INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Équipe corida

Contrôle Robuste des Systèmes Infini-Dimensionnels et Applications

Lorraine

THÈME 4A

Rapport d'Activité

2002

Table des matières

1. Composition de l'équipe

CORIDA est un projet commun à l'INRIA, au CNRS et à l'Université Henri Poincaré, via l'Institut Elie Cartan de Nancy[1] (UMR 7502 CNRS-INRIA-UHP).

Responsable scientifique
Marius Tucsnak [Professeur à l'Université Henri Poincaré de Nancy]

Assistante de projet
Hélène Zganic

Personnel INRIA
Karim Ramdani [Chargé de Recherche]
Cheng-Zhong Xu [Chargé de Recherche (jusqu'au premier septembre)]

Personnel UHP
Francis Conrad [Professeur]
Frédéric Magoulès [Maître de Conférences ESSTIN[2]]
Bruno Pinçon [Maître de Conférences ESIAL[3]]
Lionel Rosier [Professeur ESSTIN]
Jean-François Scheid [Maître de Conférences ESIAL]

Personnel INPL
Antoine Henrot [Professeur]

Personnel de l'Université de Metz
Fatiha Alabau [Professeur]
Jean-François Couchouron [Maître de Conférences]
Jean-Pierre Croisille [Professeur]

Chercheurs doctorants
Antoine Chapelon [Allocataire, moniteur UHP]
Pascal Hébrard [BDI CNRS-Région]
Takeo Takahashi [Allocataire-moniteur normalien]
Patricio Cumsille [Boursier CONICYT-INRIA]
Stephan Duprey [Bourse CIFRE avec EADS]

Chercheur post-doctorant
Alexandre Munnier [ATER UHP]

2. Présentation et objectifs généraux

CORIDA est un avant-projet commun à l'INRIA, au CNRS et à l'Université Henri Poincaré, via l'Institut Elie Cartan de Nancy (UMR 7502 CNRS-INRIA-UHP). L'activité de l'avant-projet relève du contrôle des équations modélisant des systèmes couplés complexes. Il s'agit de systèmes "hybrides" comme les couplages fluide-structure, des systèmes multi-échelles etc. Du point de vue mathématique il s'agit des systèmes contenant des équations aux dérivées partielles qui ne sont pas du même type. Les contrôles agissant sur les systèmes modélisés par des EDP peuvent être classés, suivant leur type d'action sur les solutions, dans deux grandes catégories :

1. Contrôle frontière et contrôle interne.
2. Contrôle par l'intermédiaire des coefficients des équations aux dérivées partielles. Dans ce cas, même si les équations sont linéaires, on a des problèmes de contrôle bilinéaire. Ce type de problème intervient en particulier pour le contrôle des certaines réactions chimiques.

[1] *IECN*
[2] Ecole Supérieure des Sciences et Technologies de l'Ingénieur de Nancy
[3] Ecole Supérieure d'Informatique et Applications de Lorraine

Dans les deux cas nous souhaitons développer des outils théoriques et numériques permettant d'obtenir des méthodologies adaptées aux différentes classes d'applications. On peut distinguer trois grandes catégories d'applications qui sont décrites très brièvement ci-dessous :

1. Le contrôle robuste **de canaux d'irrigation.** Il s'agit de s'attaquer à un problème très important dans les années à venir : la gestion des ressources d'eau. Nous travaillons au développement des outils permettant la gestion automatique des canaux d'irrigation. Il est très important de développer des contrôles robustes car, en général, on ne dispose pas d'estimations fiables de la consommation des utilisateurs ou du volume des précipitations.
2. **L'acoustique et l'aéro-acoustique.** Il s'agit ici de trois types d'applications :
   - La réduction du bruit en utilisant le contrôle actif (dans des enceintes fermées) ou des matériaux absorbants (autour de zones d'habitation).
   - L'aide à la sonorisation des salles en développant des outils de simulation pour assurer le confort acoustique du public (en particulier en vérifiant qu'en tout point de la salle le niveau sonore ne dépasse pas une limite fixée par la loi).
   - L'exploitation du retournement temporel pour la focalisation des ondes acoustiques.
3. **Commande des grands télescopes.** Le fonctionnement des télescopes actuels est basé sur la réception des ondes infra-rouges. La réception est inévitablement perturbée par l'atmosphère, d'où la nécessité d'une correction du front d'onde. Actuellement cette correction est réalisée par un miroir d'un diamètre d'environ 20cm muni d'un millier d'actionneurs piézo-électriques. Les télescopes du futur seront caractérisés par des diamètres beaucoup plus grands et par le fait que le spectre du front d'onde analysé fait partie du domaine visible. On estime que pour corriger l'image avec la même qualité, la densité des actionneurs devra être multipliée par cent et qu'il faudra remplacer les actionneurs piézo-électriques par des actionneurs issus de la micro-technologie. Il s'agit donc de développer des outils pour la modélisation et pour le contrôle des miroirs permettant ce passage à l'échelle.

3. Fondements scientifiques

3.1. Contrôle des interactions fluide-structure

Mots clés : *équations de Navier-Stokes*, *équations de Korteweg de Vries*.

Participants : Lionel Rosier, Jean-François Scheid, Marius Tucsnak, Cheng-Zhong Xu.

Glossaire

contrôle des interactions fluide-structure Analyse et contrôle des systèmes modélisant le mouvement de plusieurs solides (rigides ou déformables) à l'intérieur d'un fluide visqueux.

Les problèmes que nous considérons sont modélisés par des équations de type Navier-Stokes (pour le fluide) couplées aux équations des solides rigides et (ou) aux équations de l'élasto-dynamique. Une des difficultés majeures du problème réside dans le fait que le domaine de validité des équations du fluide est une des inconnues du problème. Il s'agit donc d'un problème de frontière libre.

Savoir comment agir sur un écoulement fluide est un problème d'intérêt primordial pour de nombreux domaines d'application : aéronautique, questions de pollution et d'environnement, régularisation de mouvements fluides et de vibrations dans des réservoirs ou des tuyaux, etc. Pour ce type de problèmes la réduction à un modèle de dimension finie est loin d'être immédiate. Le fluide peut être considéré comme isolé. Pour un fluide visqueux incompressible on peut utiliser les équations de Navier-Stokes (ou d'Euler dans le cas sans viscosité). Pour ce type de problèmes l'approche contrôle optimal est relativement développée, à la fois du point de vue théorique et numérique. Par contre il existe encore peu de tentatives d'appliquer la théorie des EDP pour calculer des contrôles exacts ou approchés en boucle fermée. Notre approche va dans cette direction, en se proposant de réaliser, à moyen terme, des codes pour le contrôle par feedback de différents modèles d'écoulement fluide. Le plus souvent le fluide entoure ou est contenu dans une structure élastique qui interagit avec lui. Il convient alors d'étudier des systèmes fluide-structure. Ce sujet est en pleine effervescence actuellement, grâce aux applications dans des problèmes de réduction du bruit ou dans l'aéronautique. Dans ce type de problème, un système d'EDP modélisant le fluide à l'intérieur d'une cavité (Laplace, ondes, Stokes ou Navier-Stokes) est couplé avec les équations modélisant le mouvement d'une partie du bord (corps rigide ou élastique). Les difficultés d'une telle étude sont nombreuses, car il s'agit de problèmes de type frontière libre.

