

LRC M 06

"Mathématiques pour l'Industrie et la Physique"

Rapport d'activité pour l'Année 2005 Perspectives pour l'Année 2006 Chercheurs intervenant dans le cadre du LRC

1. Présentation générale

La création du Laboratoire de Recherche Correspondant du CEA date de janvier 2002. L'année 2005 correspond donc à la quatrième année d'activité du LRC. Dans le courant de l'année 2005, le nombre de chercheurs permanents impliqués côté MIP a diminué, du fait du départ de C. Besse, nommé Professeur à l'Université de Lille début septembre et de S. Châble, qui a trouvé un emploi dans l'industrie à partir de début décembre. Les noms et grades des chercheurs de MIP impliqués dans l'activité du LRC en 2006 figurent en annexe 1.

Les thèmes de recherche recensés dans le programme défini pour l'année 2004 étaient les suivants :

1. Equations de Maxwell : Electromagnétisme et calculs de SER
2. Equations de Maxwell : claquage de l'air par des faisceaux de micro-ondes
3. Plasmas : Simulation de plasmas atmosphériques
4. Mécanique de la rupture et matériaux composites

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 2005 dans chacun de ces domaines puis nous traçons les perspectives pour l'année 2006.

2. Bilan des activités de l'année 2005

2.1. Activités générales

La liste des actions générales du LRC en 2005 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 24 Novembre 2005 au laboratoire MIP ; voir le programme en 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/~LRC>.
- Réalisation d'une série de prépublications du LRC.
- Participation à des journées de synthèse et de bilan relatives aux différentes activités du LRC.

2.2. Activités thématiques

Nous développons maintenant les perspectives pour chacune des quatre grandes thématiques.

- 2.2.1. Electromagnétisme, Calculs de SER : participants A. Bendali (MIP), M. Darbas (ATER INSA Toulouse), N. Balin (Bourse CIFRE MBDA, Convention MBDA-MIP-CERFACS), A. Makhlof (Bourse de coopération franco-algérienne).

Les activités de ce thème sont orientées principalement sur le développement de méthodes efficaces pour le calcul de SER. Les méthodes utilisées recouvrent

les résolutions par équations intégrales pour tenir compte de la propagation en dehors des obstacles,
le couplage éléments finis - équations intégrales s'il y a des parties diélectriques non homogènes pour lesquelles une formulation par équations intégrales n'est pas utilisable,
les méthodes de décomposition de domaines,
l'analyse asymptotique pour le développement de modèles pour la diffraction par des surfaces rugueuses, des obstacles métalliques recouverts d'une couche mince de matériau diélectrique, les structures micro-rubans (antennes patch).

Les résultats ont été les suivants

Construction de préconditionneurs analytiques pour les équations intégrales. Ces techniques permettent de réduire considérablement le nombre d'itérations lors de la résolution du système final. Marion DARBAS a développé de nouvelles formulations combinées par équations intégrales du système de Maxwell –CFIE : Combined Field Integral Equations– qui donnent lieu après discrétisation à des systèmes linéaires particulièrement adaptés à une résolution par la méthode multipôle. Un article a été accepté [D]. Certains résultats obtenus en 2004 ont été publiés en 2005 [ABD].

Méthodes de décomposition de domaine. Une part importante des activités a été consacrée à ce thème. Rappelons que ce type de méthode donne des techniques très souples pour développer des algorithmes itératifs efficaces, pour paralléliser des résolutions et pour coupler des procédés distincts de résolution (méthode éléments finis et équations intégrales ou méthode exacte et méthode asymptotique). Un article

de synthèse [BBMFZ], décrivant les diverses études effectuées dans ce thème, va paraître dans un numéro spécial des CRAS. Un article [BBF], traitant de l'acoustique et montrant comment ce procédé permet de développer une méthode efficace de traitement de la diffraction par un corps pénétrable inhomogène dans le cadre d'une résolution sur une architecture massivement parallèle, a été accepté pour publication. Le papier [BBC] a fait partie de la sélection de contributions présentées à la 15^{ème} conférence internationale sur les méthodes de décomposition de domaines qui ont été publiées sous forme d'un ouvrage.

Analyse asymptotique de la diffraction par un objet métallique recouvert d'une couche mince de matériau diélectrique. Une analyse asymptotique complète sur ce problème a été effectuée (Bendali-Lemrabet). Un article sera prochainement soumis.

Modèles pour la diffraction par une surface rugueuse. Un article [PBB] traitant de conditions effectives a été accepté et devrait paraître très prochainement. Les premiers résultats, obtenus avec des conditions du second ordre, sont très prometteurs.

