 2. Bilan des activités de l'année 2003

### 2.1. Activités générales

La liste des actions générales du LRC en 2003 est donnée ci-dessous :

- Organisation du LRC (organisation du secrétariat, mise à disposition d'un ingénieur informatique, de locaux, de postes de travail), gestion et organisation des différentes équipes et projets.
- Organisation de la journée scientifique annuelle du LRC (le 16 mai 2003). Le programme de cette journée figure à l'annexe 2.
- Organisation du groupe de travail hebdomadaire de l'équipe MIP du LRC.
- Maintenance du serveur WEB du LRC. Celui-ci est accessible depuis le serveur du Laboratoire MIP : <http://mip.ups-tlse.fr>, cliquer sur 'LRC'.
- Réalisation d'une série de prépublications du LRC. La liste des prépublications du LRC mises en ligne sur le serveur WEB du LRC est fournie dans l'annexe 3.
- Participation à des journées de synthèse et de bilan relatives aux différentes activités du LRC.

### 2.2. Activités thématiques

- 2.2.1. Electromagnétisme, Calculs de SER : participants : X. Antoine, A. Bendali (MIP), N. Balin (doctorante, financement bourse CIFRE ANRT-MBDA), M. Darbas (doctorante, financement MENRS), participation : Y. Boubendir (anciennement Doctorant MIP, actuellement Post-Doc à Paris 13), K. Lemrabet (sur un support de 3 mois comme Professeur invité INSA), N. Zerbib (doctorant CERFACS, financement CERFACS-CNES).

Les activités de ce thème restent orientées, de façon principale, vers le développement de méthodes efficaces pour le calcul de SER par équations intégrales dans des situations induisant une explosion de la taille du système final à résoudre. Une part de l'activité a été aussi dédiée au développement de modèles par condition d'impédance de surface de diffraction par une surface rugueuse ou revêtue d'une couche mince. Les résultats obtenus ont été les suivants.

- Extension des techniques de résolution par méthode frontale de type éléments finis à celle par équations intégrales pour le traitement de la diffraction par une cavité profonde. Le traitement par équations intégrales permet de supprimer les phénomènes de dispersion des schémas éléments finis (A. Bendali, F. Collino & N. Balin). Ce travail a fait l'objet d'une communication à un congrès (Balin, Bendali & Collino, Domain Decomposition Methods - Berlin, Allemagne (2003)). Un article est en cours de rédaction.
- Extension des méthodes de décomposition de Schwarz aux résolutions par équations intégrales et application au couplage de méthodes exactes par équations intégrales et méthodes asymptotiques (A. Bendali, F. Collino & N. Balin). Présentation des premiers résultats dans le cadre d'une conférence invitée au Workshop « couplage asymptotique-exact » à KTH - Stockholm, Suède (2003) par N. Balin.
- Construction de préconditionneurs analytiques pour les équations intégrales permettant de réduire considérablement le nombre d'itérations pour la résolution du système final à résoudre ; en particulier, développement de formulations de type CFIE dans le cas de l'acoustique 3D dont la résolution par une méthode de Krylov est effectuée en un nombre d'itérations indépendant de la taille du problème (X. Antoine, M. Darbas). Articles soumis [AD1] [ADL] et acte de congrès avec comité de sélection [A1] [AD2].

- Traitement des nœuds partagés par plus de deux domaines dans une méthode de décomposition de domaine sans recouvrement (A. Bendali, Y. Boubendir) (note au CRAS en cours de révision et article en cours de rédaction).
- Condition d'ordre 2 d'homogénéisation pour la diffraction par une surface rugueuse faisant intervenir une prise en compte de couche limite avec estimation d'erreur et validation numérique (A. Bendali, P. Borderies, J.-R. Poirier) (articles théorique et d'expérimentation numérique en préparation, conférence invitée au workshop *Multiscale Methods in Science and Engineering*, Université d'Uppsala Suède (janvier 2004) <http://www.it.uu.se/conf/multiscale04/>).
- Conditions d'impédance robustes d'ordre 2 pour la diffraction par une couche mince diélectrique recouvrant un conducteur parfait étendant à la dimension 3 les études prospectives en dimension 2 (article [BB]) (A. Bendali, K. Lemrabet). Deux articles sont en préparation.

2.2.2. Optique non-linéaire, équations de Maxwell-Bloch : participants : C. Besse, P. Degond (MIP), A. Bourgeade (CESTA), O. Saut (doctorant, financement CEA, thèse commencée en septembre 2000, soutenue en Décembre 2003), participation de B. Bidégaray, anciennement MIP, maintenant au LMC à Grenoble.

Ce thème s'intéresse à la modélisation de la propagation d'un faisceau laser dans un cristal de KDP. La modélisation s'effectue au niveau microscopique par le biais des équations de Maxwell-Bloch (équations décrivant le milieu de propagation à l'aide d'un modèle quantique). Dans un travail réalisé en 2001, nous avons proposé une forme des équations de Bloch permettant de prendre en compte les symétries discrètes du cristal de KDP (alors que la plupart des modèles proposés dans la littérature traitent d'un milieu de propagation isotrope). La prise en compte de ces symétries est en effet essentielle pour un rendu correct de l'interaction de l'onde avec le milieu. La méthode de discrétisation numérique de ce modèle a été établie en 2002. Un code unidimensionnel en espace a été écrit, validé, et exploité dans divers cas d'intérêt physique [Sa1].