Les méthodes numériques pour la résolution approchée des problèmes directs ont beaucoup progressé ces dernières années. Jusqu'à présent, les problèmes de contrôle de couplages fluide-structure n'ont été que timidement traités du point de vue numérique. Dans un premier temps nous nous proposons de développer des algorithmes permettant de traiter les modèles simplifiés intervenant dans des problèmes d'hydraulique.

Un autre problème couplé (de type fluide structure) apparaît lorsque l'on veut contrôler l'interface entre deux fluides (typiquement l'air et l'eau) en contrôlant le mouvement d'une paroi rigide. L'équation de Saint Venant peut être utilisée si l'on néglige les effets dispersifs. Si, par contre, l'on prend en considération les effets dispersifs, on doit considérer les équations de Korteweg de Vries. Enfin, rappelons que la simulation directe des équations de Navier-Stokes demeure un sujet important sur le plan numérique. Nous envisageons d'étudier dans ce but l'intérêt des schémas compacts de haute précision.

3.2. Couplage des systèmes linéaires "bien posés au sens de Petrovski" et analyse spectrale

Participants : Fatiha Alabau, Francis Conrad, Jean-François Couchouron, Marius Tucsnak, Cheng-Zhong Xu.

Mots clés : *équations d'évolution linéaires*, *stabilisation*, *mécanismes de couplage*, *commande frontière*, *bases de Riesz*.

Glossaire

couplages de systèmes linéaires et analyse spectrale analyse des couplages entre deux équations d'évolution "bien posées au sens de Petrovski"

Nous considérons des systèmes couplant deux types d'équations aux dérivées partielles ou couplant des équations aux dérivées partielles et des équations différentielles ordinaires. Les méthodes utilisées combinent les techniques des multiplicateurs et l'analyse spectrale.

Nous sommes intéressés par des problèmes faisant intervenir deux équations comme : une équation de plaques et une équation des ondes, une équation de type ondes ou plaques et des équations différentielles ordinaires, deux équations des ondes couplées par l'intermédiaire de termes d'ordre zéro. Ce type de système est désigné, dans la littérature consacrée aux systèmes gouvernés par des EDP, par le terme "système hybride". La nouveauté et l'intérêt ici est que l'opérateur de contrôle n'apparaît que dans une des équations. La question est alors de savoir, si le système complet peut être stabilisé, alors que l'on n'agit *directement* que sur une des composantes de la solution. Une possibilité pour traiter ce type de problème est de commencer par établir des propriétés de contrôlabilité du système via un problème de contrôlabilité simultanée des deux systèmes découplés. Cette approche semble particulièrement prometteuse dans le cas où un des systèmes est de dimension finie.

Une question intéressante concerne l'obtention plus explicite du taux de stabilisation, en fonction des lois de feedback. Les ingénieurs mesurent le degré de stabilisation d'un système amorti en calculant le spectre (approché) du système. Il est donc intéressant de savoir si ce spectre caractérise effectivement le taux de décroissance uniforme de l'énergie. Ce problème est non trivial pour les systèmes de dimension infinie, même si le système est gouverné par une EDP d'évolution en dimension un d'espace. Une analyse spectrale fine peut permettre de vérifier dans certains cas que les modes propres du système constituent une base de Riesz de l'espace d'énergie, et d'en déduire le taux optimal de décroissance de l'énergie.

3.3. Optimisation de la géométrie des capteurs et des actionneurs pour des systèmes distribués

Mots clés : *taux de décroissance*, *robustesse*.

Participants : Pascal Hébrard, Antoine Henrot.

Nous nous proposons d'élaborer des algorithmes permettant d'améliorer les performances des capteurs et des actionneurs en choisissant d'une manière optimale leur position et leur forme. On souhaite contrôler une structure vibrante à l'aide d'un feedback distribué, soit sur un sous-domaine interne, soit sur une partie de la frontière. Le problème qui se pose alors est de savoir où positionner et quelle forme donner à la zone de contrôle pour optimiser un critère imposé par l'utilisateur. Ce critère peut être lié au taux de décroissance de l'énergie ou à la robustesse du contrôle. La topologie du domaine optimal étant *a priori* inconnue, il est souhaitable de faire appel dans un premier temps à des méthodes du type optimisation topologique. En sus de résultats théoriques sur le problème, une approche numérique sera envisagée.

En particulier nous nous intéressons aux problèmes issus du contrôle des structures par des matériaux intelligents. Il s'agit de trouver la localisation et la forme à donner aux actionneurs et contrôleurs pour que le contrôle soit le plus efficace possible.

3.4. Approche fréquentielle pour des systèmes gouvernés par des EDP

Mots clés : *Equation de Helmholtz*, *contrôlabilité*, *focalisation acoustique*.

Participants : Karim Ramdani, Marius Tucsnak.

On s'intéresse à l'utilisation d'outils fréquentiels dans le cadre de deux types de problématiques : l'étude de la contrôlabilité de certains problèmes gouvernés par des EDP d'une part, et l'étude du phénomène du retournement temporel d'autre part.

Il s'agit ici d'exploiter des techniques de type fréquentiel pour analyser des systèmes décrits par des EDP. Dans ce cadre, deux types de problèmes sont abordés. Le premier d'entre eux concerne l'étude de la contrôlabilité. L'approche suivie ici est fondée sur une caractérisation originale des systèmes contrôlables récemment proposée par K. Liu. Cette caractérisation est originale au sens où elle fournit un critère de contrôlabilité (pour des problèmes dépendant du temps) qui **ne fait pas intervenir la variable temporelle**, mais la **variable fréquentielle** qui lui est conjuguée. Ainsi, pour étudier la contrôlabilité d'un système, on est amené à établir des estimations uniforme en fréquence, et donc à faire une analyse haute fréquence du problème (typiquement pour l'opérateur de Helmholtz).