2.2.2. Equations de Maxwell : claquage de l'air par micro-ondes : participants C. Besse, S. Châble, P. Degond, F. Deluzet (MIP), C. Tessieras, G. Gallice, J. Claudel (CESTA)

Ce thème a débuté en janvier 2004. Le problème posé consiste à étudier l'influence du claquage de l'air par un faisceau de micro-ondes sur les caractéristiques d'un écoulement aérodynamique. De manière plus précise, nous nous intéresserons aux effets induits sur la paroi par le plasma ainsi généré.

Le scénario physique est le suivant : une onde de forte amplitude attaque un écoulement au voisinage d'une paroi et entraîne le claquage de l'air 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 et par conséquent sur la paroi. L'objectif de cette étude est de parvenir à une première estimation qualitative de cet effet.

Pour décrire ce scénario, nous avons proposé un modèle fluide couplé aux équations de Maxwell. Le modèle fluide consiste en un système d'équations de Navier-Stokes constitué de deux équations de bilan des masses pour le fluide global d'une part et les électrons d'autre part, une équation de bilan d'impulsion pour le fluide global et enfin une équation de bilan d'énergie pour les lourds (ions et neutres). Le système comporte des termes sources dus à l'ionisation par le champ micro-ondes. Le plasma est considéré comme quasi-neutre (les densités ionique et électronique sont égales en tout point). La vitesse et la température des ions sont supposées coïncider avec celles des neutres. La vitesse et la température des électrons sont fonctions du champ électrique local à travers une loi de mobilité pour la vitesse et une loi empirique tirée de la littérature pour la température. La pression totale du fluide est la somme des pressions partielles. Un terme de chauffage par l'onde figure comme terme source de l'équation d'énergie du fluide. Ce terme est lié au courant électrique figurant au second membre de l'équation d'Ampère dans le système de Maxwell.

Le développement numérique s'est articulé 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 a été effectué par un personnel contractuel, S. Châble, recruté à cette occasion par le laboratoire MIP. Le code a été soigneusement validé sur des cas tests analytiques tout d'abord dans le cadre non visqueux (étude faite en 2004), puis avec les termes visqueux [BCDD1].

Dans un premier temps, nous nous sommes restreints à une géométrie relativement simple, celle d'un objet cylindrique terminé par une sphère (sphère-cylindre). On suppose que les micro-ondes éclairent

une portion latérale de l'objet. Un petit domaine correspondant à la portion éclairée de la paroi et à l'écoulement environnant est sélectionné. Un premier calcul sans couplage avec les équations de Maxwell est effectué à l'aide du code du Cesta. Ce calcul permet de connaître les conditions du fluide en amont du domaine de calcul. Ces conditions sont utilisées comme conditions aux limites amont pour le fluide. Le faisceau de micro-ondes est pris en compte à l'aide d'une condition aux limites de type onde entrante dans les équations de Maxwell. Le calcul couplé fluide-Maxwell à l'aide du modèle et des conditions aux limites décrits ci-dessus est alors lancé et l'on observe comment le fluide et les efforts à la paroi sont modifiés par l'éclairement par les micro-ondes [BCDD2].

Dans un second temps, une géométrie 'sphère-cone' plus réaliste que la géométrie sphère-cylindre a été étudiée. Elle a demandé de convertir le code dans une géométrie axisymétrique en ajoutant les termes de géométrie convenable [BCDD2].

Le traitement des équations de Maxwell s'effectue en temporel et en explicite, ce qui nécessite un nombre considérable de pas de temps pour une simulation réaliste. Pour réduire le temps de calcul, le code a été optimisé. En particulier, les lois analytiques complexes pour les fréquences d'ionisation et les lois de température ont été tabulées, ce qui a entraîné un accroissement considérable de la rapidité du code. Egalement, les pas de temps pour les équations de Maxwell et pour les équations fluides sont différents (subcycling). Grâce à cette optimisation le code requiert environ une douzaine d'heures pour une simulation de quelques dizaines de microsecondes. Un potentiel correcteur, solution d'une équation de type Poisson, a été introduit de manière à corriger des phénomènes liés à la non-satisfaction de l'équation de Gauss au voisinage des chocs [BCDD1].

Les résultats montrent, avec les données utilisées actuellement, que l'écoulement est sensiblement modifié par le plasma mais que la variation relative des efforts à la paroi est faible [BCDD2].

Cette étude ne sera pas poursuivie en 2006, mais néanmoins la rédaction d'un article scientifique sur ce sujet est envisagée.