L'année 2003 a été consacrée tout d'abord au développement d'un code bidimensionnel en espace. Ce développement a été mené à bien et le code a été testé avec succès sur plusieurs cas tests d'intérêt physique. Une parallélisation partielle du code a été effectuée afin d'en optimiser les performances. Par ailleurs, dans le cadre unidimensionnel, des comparaisons ont été réalisées entre le modèle de Maxwell-Bloch et des modèles macroscopiques plus simples, comme le modèle Maxwell dispersif issu des travaux de A. Bourgeade et E. Freisz. Ces comparaisons ont montré la supériorité du modèle de Maxwell-Bloch pour décrire des phénomènes non-linéaires fins comme les effets de saturation non-linéaire. Cette précision accrue s'obtient toutefois au prix d'un coût calcul beaucoup plus élevé. Des stratégies hybrides (microscopiques-macroscopiques) devraient permettre de s'affranchir de ces problèmes de coût mais n'ont pas été explorées pour l'instant. Par ailleurs, l'année 2003 se conclut par la soutenance avec succès de la thèse du doctorant impliqué dans ce programme : Olivier Saut. L'ensemble de ces réalisations a été détaillé dans le rapport [BDS] et dans la thèse de O. Saut [Sa2].

2.2.3. Simulation de plasmas atmosphériques : participants : C. Besse, F. Deluzet, P. Degond (MIP), J. Claudel, G. Gallice et Ch. Tessieras (CESTA).

L'objet de ce thème est l'étude de l'évolution de perturbations du plasma ionosphérique (à des altitudes comprises entre 200 et 1000 km) sous l'action des instabilités de dérive en ExB. Cette instabilité contribue à strier le plasma et à développer des échelles de plus en plus petites, ce qui constitue un problème majeur pour la simulation numérique. Le modèle de base pour étudier ce phénomène est le 'modèle striations'. Il s'agit d'un modèle de transport dans un plan perpendiculaire à la direction du champ magnétique terrestre local. L'établissement de ce modèle à partir de modèles plus fondamentaux a été justifié dans un travail antérieur (en 2000). Nous avons également proposé en 2000, 2001 et 2002 de modéliser et simuler numériquement l'influence des petites échelles par le

biais d'un modèle de turbulence consistant à rajouter un terme de diffusion dans l'équation de transport du plasma.

En 2002, nous avons proposé une dérivation du modèle striations pour un champ magnétique non uniforme, ce qui correspond au cas du champ magnétique terrestre. Le modèle striations en champ magnétique non uniforme comprend une équation de transport tridimensionnelle pour la densité de plasma couplée à une équation elliptique bidimensionnelle pour le potentiel électrostatique. Les termes de couplage entre les deux équations font intervenir des intégrales de la densité de plasma le long de la troisième coordonnée, qui est l'abscisse curviligne le long d'une ligne de champ magnétique. L'ensemble du modèle est écrit dans un système de coordonnées curvilignes adapté au champ magnétique.

En 2003, la mise en œuvre numérique de ce modèle a été réalisée. A partir du code striations du CESTA, qui traite d'un champ magnétique uniforme et est écrit en géométrie cartésienne, des modifications adéquates ont été introduites afin de l'adapter à la nouvelle géométrie. Le code ainsi réalisé a été testé, tout d'abord en géométrie cartésienne, pour le valider par rapport à la précédente version du code, puis en géométrie de champ magnétique non uniforme. Des effets spécifiques de la courbure sont attendus lorsque le domaine considéré dépasse des tailles critiques de l'ordre du millier de km.

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction d'un rapport [BDD1]. Par ailleurs, un article [BCDDGT1] sur l'établissement du modèle a été accepté pour publication et un autre [BCDDGT2], qui traite des instabilités et de la modélisation de la turbulence, est en cours de rédaction. Par ailleurs, dans un travail réalisé pendant son stage de DEA, Raphaël Poncet a montré que le critère d'instabilité linéarisé du modèle striations entraîne l'instabilité non-linéaire du modèle complet. Ce travail est également en cours de rédaction [BDHP].

2.2.4. Modèles hybrides et équation de Fokker-Planck : participants : P. Degond, M. Lemou (MIP), B. Dubroca, G. Duffa, J. P. Morreau (CESTA), N. Crouseilles (doctorant, financement CEA, thèse commencée en septembre 2001).

L'objectif de cette collaboration est l'élaboration de modèles hybrides cinétiques-fluides pour résoudre l'équation de Fokker-Planck. L'idée est de traiter simultanément la distribution des particules énergétiques au niveau cinétique et la distribution des particules thermiques au niveau fluide. A cet effet, on procède par décomposition de domaine dans l'espace des vitesses. Une boule centrée sur la vitesse moyenne du fluide et de rayon égal à un multiple de la vitesse thermique est sélectionnée. A l'intérieur de cette boule, qui représente la distribution des particules thermiques, l'équation cinétique est remplacée par un système d'équations aux moments dont les flux sont calculés à l'aide d'un principe de minimisation d'entropie. A l'extérieur de cette boule, le modèle cinétique initial est supposé s'appliquer. Des conditions aux limites (pour le modèle cinétique) et des termes sources (pour le système aux moments) assurent le couplage entre les deux descriptions. Le modèle continu de même que sa discrétisation numérique basée sur une méthode de volumes finis garantissent la conservation exacte de la masse, quantité de mouvement et énergie de même que la décroissance de l'entropie. L'approche a été validée sur un modèle simplifié où l'opérateur de Fokker-Planck est remplacé par un opérateur de type BGK. Dans le courant de l'année 2002, l'écriture du modèle hybride continu et sa discrétisation numérique ont été effectuées. Le modèle a été implémenté dans un cadre unidimensionnel en espace et en vitesse à des fins de validation et de tests numériques.