La seconde problématique dans laquelle est utilisée l'analyse fréquentielle concerne l'étude du retournement temporel. Ce phénomène physique consiste à exploiter la réversibilité de l'équation des ondes en milieu non dissipatif pour **focaliser une onde acoustique** à travers un milieu complexe et/ou inconnu. L'idée principale consiste alors à utiliser des **miroirs à retournement temporel** pour mesurer un signal acoustique émis par une source (ou renvoyée par des obstacles contenus dans un milieu de propagation), le retourner temporellement puis le ré-émettre. L'itération de ce processus conduit à une focalisation de l'onde acoustique vers la source (ou les obstacles). Il va sans dire que les applications de ce phénomène sont très nombreuses, et recouvrent des domaines applicatifs aussi divers que la médecine (destruction de calculs rénaux par lithotritie ou imagerie du cerveau), la communication sous-marine ou encore le contrôle non destructif. Si l'on s'intéresse au régime harmonique en temps, on est là aussi amené à étudier plus précisément l'opérateur de Helmholtz, notamment en domaine non borné, ce dernier point constituant la difficulté majeure de l'analyse mathématique.

3.5. Implémentation

Mots clés : *discrétisation*, *équation de Riccati*.

Participants : Antoine Chapelon, Pascal Hébrard, Frédéric Magoulès, Bruno Pinçon.

Il s'agit ici d'un axe de recherche transversal, dans la mesure où chacun des axes précédents comporte une importante partie d'implémentation. Nous avons estimé utile de dégager ici les points communs pour l'implémentation de différentes méthodologies pour le calcul des contrôles. Dans des nombreux problèmes l'utilisation de capteurs et d'actionneurs co-localisés permet de donner des lois de feedback très simples. Il n'est pas immédiat d'établir l'efficacité de ce type de méthodes par une analyse théorique car les constantes intervenant dans les estimations sont souvent difficiles à estimer. C'est pour cette raison qu'on se propose d'utiliser la simulation numérique pour estimer les taux de décroissance et éventuellement de trouver le positionnement optimal des actionneurs.

Une autre méthode pour le calcul du feedback passe par la résolution approchée d'une équation de Riccati en dimension infinie.

Pour un problème de stabilisation on a à résoudre une équation de Riccati algébrique tandis que pour la contrôlabilité exacte on doit trouver la solution d'une équation de Riccati d'évolution. L'approche classique, implémentée, entre autres, par T. Banks et ses collaborateurs, est de considérer un problème LQR en dimension finie et de résoudre l'équation de Riccati algébrique associée. En général, il est loin d'être clair qu'une telle méthode est convergente. Il existe des exemples montrant que la solution exacte du problème de contrôle optimal n'est pas la limite des solutions des équations de Riccati associées aux systèmes approchés. C'est pour cette raison que nous nous proposons de discrétiser "le plus tard possible".

Par ailleurs, les logiciels actuels pour la résolution de l'équation de Riccati algébrique fonctionnent bien pour des dimensions relativement petites. Dans le cas de systèmes provenant de la discrétisation des problèmes d'équations aux dérivées partielles les méthodes actuelles pour la résolution de l'équation de Riccati algébrique ne donnent pas de résultats satisfaisants. Les tests réalisés, entre autres, par A. Chapelon, montrent que, dans certaines situations, il est préférable de passer par une équation **différentielle** de Riccati. La résolution de l'équation de Riccati d'évolution peut être vue comme un moyen efficace pour approcher la solution de l'équation de Riccati algébrique ou elle peut être utilisée directement pour le calcul du contrôle.

L'implémentation des contrôles via l'équation de Riccati d'évolution pose des problèmes nouveaux. Compte tenu du fait que, par discrétisation spatiale, un problème exactement contrôlable peut donner un problème complètement instable, nous nous proposons d'utiliser la pénalisation pour nous ramener à un problème LQR à horizon fini (mais toujours en dimension infinie). Ce problème reste bien posé après discrétisation spatiale. Le contrôle calculé ainsi n'est pas un contrôle exact mais il est robuste, tout en permettant de réduire l'énergie d'une manière significative. Cet objectif est tout à fait satisfaisant du point de vue des applications.

Pour que cette méthodologie soit effectivement applicable, il est nécessaire de réaliser un maximum de calculs hors ligne. Il s'agit surtout de réaliser des logiciels permettant d'approcher la solution de l'équation de Riccati d'évolution en dimension infinie. Toutefois il reste un volume important de calculs en ligne, notamment la résolution numérique du problème en boucle fermée.

4. Domaines d'application

4.1. Panorama

Mots clés : *hydraulique*, *acoustique*, *commande de grandes télescopes*.

D'une manière générale on se propose de développer des outils théoriques et numériques permettant de traiter des applications significatives. Nous ne souhaitons pas nous cantonner à un seul type d'application, mais plutôt développer une méthodologie permettant d'aborder des applications présentant des caractéristiques communes. Cependant, une attention particulière sera accordée aux trois domaines d'applications décrits ci-dessous.

4.2. Hydraulique

Mots clés : *canaux d'irrigation*, *équations de Saint-Venant*, *contrôle robuste*.

Il s'agit de modéliser et de contrôler des systèmes de canaux d'irrigation. On veut contrôler le niveau d'eau dans un canal d'irrigation en agissant sur l'ouverture des vannes. Le contrôle doit être robuste par rapport aux perturbations comme les prélèvements effectués par les différents utilisateurs. Nous nous proposons d'utiliser des méthodes provenant essentiellement de l'automatique linéaire en dimension infinie. Les contrôles obtenus ainsi seront testés sur le problèmes non linéaires. Cette approche est complémentaire à celle envisagée dans le Projet Congé, qui utilise surtout des méthodes d'automatique non-linéaire, mais essentiellement sur des modèles réduits en dimension finie.

Les systèmes que nous considérons sont modélisés par des équations hyperboliques de type Saint-Venant (eaux peu profondes). Les premiers résultats sur le problème linéarisé sont déjà disponibles (C.Z. Xu avec B. Chentouf). Nous nous proposons de développer ce travail, en particulier en ce qui concerne la robustesse et les méthodes de calcul. En particulier, nous travaillons sur la construction des contrôleurs H^∞ pour un système formé par un seul bief. Une difficulté majeure du problème réside dans le caractère non borné des opérateurs de contrôle et d'observation. Cette caractéristique du système rend nécessaire une étude approfondie des équations de type Riccati associé au contrôle optimal ou au contrôle H^∞.

Actuellement, pour valider les lois de contrôle obtenues on effectue des tests numériques sur le système complet.

Un deuxième type d'application à l'hydraulique est fourni par le modèle de Hayami concernant les systèmes fluviaux. Les chercheurs du projet concernés par ce travail sont A. Chapelon, M. Tucsnak et C.Z. Xu.

Sur ces problèmes nous avons des contacts avec le CEMAGREF de Montpellier (X. Litrico) et avec le Centre de Robotique de l'Ecole de Mines de Paris.

4.3. Acoustique

Mots clés : *niveau sonore*, *réduction du bruit*, *équation des ondes*, *équation de Helmholtz*, *actionneurs piézo-électriques*, *retournement temporel*.