2.2.3. Plasmas : simulation de plasmas atmosphériques

Participants : C. Besse, P. Degond, F. Deluzet, R. Poncet (MIP), J. Claudel, G. Gallice, J. Ovadia, C. 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 (étude de l'année 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 [BCDDGT2] et [BCDDGT3].

En 2002, nous avons proposé une extension du modèle striations pour un champ magnétique non uniforme, ce qui correspond au cas du champ magnétique terrestre. Ce modèle 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 était bidimensionnel et traitait d'un champ magnétique uniforme en géométrie cartésienne, des modifications adéquates ont été introduites afin de le passer en trois dimensions et l'adapter à la nouvelle géométrie. Le code ainsi réalisé a été testé, et validé [BCDDGT3] et [BCDDGT4].

En 2004, le code striations 3D en champ magnétique non-uniforme a été enrichi en prenant en compte les effets thermiques (pression, température). Le terme de pression modifie à la fois le transport dans la direction parallèle au champ magnétique (en ajoutant un terme de diffusion) et dans la direction transverse (en ajoutant une composante supplémentaire au courant électrique, due à la dérive diamagnétique des particules). De plus, la pression est fonction, non seulement de la densité, mais aussi de la température des espèces. Pour décrire l'évolution de la température, une équation de bilan d'énergie a été ajoutée au système. La mise en œuvre de ces différents termes supplémentaires a été réalisée et validée. Par ailleurs, des outils de visualisation des résultats du code striations 3D ont été développés et des animations produites. Ces efforts ont contribué à faire connaître le travail réalisé de la communauté scientifique. Parallèlement, en 2004, s'est poursuivie l'exploration d'un modèle plus riche sur le plan physique que le modèle striations, qui prend en compte la perturbation du champ magnétique induite (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. L'étude de ce modèle constitue le sujet de thèse de Raphaël Poncet qui a débuté sa thèse à l'automne 2003 sur un financement CEA. L'existence et la stabilité linéarisée du modèle ont été explorées.

En 2005 a été débuté le développement d'un code complètement tridimensionnel. En effet, pour décrire le plasma ionosphérique, il est possible d'établir une hiérarchie de modèles reposant sur des passages à la limite successifs dans un ensemble de petits paramètres (études antérieures). A l'extrémité de la hiérarchie figure le modèle 'striations multi-couches' mis en œuvre au cours des années précédentes [BCDDGT3] et [BCDDGT4]. Ainsi qu'il a déjà été précisé plus haut, ce modèle est constitué d'une équation de transport tridimensionnelle pour le plasma, couplée à une équation elliptique bidimensionnelle pour le champ électrique. En effet, dans ce modèle, la mobilité des espèces dans la direction alignée avec le champ magnétique est considérée comme infinie. Dans cette situation, les champs électrique et magnétique sont orthogonaux. Ainsi, toute ligne de champ magnétique est une équipotentielle du potentiel électrique, lequel ne dépend que des deux coordonnées transverses au champ magnétique. Dans le cas d'un champ magnétique non-uniforme comme le champ magnétique terrestre, les coordonnées transverses au champ magnétique sont bien entendu rapportées à un système de coordonnées curvilignes adapté.

Néanmoins, la mobilité alignée des espèces ne peut pas être considérée comme infinie partout. Dans la basse ionosphère, les collisions avec les neutres sont importantes et dans ce cas, la mobilité devient une quantité finie. De ce fait, les champs électrique et magnétique ne sont plus nécessairement orthogonaux et le modèle striations n'est plus valable. Il convient alors de remonter 'd'un cran' dans la hiérarchie de modèles et de considérer le modèle dynamo. Ce modèle couple une équation de transport tridimensionnelle pour le plasma et une équation elliptique également tridimensionnelle pour le champ électrique.

Les développements durant l'année 2005 ont eu pour objet la résolution numérique du modèle dynamo 3D, et la comparaison avec le modèle striations multi-couches. L'objet était d'une part de valider le modèle striations multi-couches dans les zones où il est supposé être valable (essentiellement à haute altitude) et de proposer un modèle plus précis lorsqu'il est en défaut (à basse altitude).

L'équation elliptique intervenant dans le modèle dynamo met en jeu une matrice de conductivité fortement anisotrope, liée aux matrices de mobilité des espèces. Ainsi, dans une grande partie du domaine, un des éléments de cette matrice (celui correspondant aux mobilités alignées) est très grand devant les autres. Il s'ensuit alors un système elliptique mal conditionné, difficile à résoudre. De plus, la taille du domaine de résolution (un tube de champ magnétique dont la section est un carré d'environ 100 km de côté) nécessite l'emploi d'un nombre élevé de noeuds (typiquement 300 par 300 dans les directions normales au champ magnétique et 60 dans la direction parallèle). Le nombre d'inconnues du système linéaire sera donc considérable. Une des difficultés de ce projet était donc de concevoir et mettre en oeuvre des méthodes de résolution rapides, mettant à profit la forte anisotropie de la matrice de conductivité.