En 2003, les premiers tests numériques ont été finalisés et se sont avérés très encourageants. Ils ont abouti à la rédaction de deux articles [CDL2], [CDL3]. Le modèle a ensuite été enrichi sur le plan physique. D'une part, la fréquence de collision dans l'opérateur de collision BGK a été rendue

dépendante de la vitesse, de façon à approcher au plus près la fréquence de collision de l'opérateur réel (opérateur de Fokker-Planck-Landau). D'autre part, l'influence du champ électrique a été prise en compte. Trois cas tests ont permis de valider les extensions apportées : d'une part, un cas test de choc sans champ électrique, d'autre part, un cas d'amortissement Landau et enfin, l'étude de la relation de dispersion des ondes acoustiques ioniques. Tous ces cas tests ont montré un comportement satisfaisant de la méthode. Par ailleurs, N. Crouseilles, en collaboration avec B. Dubroca et F. Filbet (Orléans) a entrepris des simulations numériques d'un modèle totalement cinétique comprenant la prise en compte des collisions électrons-électrons et électrons-ions par des opérateurs de Fokker-Planck-Landau. L'ensemble de ces développements est détaillé dans [CDL1].

### 2.2.5. Mécanique de la rupture

L'objectif de la collaboration est de modéliser correctement par éléments finis une fissure au sein d'un matériau ou à l'interface entre deux matériaux .

Pour capter la singularité du champ de contraintes en fond de fissure, les techniques actuelles d'éléments finis demandent de densifier énormément le maillage au voisinage du fond de fissure. L'étude de la propagation de la fissure oblige d'autre part à de nombreuses et fastidieuses opérations de remaillage qui introduisent des difficultés numériques parfois insurmontables en 3D. La méthode XFEM (*eXtended Finite Element Method*) a pour but de surmonter ces obstacles par une technique évoluée d'enrichissement des fonctions de forme dans les éléments finis là où le besoin s'en fait sentir. Basée sur un principe de partition de l'unité introduit par BABUSKA *et al* (1996), la méthode a été appliquée à la propagation de fissure dans une série de travaux parus à la suite d'un article de BELYTSCHKO *et al* (1999).

Le but de la collaboration était de programmer dans le code d'étude GETFEM, développé par MIP, la méthode XFEM et d'évaluer ses réels avantages pour les applications intéressant le CESTA.

La première étude (printemps 2003) a eu pour objet une synthèse des travaux existant sur XFEM, l'implémentation de la méthode dans GETFEM et les premières simulations. Le travail a été réalisé dans le cadre du stage de DEA Mathématiques Appliquées de Guillaume BATTIAIA (alors en fin d'étude d'ingénieur à INSA). Une deuxième étude (automne 2003) a permis de simuler des cas tests plus complexes, d'étudier numériquement de manière assez complète la précision de la méthode et d'élaborer une méthodologie numérique efficace. La publication scientifique des travaux fait partie des objectifs 2004.

Outre les personnes impliquées du côté MIP est également associé aux activités du groupe de travail XFEM : Michel SALAÜN (Maître-de- Conférences CNAM Paris, et ENSICA Toulouse). Les personnes concernées du côté CESTA sont : Jean-Pierre LAMBELIN, Bernard TOSON (DEV/SDET), Jean-Jacques PESQUE.

### 3. Perspectives pour l'année 2004

#### 3.1. Activités générales

Les activités 'générales' prévues dans le cadre du LRC en 2004 sont les suivantes :

- Organisation du LRC (organisation du secrétariat, mise à disposition d'un ingénieur informatique, de locaux, de postes de travail), gestion et organisation des différentes équipes et projets,
- Organisation d'une nouvelle journée scientifique MIP-CEA en 2004,
- Organisation d'un groupe de travail hebdomadaire de l'équipe MIP du LRC,
- Maintenance du serveur WEB,
- Continuation de la série de prépublications,
- Participation aux différentes réunions de synthèses et bilans relatives aux différentes activités du LRC,

#### 3.2. Activités thématiques

Outre les thèmes présents en 2003 :

1. Electromagnétisme et calculs de SER
2. Optique non linéaire : équations de Maxwell-Bloch
3. Simulation de plasmas atmosphériques
4. Modèles hybrides et équation de Fokker-Planck
5. Mécanique de la rupture

S'ajoutent deux nouveaux thèmes en 2004 :

6. Claquage de l'air par des faisceaux de micro-ondes
7. Matériaux composites

Nous développons maintenant les perspectives pour chacun d'entre eux.

- 3.2.1. Electromagnétisme, Calculs de SER : (mêmes participants qu'en 2003, participation de K. Lemrabet sur un support de professeur invité de trois à cinq mois et de N. Zerbib, doctorant sur un support CNES-CERFACS)

Nous prévoyons de poursuivre les études entreprises en 2003 essentiellement en direction des problèmes tridimensionnels. Nous envisageons aussi de développer un nouvel axe : le couplage de méthodes intégrales et éléments finis lorsque la partie éléments finis est une zone restreinte du domaine de résolution. La liste suivante donne de façon plus détaillée les études prévues en 2004.