D'une manière très simplifiée on peut formuler trois types de problèmes :

1. **Aide à la sonorisation des salles** ;
2. **Réduction du bruit** ;
3. **Retournement temporel**

4.3.1. Aide à la Sonorisation des salles

La sonorisation d'une salle consiste à positionner des hauts-parleurs et éventuellement des paravents de façon à assurer un confort acoustique dans la partie de la salle réservée aux auditeurs et, à un autre degré, aux musiciens. Elle consiste également, et cette tendance s'intensifiera dans les années à venir, à vérifier et à garantir qu'en tout point de la salle (voire à l'extérieur), la puissance acoustique ne dépasse pas une valeur maximale fixée par la loi.

Nous nous proposons de concevoir un code 3D pour le calcul de la pression acoustique dans un volume à partir de la connaissance de la géométrie du volume et des coefficients d'absorption et de réflexion des surfaces délimitant le volume. A partir de ce code nous allons nous attaquer au problème de l'optimisation de la position des sources. Les critères d'optimalité seront définis en accord avec nos collaborateurs acousticiens de SUPELEC Metz et de l'entreprise MPM de Metz.

Les membres de l'équipe travaillant sur cette application sont F. Magoulès et K. Ramdani.

4.3.2. Réduction du bruit

Il s'agit de réduire le bruit dans une enceinte en utilisant des capteurs et des actionneurs situés sur des parties flexibles de la frontière de cette enceinte. Les modèles utilisés comportent un système formé par une équation de type ondes et des équations de la mécanique de fluides pour l'enceinte et des équations de type plaque ou coque pour les parties flexibles de la frontière. Il s'agit ici d'un cas particulier des interactions fluide-structure. L'application de nos techniques de modélisation et le contrôle du bruit généré par les moteurs d'avions civils (de type AIRBUS) fait l'objet de la thèse de S. Duprey (bourse CIFRE avec EADS). Nous nous intéressons aux capteurs et aux actionneurs faisant intervenir des matériaux intelligents, comme les piézoélectriques ou les alliages avec mémoire de forme. Pour la modélisation de capteurs et des actionneurs nous envisageons de collaborer avec le Laboratoire de Physique de Milieux Ionisés (LPMI) de l'Université Henri Poincaré de Nancy (P. Alnot) et avec les laboratoires LPM et LSG2M de l'Ecole de Mines de Nancy. Les membres de l'équipe travaillant sur cette application sont S. Duprey, A. Henrot, F. Magoulès, K. Ramdani et M. Tucsnak. Le travail présenté ci-dessus sera réalisé en partenariat avec l'ONERA et l'EADS. Nous avons également pris contact avec Hutchinson. Nous nous proposons d'intégrer dans ces logiciels des modules permettant de prendre en considération la présence des matériaux intelligents, comme les piézo-électriques ou les alliages à mémoire de forme.

Un autre problème du même type est la réduction des nuisances sonores (causées, par exemple, par l'arrivée du TGV en Lorraine) dans des zones d'habitation, en utilisant des matériaux absorbants ou des sources d'antibruit. Du point de vue modélisation la principale différence par rapport au cas précédent est que les équations sont posées dans tout l'espace. Nous nous proposons, en particulier, d'optimiser le profil du matériau absorbant pour obtenir un effet maximal avec une quantité donnée de matériau. Ce travail sera réalisé par P. Hébrard, A. Henrot, F. Magoulès et M. Tucsnak. La réalisation d'un logiciel qui permet simultanément la visualisation en 3D de la position de l'observateur et la synthèse du bruit entendu par l'observateur fait l'objet d'un projet que F. Magoulès réalisera dans le cadre du Centre Charles Hermite.

4.3.3. Retournement temporel

Le retournement temporel d'ondes acoustiques a connu ces dernières années un regain d'intérêt considérable dans des domaines d'application très variés, qui vont de l'imagerie médicale ultrasononore au contrôle non destructif, en passant par l'acoustique sous-marine. L'idée centrale de ce phénomène est d'utiliser la **réversibilité** de l'équation des ondes dans un milieu non dissipatif pour ré-émettre « à l'envers » un signal acoustique émis par une source : on parle alors de « miroir à retournement temporel ».

Nous nous sommes intéressés aux techniques de **retournement temporel** développées notamment dans le laboratoire Ondes et Acoustique (LOA) de l'ESPCI, et plus particulièrement à la méthode dite de Diagonalisation de l'Opérateur de Retournement Temporel (D.O.R.T.). Cette méthode possède un certain nombre d'applications médicales, notamment celle de détecter puis de détruire des calculs rénaux par des chocs acoustiques. Pour ce faire, il faut pouvoir **focaliser** une onde émise par un réseau de transducteurs ultrasonores sur l'un des calculs. Ceci est réalisé grâce à un dispositif électronique permettant de ré-émettre « à l'envers » un signal acoustique reçu par le réseau, c'est à dire en renversant le sens de l'écoulement du temps : en régime périodique établi, il s'agit d'une simple opération de conjugaison. En particulier, lorsqu'on itère ce procédé, le signal se focalisera vers l'obstacle le plus visible.

4.4. Commande des grands télescopes

Mots clés : *optique adaptative*, *front d'onde*, *turbulence*, *commande robuste*.

L'objectif de ce travail est l'utilisation des outils d'automatique en dimension infinie pour la commande des grands télescopes. Les télescopes du futur seront caractérisés par des grands diamètres et par le fait que le spectre du front d'onde analysé fait partie du domaine visible. On estime que pour corriger l'image avec la même qualité, la densité des actionneurs devra être multipliée par cent et qu'il faudra remplacer les actionneurs piézo-électriques par des actionneurs issus de la micro-technologie.

Un télescope muni d'actionneurs et de capteurs peut, en principe, être modélisé comme un système de dimension finie. Lorsque le nombre de capteurs et d'actionneurs devient très grand il est souvent difficile d'utiliser ce type de modélisation pour commander le télescope.

Notre premier objectif est d'obtenir, par des techniques d'analyse asymptotique, des modèles basés sur des systèmes d'équations au dérivées partielles, avec contrôle distribué. En fonction de la structure du système obtenu nous nous proposons d'appliquer des techniques modernes issues de la théorie du contrôle des systèmes de dimension **infinie**. L'entrée et la sortie du système resteront de dimension finie ce qui permettra l'application directe des résultats au système initial. Les systèmes obtenus vont coupler des équations modélisant la structure et les équations modélisant les capteurs et les actionneurs (par exemple les équations de l'électrostatique). Une des difficultés du problème réside dans le fait que le contrôle intervient uniquement dans une des équations du système. Une attention particulière sera accordée aux problèmes de positionnement optimal des zones de contrôle. Il s'agit de trouver la localisation et la forme à donner aux actionneurs et aux capteurs pour que le contrôle soit le plus efficace possible.