L'étude est en cours, son terme étant prévu en juin 2006. En 2005 a été réalisée l'intégralité de l'étude et de la programmation d'une méthode de résolution itérative du système elliptique à l'aide d'une méthode TFQMR assortie d'un préconditionnement par une factorisation LU incomplète avec compensation diagonale. De manière surprenante, il a été constaté que la méthode permettait de traiter des cas de fortes anisotropies, comparables à celles que l'on observe dans la réalité physique [BDDP]. Au vu des bons résultats obtenus par cette méthode, il a été décidé de poursuivre dans cette voie. Néanmoins deux autres voies ont été explorées 'sur le papier' :

- Une méthode uniformément stable dans la limite 'Striations'. Il s'agit là de développer un algorithme dont le coût de calcul reste rigoureusement constant lorsque la mobilité alignée tend vers l'infini (autrement dit l'anisotropie de la matrice de conductivité) tend vers l'infini. Pour cela, on décompose le potentiel en sa moyenne sur une ligne de champ et une fluctuation de moyenne nulle sur une ligne de champ. La moyenne est décrite par un problème bidimensionnel analogue à celui intervenant dans le modèle striations. La fluctuation est décrite par un problème tridimensionnel présentant un conditionnement indépendant de la mobilité lorsque celle-ci tend vers l'infini (grâce à la condition de moyenne nulle).
- Une stratégie de couplage entre le modèle dynamo (nécessaire aux basses altitudes) et le modèle striations (valable aux hautes altitudes et beaucoup moins coûteux). Le couplage s'effectue par le biais de conditions aux limites (pour le modèle dynamo) et de termes sources (pour le modèle Striations) adéquats.

Parallèlement, l'étude du modèle Massless-MHD a été poursuivie en 2005. Rappelons que le modèle Massless-MHD est un modèle plus complexe que le modèle Striations, qui prend en compte les perturbations du champ magnétique induites par le plasma. Le modèle Striations s'obtient à partir du modèle Massless-MHD dans la limite où un petit paramètre (noté β) adimensionnel quantifiant le rapport entre le rotationnel du champ magnétique et le courant tend vers 0.

R. Poncet s'est consacré durant sa deuxième année de thèse à un résultat de stabilité rigoureux pour une classe de modèles dérivant de la MHD. L'analyse repose sur un théorème abstrait qui permet de généraliser les résultats antérieurs obtenus sur le modèle Striations [BDHP] à des modèles Striations visqueux et Striations généralisés. Il faut remarquer que c'est le premier résultat de ce genre s'appliquant à des modèles incluant la viscosité, et cela est rendu possible grâce à la structure spécifique du modèle striations. Un article à ce sujet est en cours de rédaction.

Par ailleurs, une étude consistant à réaliser des simulations numériques du modèle Massless MHD bidimensionnel et à comparer numériquement les seuils de déclenchement des instabilités entre le modèle Massless MHD et le modèle Striations a débuté en 2005. A cet effet, un schéma pour le modèle Massless MHD qui possède une propriété de stabilité asymptotique lorsque le petit paramètre β tend vers 0 a été conçu. Lorsque ce paramètre tend vers zéro dans le schéma, on obtient à la limite une discrétisation du modèle Striations. Cette propriété est obtenue à l'aide d'une discrétisation implicite du terme de diffusion dans l'équation du champ magnétique, ainsi que d'une réécriture de

l'équation de bilan de masse comme une équation de convection pour le rapport densité sur champ magnétique (rappelons que dans le cas bidimensionnel, le champ magnétique est une quantité scalaire, correspondant à la composante normale au plan considéré du vecteur champ magnétique). La réalisation de simulations numériques et de comparaisons avec le modèle Striations dans des cas d'instabilité est un des objectifs principaux pour R. Poncet en 2006. La soutenance de la thèse de R. Poncet est prévue à la fin de l'année 2006.

2.2.4. Mécanique de la rupture et matériaux composites.

Sous thème 1 : Matériaux Carbone-Carbone : Participants : P. Laborde (MIP), M. Odunlami (CS-SI), B. Toson (CEA/CESTA), A. Cosculluela (CEA/CESTA)

Le projet intitulé « Travaux de Modélisation des Matériaux Carbone Carbone » a débuté en octobre 2004. Les matériaux étudiés présentent les caractéristiques suivantes :

- Comportement orthotrope, pouvant différer entre la traction et la compression ;
- Cisaillement non linéaire ;
- Variation des modules de rigidité en fonction de l'endommagement.
- Loi de comportement dépendant des effets thermiques.