- *Extension aux équations intégrales des méthodes de décomposition de domaine de type Schwarz additif.* Ces méthodes ont été validées en 2D. Elles permettent d'élaborer des procédures efficaces de réduction de taille via une résolution itérative, de coupler des méthodes ou des procédés de résolution différents (traitement par méthode frontale d'une cavité profonde et la prise en compte de l'extérieur, couplage de résolutions directe par équation intégrale et approchée par une méthode asymptotique pour une structure de grande taille, etc.) Ces méthodes sont basées sur la construction d'une partition de l'unité explicite pour la surface sur laquelle est posée l'équation intégrale. Cette partition de l'unité est

obtenue par une simple interpolation linéaire dans le cas bidimensionnel. En dimension 3 la situation est plus complexe car on peut avoir des zones recouvertes par plusieurs sous domaines. La construction de la partition est effectuée dans ce cas via la résolution d'une équation de Laplace-Beltrami sur la surface.

- *Préconditionneurs analytiques de type Calderon pour les équations intégrales relatives à la diffraction d'une onde électromagnétique par un conducteur parfait en dimension 3.* Les études entreprises ont permis d'abord dans le cas 2D et de l'acoustique en dimension 3 d'élaborer une procédure générale expliquant le bon conditionnement de la CFIE autrement que par la seule suppression des modes parasites. L'utilisation d'approximants de Padé de la racine carré sans coupure dans le demi-plan  $\Im m(z) \geq 0$  améliore sensiblement la méthode ensuite. On envisage d'étendre cette approche au système de Maxwell complet.
- *Techniques de type décomposition de domaine pour le couplage éléments finis et équations intégrales.* Jusqu'à présent, seules les techniques de décomposition de domaine sans recouvrement ont été utilisées pour le couplage de résolutions par équations intégrales et par éléments finis dans les zones où des géométries compliquées ou la présence de diélectriques non homogènes rendent difficile une résolution complète par équations intégrales. Ces approches étaient séduisantes car elles constituaient une résolution itérative performante du système complet obtenu par couplage des équations de ces deux types. Il est connu, cependant, que l'utilisation de zones de recouvrement dans des techniques de décomposition de domaine, améliore sensiblement la convergence des méthodes de décomposition de domaine. On envisage d'étendre ce traitement au couplage précédent. Plus particulièrement, nous nous intéressons aux cas où la zone maillée par éléments finis est de localisation beaucoup plus réduite que la zone où on utilise une résolution par équations intégrales.
- *Modèles robustes par conditions d'impédance généralisée pour la diffraction d'une onde électromagnétique par un conducteur recouvert d'une couche mince diélectrique.* Les études prévues cette année concernent l'analyse des conditions obtenues en 2003 du point de vue de la robustesse et de l'adaptation à leur utilisation dans une résolution numérique.

### 3.2.2. Optique non-linéaire, équations de Maxwell-Bloch (mêmes participants qu'en 2003).

Le programme de recherches démarré en 2000, portant sur la modélisation de la propagation d'une onde laser dans un cristal anisotrope (tel le KDP) et centré autour de la thèse de Olivier Saut s'achève avec la soutenance de la thèse en Décembre 2003.

Une nouvelle activité devrait démarrer en 2004 avec pour thème la prise en compte des niveaux du continuum atomique. En effet, l'émergence de lasers de caractéristiques telles que l'onde puisse exciter des niveaux du continuum rend indispensable l'étude de ces effets. Or le caractère continu de ces niveaux laisse présager l'apparition de phénomènes physiques nouveaux par rapport au cas des niveaux discrets traités jusqu'à présent. Par conséquent, l'étude s'orienterait vers la discrétisation numérique et la mise en œuvre de modèles de type Maxwell-Bloch dans lesquels l'équation de Bloch prendrait en compte les niveaux du continuum. A cet effet, une bourse de thèse CEA a été proposée pour Septembre 2004 et un étudiant est actuellement recherché.

### 3.2.3. Simulation de plasmas atmosphériques (mêmes participants qu'en 2003 auxquels s'ajoute R. Poncet (doctorant, financement CEA, thèse commencée en septembre 2003).

Les études sur la simulation des plasmas atmosphériques s'orientent dans trois directions parallèles. La première direction concerne l'enrichissement du code striations 3D en champ magnétique non-uniforme développé en 2003. Cet enrichissement concerne la modélisation d'une part avec la prise en compte des effets de transport par le vent de neutre dans la directions parallèle au champ magnétique, ainsi que celle des effets de pression (qui agissent aussi bien quoique différemment dans les directions parallèle et perpendiculaire au champ magnétique). A cet effet, l'évolution de la

température du plasma sera modélisée par une équation de bilan d'énergie adéquate. Par ailleurs, des efforts seront accomplis pour la visualisation des résultats du calcul, notamment à l'aide d'animations et de rendus géométriques appropriés.