5. Logiciels

5.1. Boite à outils SCISPT de SCILAB

Participant : Bruno Pinçon [correspondant].

Mots clés : *SCILAB*, *matrices creuses*.

SCISPT est une boite à outils SCILAB qui interface les solveurs creux umfpack v3.1 de Tim Davis et taucs snmf de Sivan Toledo et qui propose des fonctions utiles pour le traitement des matrices creuses.

SCISPT est une boite à outils SCILAB qui interface les solveurs creux umfpack v3.1 de Tim Davis et taucs snmf de Sivan Toledo et qui propose des fonctions utiles pour le traitement des matrices creuses. Le développement de cette boite à outils fait partie d'un programme plus vaste concernant la création de boites à outils SCILAB pour la résolution et le contrôle des systèmes gouvernés par des EDP. Ce travail pourra être effectué dans le cadre des collaborations avec des partenaires faisant partie du consortium SCILAB récemment créé.

5.2. Parallel Computational Acoustic Library

Participant : Frédéric Magoulès.

Il s'agit d'une librairie pour la résolution des problèmes d'acoustique écrit en C++ en utilisant une programmation orienté objet, et des algorithmes vectoriels. L'originalité de nos travaux consiste à travailler directement sur le problème discret. Ainsi, les méthodes développées peuvent s'appliquer sans modification aussi bien pour des problèmes d'acoustique que pour des problèmes d'élasticité linéaire [17], [16]. Un couplage avec des outils de visualisation graphique VTK a été réalisé [19]. Toutefois, dans le domaine de l'acoustique, il semble plus efficace de disposer d'un rendu sonore de la simulation [24] que de données graphiques. Pour cette raison, une interface sonore a également été développée [18].

Les performances d'une version de démonstration ont été comparées à celles obtenues par un code écrit en Fortran 90 puis avec celles obtenues par un code écrit en Matlab. Pour finir, une approche mixte basée sur des langages de type Python a été envisagée. Notre objectif à moyen terme est d'interfacer ce code avec un code "réalité virtuelle" pour permettre simultanément la visualisation de la position d'un observateur à l'intérieur d'une enceinte et la simulation du champ acoustique dans le point considéré.

6. Résultats nouveaux

6.1. Contrôle des interactions fluide-structure

Mots clés : *équations de Navier-Stokes*, *de Saint-Venant*, *de Korteweg-de Vries*, *mouvement rigide*.

Participants : Antoine Chapelon, Lionel Rosier, Jean-François Scheid, Takéo Takahashi, Marius Tucsnak, Cheng-Zhong Xu.

Les réalisations des membres du projet concernent le caractère bien posé des équations modélisant le mouvement de plusieurs solides rigides à l'intérieur d'un fluide visqueux incompressible. Le résultat le plus important dans cette direction donne l'existence globale des solutions faibles, en présence des collisions. Ce résultat a été prouvé dans l'article [14] publié dans Archive for Rational Mechanics and Analysis. Des résultats d'existence des solutions fortes ainsi que l'analyse numérique du problème ont constitué le travail de thèse de T. Takahashi [4], qui a été soutenue le 9 décembre 2003. L'existence et l'unicité globale des solutions fortes au cas d'un écoulement bidimensionnel ont été prouvé dans [26]. Nous travaillons actuellement sur des problèmes de contrôle associés à ce système. Nous avons également conçu une méthode numérique adapté à ce problème. Nous travaillons actuellement sur les problème de convergence et sur l'optimisation du code numérique obtenu.

Lorsque le fluide est parfait, sa dynamique est décrite par les équations d'Euler. D'une part, nous avons analysé la propagation des tourbillons dans un fluide parfait (cf. [25]). D'autre part, nous avons montré l'existence locale de solutions classiques pour le mouvement d'une boule dans un fluide parfait incompressible bidimensionnel évoluant dans un domaine borné. Nous travaillons actuellement sur le problème de l'unicité des solutions, sur l'existence des solutions pour tout temps, et sur le contrôle du mouvement de la boule.

Des techniques similaires sont également utilisées pour les problèmes de transitions de phase. Il s'agit d'étudier des phénomènes de solidification d'alliages métalliques par des modèles de type *phase-field* (champ-de-phase). Les modèles considérés sont mathématiquement décrits par des systèmes d'équations d'évolution non linéaires. Nous nous sommes intéressés à la résolution numérique de tels systèmes par des méthodes d'éléments finis, en établissant notamment la convergence de ces schémas par des estimations d'erreurs *a priori* [23].

Dans un thème voisin nous avons considéré les problèmes de stabilisation associés aux équations de Saint-Venant (eau peu profondes). Puisque le modèle linéarisé considéré dans la littérature n'est qu'une approximation de la dynamique fortement non-linéaire du canal nous avons été amenés à utiliser le principe de linéarisation, bien connu en dimension finie. Les problèmes de contrôle LQ et H^∞ associés font l'objet de la thèse de A. Chapelon [1] qui a été soutenue en octobre 2002.

En ce qui concerne le problème du contrôle de la surface libre d'un fluide par une paroi mobile, nous avons obtenu un résultat de contrôlabilité à zéro, ce qui signifie que l'on peut neutraliser des solitons en agitant convenablement une paroi mobile. Nous travaillons actuellement avec Jaime Ortega (Santiago du Chili) sur la conception d'une commande en boucle fermée, i.e. par feedback. Enfin nous avons obtenu des estimations sur le comportement à l'infini pour les solutions du problème de controllabilite à zéro d'une équation de type dispersif (KdV, Schrödinger) [15].

Le travail de J.P.- Croisille étudie des schémas compacts pour la simulation numérique des équations de Navier-Stokes et il est effectué actuellement dans le contexte des équations de convection-diffusion. Dans ce domaine, plusieurs schémas nouveaux ont été développés et sont actuellement utilisés dans un code de calcul prototype MATLAB. (thèse de Isabelle Greff, Metz).

6.2. Couplage des systèmes linéaires "bien posés au sens de Petrovski" et analyse spectrale

Participants : Fatiha Alabau, Francis Conrad, Jean-François Couchouron, Marius Tucsnak, Cheng-Zhong Xu.

Le problème étudié dans [6] est la stabilisation interne indirecte de deux équations bien posées au sens de Petrovski couples faiblement. Dans ce cas, contrairement au cas du contrôle frontière, l'opérateur de feedback est un opérateur borné. On montre sur le problème abstrait que l'énergie des solutions régulières décroît polynomialement à l'infini sous des hypothèses autorisant bien plus de possibilités de couplage que dans le cas frontière : ondes-Petrowsky, Petrowsky-ondes etc.