Ces matériaux ont été caractérisés par des essais uniaxiaux en traction, compression et cisaillement. L'objectif initial du projet était d'implémenter dans la routine utilisateur Umat du code Abaqus le modèle de Frank Petitjean afin de rendre compte de manière précise des caractéristiques matériaux obtenues par l'expérience.

Dans ce travail de collaboration, P. Laborde (MIP) est intervenu en temps qu'expert sur les aspects théoriques des modèles d'endommagement. B. Toson (CEA/CESTA) et M. Odunlami (CS SI) se sont consacrés à l'implémentation informatique dans Abaqus.

D'octobre à décembre 2004, les éléments théoriques du modèle d'endommagement étudié dans la thèse de F. Petitjean ont été repris et précisés [O1]. Dans son étude F. Petitjean faisait intervenir des variables internes d'endommagement liées à l'histoire des contraintes du matériau au cours du chargement mécanique. Le travail de Petitjean a été programmé dans Abaqus, et des tests élémentaires de validation ont été réalisés [O2]. Ces derniers ont mis en évidence les insuffisances de ce modèle pour rendre compte d'un écrouissage non linéaire. Le schéma numérique employé a également montré ses limites pour des applications industrielles, car sa précision dépend fortement de l'incrémentalisation utilisée.

Le travail initial visant à exploiter le modèle de Petitjean a donc été abandonné pour se consacrer à l'élaboration d'une nouvelle modélisation exploitable sur le plan industriel. Il a donc été décidé de redéfinir les variables internes d'endommagement, en les associant à l'histoire des déformations. Dans ce cadre, un premier modèle à température constante a été exhibé et validé numériquement [2], entre janvier et mars 2005.

D'avril à juin 2005, le modèle d'endommagement en déformation a été enrichi par l'introduction de la variation de température [O3]. On a alors considéré que l'endommagement du matériau se produisait sans déformations permanentes. Cette hypothèse a été adoptée en l'absence de données expérimentales relatives aux déformations permanentes. Le passage du plan de la traction à celui de la compression a également été programmé.

Enfin de juillet à septembre 2005 le modèle d'endommagement à température variable a été mis en oeuvre sur des cas d'assemblage fretté insert-support relatifs aux applications du CEA/CESTA. Les premiers résultats obtenus ont permis de montrer les différences comportementales entre une approche élastique réversible et une approche élastique endommageable.

Lors d'une réunion le 14/09/05 entre le CEA/CESTA et le CEA du Ripault des données expérimentales supplémentaires ont mis en évidence la présence de déformations permanentes pour les 3DCC dans certaines situations, en cisaillement à 20°C notamment. Sur le plan du modèle, l'étape à venir concerne donc la prise en compte de ces déformations permanentes. D'autre part, des tests expérimentaux ont été demandés au CEA du Ripault afin de préciser la modélisation des éléments suivants :

- évolution de l'endommagement lors d'un changement de température ;
- passage de la traction à la compression en présence de déformations permanentes.

L'état d'avancement du travail a fait l'objet d'exposés en interne [LOT1] [LOT2] [LOT3].

M. Odunlami a terminé son travail à CS SI fin novembre, pour prendre au 1^{er} décembre un poste d'ingénieur à l'Université de Pau.

Sous thème 2 : Personnes concernées: P. Laborde (MIP), J. Pommier (MIP), Y. Renard (MIP), B. Toson (CEA/CESTA), A. Cosculluela (CEA/CESTA)

La modélisation numérique de la fissuration (fissuration dans les joints collés) n'a pas donné lieu à de nouveaux développements en 2005 dans le cadre du partenariat MIP/CEA . Toutefois le laboratoire MIP continue à travailler sur les méthodes XFEM (eXtended Finite Element Method) [LPYS]. Notamment, une étude sur la fissuration des plaques et des coques a démarré en Octobre 2005 dans le cadre d'une collaboration avec Airbus *via* une thèse BDI.

3. Perspectives pour l'année 2006

3.1. Activités générales

Les activités 'générales' prévues dans le cadre du LRC en 2006 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 2006,
- 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

Les thèmes poursuivis en 2006 sont les suivants :

1. Electromagnétisme et calculs de SER
2. Plasmas : simulation de plasmas atmosphériques
3. Mécanique de la rupture et matériaux composites.