La seconde direction concerne l'exploration d'un modèle plus riche sur le plan physique que le modèle striations. En effet, lorsque les perturbations du plasma sont de densité suffisamment importantes (ce qui est le cas lorsque la source des perturbations est de nature artificielle), on ne peut plus négliger la perturbation du champ magnétique induite. Dans ce cas, il a été établi dans [BCDDGT1] que le modèle adéquat est le modèle 'Massless MHD', constitué des équations de la MHD dans lesquels les termes d'inertie dans les équations de conservation de l'impulsion sont négligés. Les propriétés mathématiques de ce modèle, ses conditions de stabilité et d'instabilité et sa discrétisation numérique constitueront le premier volet d'un programme de trois ans centré sur la thèse d'un doctorant ayant débuté à l'automne 2003, Raphaël Poncet (financement CEA). Dans le cadre de la première année de thèse de R. Poncet en 2004, les premières propriétés mathématiques et les premiers éléments de discrétisation numérique de ce nouveau modèle seront explorés.

Enfin, la dernière direction concerne la modélisation de la turbulence au sein du modèle striations. A cet effet, un modèle striations statistique a été proposé par J. Claudel, G. Gallice et C. Tessieras. Ce modèle décrit l'évolution des deux premiers moments de la distribution statistique de la densité de plasma, et est fermé par une hypothèse adéquate sur cette distribution (hypothèse log-normale). Dans un travail (non encore rédigé), P. Degond a proposé une extension de ce modèle qui permet de décrire l'évolution de l'intégralité de la distribution statistique de la densité, et pas seulement de ses deux premiers moments, et qui ne requiert donc aucune hypothèse de fermeture. La simulation numérique de ce modèle pourrait être réalisable dans un cadre bidimensionnel sans accroissement notable de difficulté par rapport au modèle striations standard. L'étude mathématique et numérique de ce modèle constitue le deuxième volet de la thèse de R. Poncet. Pour l'année 2004, il est prévu d'explorer les premières propriétés mathématiques de ce modèle.

#### 3.2.4. Modèles hybrides et équation de Fokker-Planck (mêmes participants qu'en 2003 et collaboration avec V. Tikhonchuk au sein de l'Institut Laser Plasma).

Pendant l'année 2004, les études concernant ce thème s'orienteront selon trois axes.

Concernant le modèle hybride d'une part, il s'agira de continuer la validation physique du modèle hybride avec prise en compte du champ électrique et fréquence de collision dépendant de la vitesse. Tout d'abord, les collisions électrons-ions seront considérées. La validation du modèle sur les cas tests d'amortissement Landau et de dispersion des ondes acoustiques ioniques sera poursuivie. Enfin un nouveau cas test sera exploré: celui du ralentissement d'un faisceau d'électrons par un plasma. Enfin, un projet d'article figurant en annexe de [CDL1] sera mené à terme.

Par ailleurs, après avoir validé le modèle sur le plan physique, il conviendra d'en assurer l'optimisation numérique. Dans l'état actuel du code, le coût de calcul du modèle hybride est quasiment comparable au coût d'une résolution complète du modèle cinétique. Il convient donc de réaliser une réduction drastique des coûts. Cette réduction passe par une résolution efficace de la partie cinétique, et donc par une diminution du nombre de degrés de liberté associés à cette partie. La réduction la plus extrême consisterait à utiliser une discrétisation fluide pour la partie cinétique, le modèle hybride devenant alors un modèle bi-fluide: un fluide pour décrire la partie thermique de la fonction de distribution et un fluide pour décrire la partie suprathermique. En 2004, nous explorerons les propriétés de ce modèle hybride bi-fluide, tant sur le plan de l'étude asymptotique (vérification qu'il redonne bien un modèle mono-fluide correct lorsque les paramètres des deux fluides coïncident), que sur le plan numérique.

Enfin, les simulations cinétiques complètes de l'équation de Fokker-Planck prenant en compte les collisions électrons-électrons et électrons-ions seront poursuivies et la simulation de l'amortissement Landau dans ce cas sera menée à bien.

### 3.2.5. Mécanique de la rupture

Il s'agit maintenant de parvenir à calculer la tenue des assemblages collés. La première difficulté est alors la détermination de la fonction singulière en fond de fissure pour le bi-matériau ; puis on doit être capable de connaître l'instant du départ de la fissure. Nous envisageons une approche mécanique de la rupture.

Ensuite il faut simuler la propagation de la fissure. Deux nouvelles difficultés se présentent alors : déterminer le chemin de la fissure et évaluer la position finale où elle se stabilise. Ce second volet rend sans doute nécessaire de procéder à un calcul dynamique.

Il est aussi prévu d'étudier le portage vers ABAQUS afin de débiter une exploitation "industrielle".

### 3.2.6. Claquage de l'air par des faisceaux de micro-ondes.

Ce nouveau thème va débiter en janvier 2004. Le problème posé consiste à étudier l'influence d'un claquage de l'air par des faisceaux de micro-ondes sur les caractéristiques d'un écoulement aérodynamique au voisinage d'une paroi. La convergence du faisceau micro-ondes entraîne le claquage de l'air ambiant et la formation d'un plasma. L'onde électromagnétique chauffe les électrons qui transfèrent leur énergie aux ions et aux neutres par collisions. Pour de fortes intensités du faisceau micro-ondes, il est probable que le chauffage induit puisse entraîner des effets significatifs sur l'écoulement. L'objectif de cette étude est de parvenir à une première estimation qualitative de cet effet.

La description mathématique repose sur des modèles fluides (du type équations d'Euler ou de Navier-Stokes) pour les écoulements en présence (celui du gaz neutre d'une part et celui du plasma d'autre part) couplés aux équations de Maxwell pour la description du faisceau micro-ondes. Le développement s'articulera autour d'un code fluide multi-espèces sur maillage structuré fourni par le CESTA et d'un code Maxwell sur maillage cartésien fourni par le laboratoire MIP. Il sera effectué par un personnel contractuel (de type post-doctorant) recruté à cette occasion par le laboratoire MIP. Nous nous restreindrons à des géométries bidimensionnelles relativement simples (plaque plane infinie par exemple) permettant l'utilisation de maillages structurés (voire cartésiens).