Dans [5] on étudie le problème de la stabilisation indirecte pour des systèmes couplés comme ci-dessus, mais avec un feedback frontière. La dissipation de l'énergie n'a donc lieu que sur une partie du bord du domaine et donc l'opérateur de feedback n'est plus un opérateur borné. On montre sous des hypothèses de compatibilité sur les opérateurs de chaque équation que le système total est stabilisé polynomialement à l'infini.

Dan un autre travail Alabau étudie l'observabilité et la contrôlabilité exacte indirecte frontière de deux équations des ondes faiblement couples. On considère maintenant le problème de l'observabilité indirecte, i.e. on couple deux équations des ondes et on veut savoir si l'observation par exemple de la trace de la dérivée normale de la première composante sur une partie du bord (vérifiant les conditions de Bardos-Lebeau-Rauch) permet de « restituer » les données initiales. On montre sous des hypothèses classiques sur le domaine sur lequel on observe que ceci est possible. L'application de la méthode HUM de Lions nous permet ensuite d'en déduire un résultat de contrôlabilité exacte indirecte, i.e. en appliquant un contrôle sur une seule des deux composantes, on peut ramener le système complet à l'équilibre au bout d'un temps $T_0 > 0$ explicite. Ces résultats ne peuvent se déduire des résultats de stabilisation précédents et requièrent d'autres techniques.

En ce qui concerne le couplage des systèmes de dimension infinie et des systèmes de dimension finie nous avons considéré plusieurs problèmes. D'une part, nous avons étudié le comportement asymptotique de systèmes avec bouclage sur l'état, non coercifs. Typiquement, lorsque dans la commande on ne prend pas en compte le terme de position. Dans ce cas le système admet les constantes comme solutions, voire des solutions affines en temps et en espace, ou encore plus exotiques. Pour un modèle de pont roulant (câble flexible attaché à un chariot et transportant une masse), avec un feedback uniquement en vitesse, par différentes approches selon que le feedback est linéaire ou non, on a la convergence vers une constante qui dépend de la condition initiale [10]. Pour un modèle de poutre déformable en torsion, avec un feedback contenant un terme intégral mais pas de terme de position à l'extrémité, on a le même type de résultat [9]. Ici la difficulté vient du fait que non seulement l'énergie naturelle n'est qu'une semi-norme, mais ce n'est pas une fonction de Lyapounov. On construit une nouvelle fonctionnelle, somme d'un terme équivalent à l'énergie et d'une fonctionnelle qui reste constante sur les trajectoires. On a convergence exponentielle.

Par ailleurs nous avons travaillé sur la construction des observateurs pour des systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles non linéaires. Cette question nécessite l'utilisation de techniques fines d'analyse fonctionnelle (théorèmes de points fixes de type Mönch, théorie du degré topologique) et elle fait l'objet de l'habilitation de J.F. Couchouron [2] ainsi que des articles [12], [13], [20].

D'autre part nous avons poursuivi les travaux liés à l'analyse spectrale. L'obtention du taux optimal de décroissance de l'énergie pour un modèle élastique avec un contrôle dissipatif peut s'obtenir par exemple si on sait démontrer qu'un système de vecteurs propres généralisés du modèle forme une base de Riesz de l'espace d'énergie. Ce dernier point peut parfois se vérifier par analyse précise du spectre du système (basses et hautes fréquences) et utilisation de résultats de perturbation. Ceci a été réalisé pour un modèle de corde avec contrôle en position et vitesse à un bout, avec Dirichlet ou Neumann à l'autre bout [8]. Cette méthode devient en général difficile à utiliser pour des problèmes plus complexes avec des contrôles frontière (contrôle d'ordre plus élevé, systèmes hybrides). Nous avons utilisé la théorie de Shkalikov, qui donne un cadre général pour vérifier qu'un système de vecteurs propres généralisés forme une base de Riesz de l'espace d'énergie. La technique est particulièrement adaptée aux systèmes où la valeur propre apparaît dans les conditions au bord, ce qui se produit pour des contrôles frontière dynamiques. Adaptant cette technique, nous avons traité le cas d'une poutre encastrée à un bout, avec ou sans masse à l'autre bout, avec un contrôle moment fonction de la vitesse de rotation à ce bout [11].

Par ailleurs les techniques d'analyse spectrale nous ont permis d'obtenir de résultats nouveaux sur la stabilisation ponctuelle de poutres élastiques. Nous anons prouvé dans [7] que pour une poutre modélisée par l'équation de Bernoulli Euler on a la stabilité exponentielle pour toute position de l'actionneur, à condition qu'on agisse simultanément par une force et par un moment. Si la poutre est modélisée par l'équation de Rayleigh nous avons mis en évidence un taux de décroissance polynomiale, valable pour toute position de l'actionneur.

Finalement dans [21] nous avons introduit une nouvelle méthode pour la stabilisation des EDP par des feedbacks localement dégénérés.

6.3. Optimisation de la géométrie des capteurs et des actionneurs pour des systèmes distribués

Participants : Pascal Hébrard, Antoine Henrot.

Nous nous sommes intéressés à des problèmes issus du contrôle des structures par des matériaux intelligents. Il s'agit de trouver la localisation et la forme à donner aux actionneurs et aux capteurs pour que le contrôle soit le plus efficace possible. Les critères et les équations d'état peuvent varier. Ces questions ont fait l'objet de la thèse de P. Hébrard [3] qui a été soutenue le 8 novembre 2002. Indiquons ci-dessous quelques uns des résultats les plus importants de cette thèse. Une partie des résultats décrits ci-dessous vont paraître dans [22].

Dans ce travail, nous avons commencé par le modèle le plus simple qu'on puisse imaginer dans ce contexte : celui d'une corde vibrante sous l'effet d'une perturbation initiale. La loi régissant l'amortissement est un feedback classique en vitesse qui agit seulement sur une partie de la corde (c'est-à-dire là où sont positionnés les actionneurs). La contrainte porte sur la taille totale de cette partie de la corde sur laquelle on agit et que nous appellerons *la zone de contrôle*. Il est facile de vérifier que dans ces conditions l'énergie totale du système décroît de façon exponentielle. Quantitativement, le nombre qui rend bien compte de la rapidité avec laquelle le système va se stabiliser est *le taux de décroissance de l'énergie*. Dans les bons cas (par exemple quand la zone de contrôle est constituée d'un nombre fini d'intervalles), ce taux de décroissance n'est autre que l'abscisse spectrale de l'opérateur. Notre critère à minimiser sera donc ce taux de décroissance.