Nous développons maintenant les perspectives pour chacune des quatre grandes thématiques.

- 3.2.1. Electromagnétisme, Calculs de SER : participants A. Bendali (MIP), A. Makhoulf (Boursier, coopération algéro-française, MIP) K. Mer du CEA-CESTA et collaboration avec Y. Boubendir (Université de Minneapolis), J.-R. Poirier (ENSEEIH) et l'équipe EMC du CERFACS.

Nous listons ci-après les thèmes des études qui sont prévues à MIP et qui sont susceptibles d'intéresser le CEA-CESTA.

Méthodes de décomposition de domaine. (A. Bendali, K. Mer et Y. Boubendir). Nous envisageons de coupler la méthode de Jin, qui est une méthode de décomposition de domaine sans recouvrement permettant d'éviter la résolution d'un système avec une matrice pleine, avec une méthode de décomposition de domaine pour le couplage éléments finis – équations intégrales et d'introduire des préconditionneurs efficaces. Ce type d'études devrait intéresser le CESTA pour le remplacement des techniques, coûteuses en temps de calcul, basées sur les équations de Després, pour le couplage éléments finis – équations intégrales.

Modèles à deux échelles pour les structures micro-ruban. (A. Bendali et A. Makhoulf). Des phénomènes de couche limite rendent très délicate l'utilisation de procédés directs de résolution numérique de problèmes liés au rayonnement d'antennes micro-ruban. Ces difficultés sont connues des praticiens utilisant les gros codes de simulation numérique en électromagnétisme et en particulier des experts du CEA-CESTA. Dans le cadre de modèles d'abord bidimensionnels, nous nous proposons, à travers une analyse asymptotique à deux échelles, de bien analyser ces phénomènes en vue d'améliorer les procédés numériques pour leur détermination.

3.2.2. Plasmas : simulation de plasmas atmosphériques et modèles hybrides

Participants : P. Degond, F. Deluzet, R. Poncet (MIP), J. Claudel, G. Gallice, J. Ovadia, C. Tessieras (CESTA)

L'étude concernant le développement du modèle Dynamo 3D est prévue jusqu'à la mi-2006. Les développements numériques seront poursuivis : le couplage du solveur elliptique tridimensionnel développé en 2005 avec les équations de transport tridimensionnelles du plasma déjà résolues dans le cadre du code Striations seront réalisées. Selon la performance du code obtenu, la qualité des résultats et le temps disponible, le développement d'une stratégie de couplage Dynamo-3D – Striations sera entrepris et éventuellement, les premiers tests de la méthode asymptotiquement stable dans la limite Striations seront effectués.

Parallèlement, l'étude de la stabilité du modèle Massless-MHD (et modèles dérivés) et la discrétisation de ce modèle à l'aide d'une méthode asymptotiquement stable dans la limite 'Striations' seront activement poursuivies par R. Poncet. La rédaction du manuscrit de thèse sera achevée pour la mi-juillet et la thèse sera soutenue avant la fin de l'année civile 2006.

La poursuite du programme scientifique s'établira dans deux directions.

L'étude sur les striations s'inscrit dans le cadre plus vaste d'une étude sur les effets d'un dépôt de plasma énergétique dans les hautes couches de l'atmosphère. La phase 'Striations' est la phase ultime du développement du phénomène mais dans une phase antérieure, des phénomènes plus énergétiques entraînent des perturbations importantes du plasma, dans lesquelles les effets d'inertie des électrons

ne peuvent plus être négligés. Pour décrire cette phase, le Cesta a développé un code MHD en champ magnétique figé. En 2006, nous proposons de situer le modèle utilisé au Cesta au sein de la hiérarchie de modèles précédemment établie, et d'examiner comment connecter ce modèle au modèle striations. A cet effet, une approche asymptotique sera développée.

Par ailleurs, ce modèle MHD champ figé doit à l'évidence respecter l'équilibre atmosphérique en l'absence de perturbations de plasmas. L'équilibre atmosphérique est entendu comme une moyenne de l'état de l'atmosphère telle que fournie par les différentes tables et modèles disponibles auprès de la communauté internationale. Le problème consiste à trouver une ensemble d'équations de bilan raisonnables ayant la propriété de respecter l'équilibre atmosphérique. De manière plus précise, ce modèle doit respecter les contraintes suivantes :

- posséder les solutions stationnaires numériques consistantes avec les atmosphères connues,
- posséder des solutions stationnaires numérique faciles à obtenir,
- être numérisable de façon robuste.