Dans une première phase, le modèle utilisé comprendra les équations d'Euler compressibles pour le gaz neutre d'une part et pour le plasma d'autre part, couplées aux équations de Maxwell en régime temporel. La cinétique d'ionisation de l'air sera prise en compte au départ de manière simplifiée. L'injection du faisceau micro-onde sera modélisée par des conditions d'onde entrante pour les équations de Maxwell.

Différentes évolutions du modèle sont envisagées : introduction des termes de viscosité et conductivité thermique au sein de l'écoulement, introduction d'une cinétique d'ionisation plus complète, passage en régime harmonique. Ces évolutions seront décidées en fonction des résultats obtenus à l'issue de la première phase du programme.

### 3.2.7. Modélisation des composites

L'objectif de ce deuxième thème concerne la modélisation du comportement de matériaux composites thermo-structuraux, cf. thèse de Franck PETITJEAN (1996). Il s'agit notamment de prendre en compte les propriétés de symétrie orthotrope du milieu, la différence de comportement en traction ou en compression, ainsi que les phénomènes d'endommagement.

La résolution numérique du problème aux éléments finis incrémental correspondant fera appel à un algorithme de résolution de type Newton généralisé adapté au caractère non-différentiable de la non-linéarité.

La première phase de cette étude consiste en une implémentation dans GETFEM de la méthode de résolution. Il est prévu que le travail se déroule dans le cadre du stage de fin d'étude INSA au printemps 2004 de Marc ODUNLAMI. La deuxième phase correspondra à la mise en œuvre dans ABAQUS

#### **4. Conclusion**

L'année 2003 a vu se confirmer le partenariat étroit entre l'équipe LRC de MIP et le CESTA. Dans tous les projets, d'importants progrès ont été réalisés. Ainsi, le thème 'optique non-linéaire' a réalisé la totalité du programme prévu pour la thèse de Olivier Saut, ce qui a été confirmé par les excellents rapports de thèse que celui-ci a obtenus. Le thème 'Simulations de plasmas atmosphériques' a accompli des progrès majeurs par la réalisation d'une version du code striations en géométrie véritablement tridimensionnelle avec prise en compte de la non-uniformité du champ magnétique. Le thème 'Modèle hybrides' a vu de substantielles évolutions avec la prise en compte d'une physique plus réaliste dans le modèle et la réalisation d'une batterie de tests numériques relatifs à l'application physique visée.

La poursuite en 2004 des activités du thème 'optique non-linéaire' est soumise au recrutement d'un nouveau doctorant pour lequel un financement CEA est envisagé. Le thème 'simulations de plasmas atmosphériques' poursuivra d'une part le développement du code striations par un enrichissement de la physique de celui-ci, et d'autre part initiera deux autres directions de recherche, grâce au travail d'un nouveau doctorant, R. Poncet. Ces nouvelles directions concernent le modèle 'Massless MHD' d'un côté et le modèle striations statistique d'un autre côté. Dans le cadre du thème 'Modèles hybrides', les développements en cours seront menés à leur terme et la problématique de la réduction du coût du modèle sera explorée sous l'angle de la dérivation de modèles bi-fluides. Enfin, un nouveau thème débutera en 2004 : il s'agit de la modélisation du claquage de l'air par des faisceaux de micro-ondes et de l'exploration de l'influence de ce claquage sur l'écoulement.

L'effort principal dans le thème « électromagnétisme et calcul de SER » se situera au niveau des méthodes de décomposition de domaine, essentiellement pour le couplage des résolutions par éléments finis et par équations intégrales. Le développement de méthodes efficaces en ce sens fournirait des outils importants pour faire collaborer des codes éléments finis et équations intégrales pour la résolution du système de Maxwell.

## ANNEXE 1 : Chercheurs de MIP impliqués dans les activités du LRC :

<i>Nom-prénom</i>	<b>Grade</b>	<b>Thème</b>
ANTOINE Xavier	MdC, UPS	Electromagnétisme
BEN ABDALLAH Naoufel	PR, UPS	-
BENDALI Abderrhamane	PR, INSA	Electromagnétisme
BESSE Christophe	MdC, UPS	Plasmas atmosphériques, Optique non linéaire
DEGOND, Pierre	DR, CNRS	Directeur du LRC, Optique non linéaire, Plasmas atmosphériques, Equation de Fokker-Planck, Turbulence
DELUZET Fabrice	IR, CNRS	Plasmas atmosphériques
LABORDE Patrick	PR, UPS	Mécanique de la rupture
LEMOU Mohammed	CR, CNRS	Equation de Fokker-Planck, Turbulence
POMMIER Julien	IE, INSA	Mécanique de la rupture
RENARD Yves	MdC, INSA	Mécanique de la rupture
VIGNAL Marie-Hélène	MdC, UPS	-

Légende : MdC = Maître de Conférences, PR = Professeur, CR = Chargé de Recherches, DR = Directeur de Recherches, IR = Ingénieur de Recherches, IE = Ingénieur d'Etudes, UPS = Université Paul Sabatier, INSA = Institut National des Sciences Appliquées, CNRS = Centre National de la Recherche Scientifique

## **ANNEXE 2 : Programme de la journée scientifique à l'occasion de l'inauguration du LRC (le 16 mai 2003).**

Matin

Chairman: J. Ovadia

10:00-10:30 : P. Degond (MIP)

Presentation des activites de MIP et historique de la creation du LRC

10:30-10:45 : J.P. Lambelin (Cesta)

Expression du besoin pour le calcul des interfaces collées.