Tout d'abord, nous avons mené de front une étude théorique de ce problème avec des simulations numériques. Nous avons considéré le cas où au lieu de chercher à agir sur l'ensemble des modes propres de vibration, on ne s'intéresse qu'à un nombre fini d'entre eux. C'est en général le point de vue retenu par les ingénieurs. Dans ce contexte, nous avons obtenu des résultats qui sont certainement les plus significatifs pour les applications concrètes. Nous montrons :

- Quand on se fixe le nombre de modes propres à contrôler, mettons N, il existe un domaine optimal unique ω_N^*.
- Des études numériques (cf par exemple la thèse de E. Degryse ou des calculs faits par P. Hébrard) laissaient entendre que cette approche *de type ingénieur* avaient un gros défaut : le domaine optimal ω_N^* semblait être relativement mauvais pour la première fréquence propre « oubliée » λ_{N+1}. Nous en donnons une preuve mathématique dans le cas où la longueur de la zone de contrôle tend vers 0. C'est une sorte de phénomène de *spill-over*. Cette partie du travail va faire l'objet d'un article spécifique.

La seconde partie du travail a porté sur la stabilisation d'une membrane (cadre bi-dimensionnel). Ce cas est évidemment plus réaliste que celui d'une corde. Il est aussi beaucoup plus compliqué. L'une des raisons en est la suivante : le taux de décroissance de l'énergie, qui apparaît comme le bon critère à prendre en compte, ne s'exprime pas seulement ici en fonction de l'abscisse spectrale, mais fait intervenir une autre quantité géométrique assez délicate à manipuler (dite quantité « Bardos-Lebeau-Rauch » dans la littérature mathématique). Le calcul effectif de cette quantité géométrique est très malaisé de par sa définition (limite sup d'un inf). Dans un travail avec E. Humbert, P. Hébrard a montré que dans la définition précédente, on pouvait intervertir la limite sup et l'inf. Cela a permis de rendre le calcul de cette quantité géométrique beaucoup plus simple (en distinguant les rayons à pente rationnelle de ceux à pente irrationnelle et en utilisant un théorème ergodique classique).

Comme dans le cas de la dimension 1, nous avons également étudié de façon théorique et numérique la quantité liée à l'abscisse spectrale. Les résultats sont similaires (mais évidemment techniquement plus difficiles à obtenir). L'approche numérique utilise ici aussi des algorithmes génétiques. Mais cette fois, le nombre de variables étant beaucoup plus important, la technique utilisée est différente. Elle utilise une représentation du domaine recherché soit sous forme d'un tableau de bits (on maille la membrane à l'aide de petits carrés et on mets 1 si le carré fait partie de la zone de contrôle et 0 sinon), soit à l'aide de diagrammes de Voronoi.

6.4. Approche fréquentielle pour des systèmes gouvernés par des EDP

Participants : Karim Ramdani, Marius Tucsnak.

Comme cela a déjà été précisé, nous nous sommes intéressés aux techniques de **retournement temporel** développées dans le laboratoire Ondes et Acoustique (LOA) de l'ESPCI, et plus particulièrement à la méthode dite de Diagonalisation de l'Opérateur de Retournement Temporel (D.O.R.T.). Cette technique repose sur l'observation **expérimentale** selon laquelle le nombre d'obstacles est égal au nombre de valeurs propres non nulles de l'opérateur de retournement temporel, les vecteurs propres associés permettant de focaliser de manière sélective sur les différents obstacles. A ce jour, ce phénomène n'a été expliquée que pour un modèle simpliste où les obstacles diffractant sont supposés ponctuels, et leurs interactions sont négligées. Il semble qu'aucune étude théorique n'ait été réalisée pour un modèle plus réaliste. C'est la question que nous commençons à aborder dans le cadre d'une collaboration récente avec Christophe Hazard du laboratoire SMP (CNRS-ENSTA, Paris), et Chokri Ben Amar et Nabil Gmati du laboratoire LAMSIN (ENIT, Tunis). Cette collaboration se fait dans le cadre d'un accord CMCU (Comité Mixte Franco-Tunisien pour la Coopération Universitaire CMCU) du CNRS.

Le point de départ de cette étude concerne le cas où le miroir à retournement temporel est repoussé à l'infini, c'est-à-dire qu'il mesure le champ lointain d'une onde diffractée, sans perturber cette onde. Les résultats obtenus dans ce cadre confirment ceux de l'approche simpliste. Par une étude du comportement asymptotique de l'amplitude de diffusion associées à une famille (finie) d'obtacles sphériques, nous avons montré que lorsque leurs rayons sont petits devant la longueur d'onde ainsi que devant les distances qui les séparent, les éléments propres de l'opérateur de retournement temporel permettent de focaliser de façon sélective sur chacun d'eux.

De nombreuses questions demeurent cependant en suspens. Premièrement, l'étude semble plus délicate pour un miroir réel qui mesure un champ acoustique à distance finie des obstacles. Deuxièmement, la compréhension des liens entre les points de vue transitoire et périodique du retournement temporel demande une analyse plus fine (ce point faisant l'objet de la thèse que Chokri Ben Amar vient de débuter). Enfin, la simulation numérique du phénomène en harmonique et en transitoire nécessite l'utilisation de techniques appropriées.

8. Actions régionales, nationales et internationales

8.1. Actions régionales

8.1.1. Responsabilités nationales et locales assurées par les membres du projet :

A l'Inria : Membre de la Commission d'Evaluation de l'INRIA, participation aux sections d'audition pour le concours CR2 INRIA en Lorraine et à Rocquencourt et membre du comité des Projets de l'Inria-Lorraine (M. Tucsnak).

Dans les instances universitaires et Cnrs : Responsable de la maîtrise et du DEA de mathématiques de l'UHP (F. Conrad), Commission de spécialistes 25 ème et 26 ème sections de l'Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy II et INPL (F. Conrad, A. Henrot) ; Commission de spécialistes de l'Université de Metz (A. Henrot) ; Commission de spécialistes de l'Université de Strasbourg (F. Conrad).

8.2. Actions européennes

Nous avons obtenu de la part du CNRS une action de coopération avec la Grande Bretagne. Le correspondant anglais et G. Weiss de Imperial College. Les membres de notre équipe participant à cette action sont F. Conrad, M. Tucsnak et C.-Z. Xu.

8.3. Visites et invitations de chercheurs

J. San Martin (Santiago), G. Weiss (Londres), E. Fernandez Cara (Seville).

9. Diffusion des résultats

9.1. Participation à des colloques, séminaires, invitations

9.1.1. Congrès internationaux

F. Alabau :

Décembre 2002 : CDC02, Las Vegas.

J-F. Scheid :

Février 2002 : Free Boundary Problems, Trento (Italie).

9.1.1.1. Conférence invitée

B. Pinçon :

Octobre 2002 : Tutorial du 6eColloque Africain sur la Recherche en Informatique (CARI), Université de Yaoundé (Cameroun).