3.2.3. Matériaux carbone-carbone : participants : P. Laborde, M. Odunlami, B. Toson

Validation d'un modèle proposé dans une précédente collaboration en fonction de données expérimentales nouvelles. Confrontation avec d'autres modèles connus dans la littérature. Eventuellement, amélioration de la modélisation retenue.

Support théorique au travail d'implémentation dans Abaqus par B. Toson d'un algorithme intégrant le modèle choisi.

Travail de communication scientifique (P. Laborde, M. Odunlami, B. Toson).

4. Conclusion

L'année 2005 a vu se continuer le partenariat étroit entre l'équipe LRC de MIP et le CESTA. Le partenariat s'est établi autour de trois thèmes, les striations ionosphériques, l'influence d'un claquage micro-ondes sur un écoulement et enfin la mécanique de la rupture.

En 2006, l'activité concernant le claquage micro-ondes devrait s'arrêter. Celle concernant les striations ionosphériques s'orienteront sur une phase antérieure du phénomène. Enfin, le partenariat autour de la mécanique de la rupture se poursuivra.

Dans plusieurs thèmes la collaboration a conduit à la réalisation de codes de niveau pré-industriel avec des fonctions de visualisation poussées. Cela n'empêche pas des travaux de recherche plus fondamentale de se poursuivre, avec notamment une thèse en cours sur de nouveaux modèles de la physique des plasmas ionosphériques, laquelle devrait être soutenue fin 2006.

La collaboration implique activement les équipes de part et d'autres, avec, outre l'organisation de la journée LRC annuelle, de nombreuses rencontres et la rédaction de publications communes.

En résumé, il s'agit d'un partenariat très actif et dynamique où la complémentarité et l'interdisciplinarité des équipes permettent des avancées significatives sur plusieurs fronts.

ANNEXE 1 : Chercheurs de MIP impliqués dans les activités du LRC en 2006:

Nom-prénom	Grade	Thème
BENDALI, Abderrahmane	PR, INSA	Electromagnétisme et calcul de SER
DEGOND, Pierre	DR, CNRS	Directeur du LRC, Plasmas atmosphériques
DELUZET Fabrice	IR, CNRS	Plasmas atmosphériques
LABORDE Patrick	PR, UPS	Mécanique de la rupture et composites
POMMIER Julien	IE, INSA	Mécanique de la rupture et composites
RENARD Yves	MdC, INSA	Mécanique de la rupture et composites

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 annuelle du LRC (le 24 Novembre 2005).

11h00 - 11h20 : Accueil

11h20- 11h30 : Pierre Degond : "Présentation et historique du LRC M06"

11h30 - 12h10 : Marc Odunlami, Patrick Laborde : "Modélisation
numérique de l'endommagement des matériaux composites thermo-structuraux
: une introduction"

12h10 - 12h40 : Raphael Poncet : "Le modèle massless MHD pour l'étude des
striations ionosphériques"

12h40 - 14h00 : Repas

14h00 - 14h40 : Nolwen Balin : "Méthodes de décomposition de domaine
pour le couplage asymptotique - équations intégrales dans le calcul de SER
d'une grande structure avec une cavité profonde"

14h40 - 15h20 : Stéphane Châble : "Interaction d'un écoulement avec un
faisceau micro-ondes"

15h20 - 15h40 : Pause café

15h40 - 16h20 : Fabrice Deluzet : "Modélisation des irrégularités de
plasma ionosphérique"

16h20 - 16h50 : Gérard Gallice "Propositions d'études pour les plasmas
atmosphériques"

16h50 - 17h00 : Conclusions (Jean Ovadia).

17h00 : Pause café

Les exposes auront lieu dans la salle Sophie Germain
(Institut de Mathématiques, Université Paul Sabatier, Toulouse)

ANNEXE 3 : Liste des productions scientifiques sur les thèmes du LRC en 2005.

[ABD] X. Antoine, A. Bendali, M. Darbas, *Analytic preconditioners for the boundary integral solution of the scattering of the acoustic waves by open surfaces*, numéro special du Journal of Computational Acoustics, Journal of Computational Acoustics vol.13 n°3 p477-498 (2005).

[BBC] N. Balin, A. Bendali, F. Collino, *Domain decomposition and additive Schwarz techniques in the solution of a TE model of the scattering by an electrically deep cavity*. Selected papers of the 15th international conference on domain decomposition, Berlin, Germany, July 21-25, 2003, Berlin: Springer. Lecture Notes in Computational Science and Engineering 40, 149-156 (2005)

[BBF] A. Bendali, Y. Boubendir, M. Fares, *A FETI-like Domain Decomposition Technique for coupling Finite Elements and Boundary Elements in large size problems of acoustic scattering*, à paraître dans Computers and Structures.