10:45-11:15 : P. Laborde (MIP)

Méthodes d'éléments finis généralisées (X-FEM) pour la mécanique de la rupture

11:15-11:45 : A. Bendali (MIP)

Travaux effectués à Toulouse : Formulations adaptées pour les problèmes de grande taille en diffraction d'ondes électromagnétiques

11:45-12:15: K.Mer-Nkonga (Cesta)

Travaux effectués au CESTA: Formulation adaptées pour les problèmes de grande taille en diffraction d'ondes électromagnétiques

12:15: déjeuner

Après-midi

Chairman: P. Degond

14:30-15:00 : O. Saut (MIP et Cesta)

Propagation électromagnétique dans un cristal de KDP

15:00-15:15 : A.Bourgeade (Cesta)

Etudes numérique des non linéarités optiques

15:15 - 15:30 : Ch.Tessieras

Evolution d'un plasma dans l'ionosphere et effet sur la propagation d'onde electromagnetique.

15:30-16:00 : Ch. Besse (MIP)

Modélisation d'instabilités ionosphériques

16:00-16:30 : J. Ovadia (Cesta)

Conclusions et perspectives

16:30: fin de la reunion.

## **ANNEXE 3 : Liste des prépublications du LRC mises en accès libre sur le serveur WEB du LRC en 2003**

## Année 99 :

99.01 - P. DEGOND

[Transport of trapped particles in a surface potential.](#)

99.02 - L. MIEUSSENS

[Discrete velocity model and implicit scheme for the BGK equation of rarefied gas dynamics](#)

## Année 00 :

00.01 - P. DEGOND, S. MANCINI

[Diffusion driven by collisions with the boundary.](#)

00.02 - P. DEGOND, M. LEMOU

[On the viscosity and thermal conduction of fluids with multivalued internal energy.](#)

00.03 - P. DEGOND, T. GOUDON, F. POUPAUD

[Diffusion limit for non homogeneous and micro-reversible processes.](#)

00.04 - P. DEGOND, M. LEMOU

[Toward a kinetic model of turbulent incompressible fluids.](#)

00.05 - P. DEGOND, M. LEMOU, M. PICASSO

[Viscoelastic fluid models derived from kinetic equations for polymers.](#)

00.06 - P. DEGOND, A. KLAR

[A relaxation approximation for transport equations in the diffusive limit.](#)

00.07 - L. MIEUSSENS

[Discrete-velocity models and numerical schemes for the Boltzmann-BGK equation in plane and axisymmetric geometries.](#)

00.08 - B. BIDEGARAY, A. BOURGEADE, D. REIGNIER

[Introducing physical relaxation terms in Bloch equations.](#)

## Année 01 :

01.01 - V. LATOCHA, P. DEGOND, S. MANCINI, A. MELLET

[Diffusion dynamics on an electron gas confined between two plates.](#)

01.02 - P. DEGOND

[An infinite system of diffusion equations arising in transport theory: the coupled spherical harmonics expansion model.](#)

01.03 - P. DEGOND, M. LEMOU

[Turbulence models for incompressible fluids derived from kinetics.](#)

01.04 - P. DEGOND, M. LEMOU, J.L. LOPEZ

[Fluids with multivalued internal energy: the anisotropic case.](#)

01.05 - F. Deluzet

[Mathematical Modeling of Plasma Opening Switches.](#)

01.06 - L. Mieussens

[Convergence of a Discrete-Velocity Model for the Boltzmann-BGK Equation.](#)

01.07 - B. Dubroca, L. Mieussens

[A conservative and entropic discrete-velocity model for rarefied polyatomic gases.](#)

## Année 02 :

- 02.01 - P. Degond, C. Parzani, M.-H. Vignal  
[Un modèle d'expansion de plasma dans le vide](#)
- 02.02 - K. Aoki, P. Degond, Y. Sone  
[Homogenization of a flow in a periodic channel of small section](#)
- 02.03 - M.-J. Caceres, J.-A. Carrillo, P. Degond  
[The Child-Langmuir limit for semiconductors: a numerical validation](#)
- 02.04 - P. Degond and C. Ringhofer  
[Quantum moment hydrodynamics and the entropy principle](#)
- 02.05 - P. Degond and C. Ringhofer  
[A note on quantum moment hydrodynamics and the entropy principle](#)
- 02.06 - P. Degond and K. Zhang  
[Diffusion approximation of a scattering matrix model of a semiconductor superlattice](#)
- 02.07 - Ch. Besse, B. Bidegaray-Fesquet, A. Bourgeade, P. Degond, O. Saut  
[A Maxwell-Bloch model with discrete symmetries for wave propagation in nonlinear crystals: an application to KDP](#)