[BBMF] N. Balin, A. Bendali, M. Fares, F. Millot, N. Zerbib, *Some recent applications of substructuring and domain decomposition techniques to radiation and scattering of time-harmonic waves*, numéro special CRAS, à paraître.

[BCDD1] C. Besse, S. Chable, P. Degond, F. Deluzet, *Micro-Ondes et Interaction avec un Ecoulement (MOINE)*, Rapport intermédiaire de contrat CEA Cesta, n° 05ZZAG000274, 21 juin 2005.

[BCDD2] C. Besse, S. Chable, P. Degond, F. Deluzet, *Micro-Ondes et Interaction avec un Ecoulement (MOINE)*, Rapport final de contrat CEA Cesta, n° 05ZZAG000274, 27 Octobre 2005.

[BCDDGT2] C. Besse, J. Claudel, P. Degond, F. Deluzet, G. Gallice, C. Tessieras, *Instability of the ionospheric plasma: modeling and analysis*, à paraître dans SIAM Applied Math.

[BCDDGT3] C. Besse, J. Claudel, P. Degond, F. Deluzet, G. Gallice, C. Tessieras, *Ionospheric plasma: model derivation, stability analysis and numerical simulations*, in 'Numerical Methods for Hyperbolic and Kinetic Problems', S. Cordier, T. Goudon, M. Gutnic, E. Sonnendrücker (eds), European Mathematical Society, Zürich, 2005.

[BCDDGT4] C. Besse, J. Claudel, P. Degond, F. Deluzet, G. Gallice, C. Tessieras, *Numerical simulations of the ionospheric striation model in a non-uniform magnetic field*, soumis.

[BDDP] C. Besse, P. Degond, F. Deluzet, R. Poncet, *Modélisation complètement tridimensionnelle des irrégularités du plasma ionosphérique terrestre par le biais du modèle Dynamo-3D et de modèles dérivés*, Rapport intermédiaire de contrat CEA Cesta, numéro 4600108543, Novembre 2005.

[BDHP] C. Besse, P. Degond, H-J. Hwang, R. Poncet, *Nonlinear instability of the two-dimensional striation model about smooth steady-states*, à paraître dans Comm. Partial Diff. Equations.

[BS] A. Bourgeade, O. Saut, *Comparison of macroscopic and microscopic models for ultrashort pulses propagation in nonlinear crystals*, 2004, soumis

[CDL2] N. Crouseilles, P. Degond, M. Lemou, *A hybrid kinetic-fluid model for solving the Vlasov-BGK equation*, J. Comput. Phys. Disponible en ligne 18/10/2005.

- [CF] N. Crouseilles, F. Filbet, *Numerical approximation of collisional plasmas by high order methods*, J. Comput. Phys., **201**, 10 December 2004, pp. 546-572.
- [D] M. Darbas, *Generalized CFIE for the iterative solution of Maxwell's equations*, Applied Mathematics Letters, à paraître.
- [LOT1] P. Laborde, M. Odunlami, B. Toson, *Modélisation numérique de l'endommagement*, Le Barp, 25/03/05
- [LOT2] P. Laborde, M. Odunlami, B. Toson, *Thermo-endommagement. Modélisation numérique*. Le Barp, 21/06/05
- [LOT3] P. Laborde, M. Odunlami, B. Toson, *Modélisation numérique de l'endommagement des C-C à haute température*, Journée LRC , Toulouse, 24 /11/2005
- [LPYS] P. Laborde, J. Pommier, Y. Renard, M. Salaün, *High order extended finite element method for cracked domains*, Int. J. Numer. Meth. Engng, Vol. 64, Issue 3 (2005), pp 354 -381
- [O1] M. Odunlami, *Travaux de Modélisation de Matériaux Carbone/Carbone*, réf. CESTA/MATCC/NT/001/1.3, 15/12/2004.
- [O2] M. Odunlami, *Implémentation numérique du modèle de Frank Petitjean - Introduction d'un nouveau modèle d'endommagement de Modélisation de Matériaux Carbone/Carbone*, réf. CESTA/MATCC/NT/002/1.0, 24/03/2005.
- [O3] M. Odunlami, *Température et passage traction-compression dans le modèle d'endommagement en déformation : étude et tests complémentaires*, réf. CESTA/MATCC/NT/003/1.0, 29/09/2005.
- [Saut3] O. Saut, *Bidimensional study of the Maxwell-Bloch model in a nonlinear crystal*, 2004, soumis.