## Année 03 :

- 03.01 - Olivier Saut  
[Computational modeling of ultrashort powerful laser pulses in a nonlinear crystal](#)
- 03.02 - Pierre DEGOND, Christian Ringhofer  
[A note on binary quantum collision operators conserving mass momentum and energy](#)
- 03.03 - N. Ben Abdallah, P. Degond, F. Deluzet, V. Latocha, R. Talaalout, M. H. Vignal  
[Diffusion limits of kinetic models](#)
- 03.04 - Christophe Besse, Jean Claudel, Pierre Degond, Fabrice Deluzet, Gerard Gallice, Christian Tessieras  
[A model hierarchy for ionospheric plasma modeling](#)
- 03.05 - B. Bidegaray-Fesquet, F. Castella and P. Degond  
[From Bloch model to the rate equations](#)
- 03.06 - N. Crouseilles, P. Degond, M. Lemou  
[Hybrid kinetic/fluid models for nonequilibrium systems](#)
- 03.07 - N. Crouseilles, P. Degond, M. Lemou  
[A hybrid kinetic-fluid model for solving the gas dynamics Boltzmann-BGK equation](#)
- 03.08 - Pierre Degond, Shi Jin  
[A smooth transition model between kinetic and diffusion equations](#)
- 03.09 - P. Degond, M. Lemou and Jose L. Lopez  
[A kinetic description of anisotropic fluids with multivalued internal energy](#)
- 03.10 - P. Degond, M. Lemou, M. Picasso  
[Constitutive relations for viscoelastic fluid models derived from kinetic theory](#)
- 03.11 - Pierre DEGOND, C. David LEVERMORE, Christian SCHMEISER  
[A note on the Energy-Transport limit of the semiconductor Boltzmann equation](#)
- 03.12 - Pierre Degond, Celine Parzani and Marie-Helene Vignal  
[Plasma expansion in vacuum: modeling the breakdown of quasineutrality](#)
- 03.13 - P. Degond, C. Parzani and M.-H. Vignal  
[A one-dimensional model of plasma expansion](#)
- 03.14 - P. Degond, C. Parzani, M.H. Vignal  
[On plasma expansion in vacuum](#)

## ANNEXE 4 : Liste des rapports et articles scientifiques produits par le LRC en 2003.

- [A1] X. Antoine, Some Applications of the On-Surface Radiation Condition to the Integral Equations for Solving Electromagnetic Scattering Problems, Industrial Mathematics and Statistics, Editor J.C. Misra, Narosa Publishing House, 2003.
- [AD1] X. Antoine, M. Darbas, Alternative integral equations for the iterative solution of acoustic scattering problems, version révisée soumise à Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics.
- [AD2] X. Antoine and M. Darbas, Generalized Brakhage-Werner Integral Formulations for the Iterative Solution of Acoustics Scattering Problems, Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation, Waves 2003, G. Cohen, E. Heikkola, P. Joly, P. Neittaanmaki, Editors, pp. 268-273, Springer-Verlag, 2003.
- [ADL] X. Antoine, M. Darbas, and Y. Y. Lu, An Improved Surface Radiation Condition for High-Frequency Acoustics Scattering Problems (soumis à Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering)
- [BDD1] C. Besse, P. Degond, F. Deluzet, *Irrégularités du plasma ionosphérique terrestre: modélisation et simulations numériques tenant compte de la courbure du champ magnétique terrestre*, rapport intermédiaire de contrat (partie 1), commande CESTA 4600061971/P6F34.
- [BDS] C. Besse, P. Degond, O. Saut, *Etude numérique de la propagation non linéaire d'une onde électromagnétique dans un cristal de KDP par résolution des équations de Maxwell-Bloch : Partie 3*, rapport final de contrat, commande CESTA 4600055295/P6F34.
- [CDL1] N. Crouseilles, P. Degond, M. Lemou, *Modèles hybrides cinétiques-fluides pour les plasmas hors équilibre : Partie 2: Prise en compte de fréquences de collisions dépendant de la vitesse et du champ électrique*, Rapport final de contrat, commande CEA n° 4600052693/P6F34
- [CDL2] N. Crouseilles, P. Degond, M. Lemou, Hybrid kinetic/fluid models for nonequilibrium systems, C. R. Acad. Sci. Paris **336** (2003), pp. 359--364.
- [CDL3] N. Crouseilles, P. Degond, M. Lemou, A hybrid kinetic-fluid model for solving the gas dynamics Boltzmann-BGK equation, soumis.
- [Sa1] O. Saut, *Computational modeling of ultrashort powerful laser pulses in anisotropic crystal*, accepté pour publication au J. Computational Physics
- [Sa2] O. Saut, Etude numérique des non-linéarités d'un cristal par résolution des équations de Maxwell-Bloch, thèse, Université Paul Sabatier, Décembre 2003.
- [BCDDGT1] C. Besse, J. Claudel, P. Degond, F. Deluzet, G. Gallice, C. Tessieras, *A model hierarchy for ionospheric plasma modeling*, à paraître dans Math. Methods and Models in the Applied Sciences.
- [BCDDGT2] C. Besse, J. Claudel, P. Degond, F. Deluzet, G. Gallice, C. Tessieras, *Instability of the ionospheric plasma: modeling and analysis*, en preparation.
- [BDHP] C. Besse, P. Degond, H-J. Hwang, R. Poncet, Instability of the two-dimensional dynamo model about smooth steady-states, en preparation.

[BB] Bartoli N., Bendali A., Robust and high-order effective boundary conditions for perfectly conducting scatterers coated by a thin dielectric layer. *IMA J. Appl. Math.* 67 (2002), no. 5, pp 479-508.