M. Tucsnak :

Septembre 2002 : Ecole Internationale d'Automatique de Lille " Contrôle de systèmes à paramètres répartis : Théories et Applications" ;
Septembre 2002 : "ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF DIFFERENTIAL SYSTEMS", Constanţa, Roumanie
Novembre 2002 : Ecole d'Ete CEA-EDF-INRIA "Avancees recentes en controle robuste", Rocquencourt

9.1.2. Professeur Invité

F. Magoulès :

Décembre 2002 : Department of Mechanical and Chemical Engineering, Heriot-Watt University (Edinburgh).

K. Ramdani :

Décembre 2002 : Laboratoire LAMSIN (ENIT), Tunis.

L. Rosier :

Novembre 2002 : Department of Mathematics, Rutgers.

M. Tucsnak :

Avril 2002 : Imperial College, Londres
Juillet 2002 : Tata Institute for Advanced Sciences, Bangalore, Inde

9.1.3. Editeurs associés aux journaux internationaux

Les membres de l'équipe font partie ou vient d'être nommés membres de comités de rédaction de plusieurs journaux.

- L. Rosier est éditeur associé à "ESAIM COCV" :
- M. Tucsnak est éditeur associé à "SIAM Journal on Control" ;
- C.Z. Xu est éditeur associé à "IEEE Transactions on Automatic Control"

9.2. Enseignement

La majorité des membres du projet sont des enseignants-chercheurs et s'investissent donc largement dans des enseignements universitaires :

- licence de mathématiques : Analyse numérique (M. Tucsnak)
- maîtrise de mathématiques : Distributions, (M. Tucsnak)
- maîtrise de mathématiques : Analyse, (F. Conrad)
- Cours de D.E.A. : EDP (A. Henrot, L. Rosier, M. Tucsnak)

- Cours de D.E.S.S. - I.M.O.I : Optimisation non linéaire (F. Conrad).
- Cours de D.E.S.S. - I.M.O.I : Compléments d'analyse numérique (B. Pinçon, J-F. Scheid).
- Cours de D.E.S.S. - I.M.O.I : Modélisation (M. Tucsnak)
- Cours de D.E.S.S. - I.M.O.I : Méthode des éléments finis (K. Ramdani)

10. Bibliographie

Thèses et habilitations à diriger des recherche

[1] A. CHAPELON. *Equation de Riccati et contrôle de systèmes gouvernés par des EDP.* Thèse de l'Université Henri Poincaré Nancy 1, IECN, 2002.

[2] J.-F. COUCHOURON. *Semi-groupes et Contrôles.* Habilitation à diriger les recherches, Université de Metz, 2002.

[3] P. HÉBRARD. *Etude de la géométrie optimale des zones de contrôle dans des problèmes de stabilisation.* Thèse de l'Université Henri Poincaré Nancy 1, IECN, 2002.

[4] T. TAKAHASHI. *Analyse des équations modélisant le mouvement des systèmes couplant des solides rigides et des fluides visqueux.* Thèse de l'Université Henri Poincaré Nancy 1, IECN, 2002.

Articles et chapitres de livre

[5] F. ALABAU. *Indirect boundary stabilization of weakly coupled hyperbolic systems.* in « Siam J. on Control and Optimization », volume 41, 2002, pages 511-541.

[6] F. ALABAU, P. CANNARSA, V. KOMORNIK. *Indirect internal stabilization of weakly coupled systems.* in « J. of Evolution Equations », volume 2, 2002, pages 127-150.

[7] K. AMMARI, K. LIU, M. TUCSNAK. *Decay rates for a beam with pointwise force and moment feedback.* in « Mathematics of Control, Signals, and Systems (MCSS) », volume 15, 2002, pages 177-201.

[8] M. CHERKAOUI, F. CONRAD, N. YEBARI. *Optimal decay rate of energy for a wave equation with boundary feedback.* in « Advances in Mathematical Sciences and Applications », volume 12, 2002, pages 549-568.

[9] M. CHERKAOUI, F. CONRAD, N. YEBARI. *Points d'équilibre pour une équation des ondes avec contrôle frontière contenant un terme intégral.* in « Portugaliae Mathematica », volume 59, 2002, pages 351-370.

[10] F. CONRAD, G. O'DOWD, F. SAOURI. *Asymptotic behaviour for a model of flexible cable with tip masses.* in « Asymptotic Analysis », volume 30, 2002, pages 313-330.

[11] F. CONRAD, F. SAOURI. *Stabilisation d'une poutre. Etude du taux optimal de décroissance de l'énergie élastique.* in « ESAIM COCV », volume 7, 2002, pages 567-595.

[12] J. F. COUCHOURON. *Compactness theorems for abstract evolution problems, Journal of Evolution Equations.* in « Journal of Evolution Equations », volume 2, 2002, pages 151-175.

[13] J. F. COUCHOURON, R. PRECUP. *Existence principles for Inclusions of Hammerstein Type Involving Noncompact Acyclic Multivalued Maps.* in « Electronic Journal of Differential Equations », 2002, pages 1-21.

[14] J. S. MARTIN, V. STAROVOITOV, M. TUCSNAK. *Global weak solutions for the two dimensional motion of several rigid bodies in an incompressible viscous fluid.* in « Archive for Rational Mechanics and Analysis », volume 161, 2002, pages 113-147.

[15] L. ROSIER. *A fundamental solution supported in a strip for a dispersive equation.* in « Computational and Applied Mathematics », volume 21, 2002, pages 355-367.

Communications à des congrès, colloques, etc.

[16] F. MAGOULÈS, F.-X. ROUX, S. SALMON, L. SERIES. *Approximation algebrique de la matrice du complement de Schur - Application aux problemes de calcul de structures.* in « proceedings of CANUM 2002 », éditeurs L. DE MATH. APPL. DE L'UNIV. DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR ET LA SMAI., pages 156-158, 2002.

[17] F.-X. ROUX, F. MAGOULÈS, S. SALMON, L. SERIES. *Optimization of Interface Operator Based on Algebraic Approach.* in « proceedings of the 14th International Conference on Domain Decomposition Methods in Cocoyoc, Mexico », 2002, http://www.ddm.org.

Rapports de recherche et publications internes

[18] F. MAGOULÈS, P. IVANYI. *Parallel Computational Acoustics Library - Audio Functions Developper's Reference Manual.* rapport technique, LORIA, July, 2002, A02-R-075, 11 pages.

[19] F. MAGOULÈS, A. MARET, G. NIESER. *Couplage de codes de calcul scientifique FORTRAN et d'outils de visualisation graphique VTK sous TCL.* rapport technique, LORIA, September, 2002, A02-R-098, 20 pages.

Bibliographie générale

[20] J. F. COUCHOURON, P. LIGARIUS. *Nonlinear observers in Banach spaces.* in « ESAIM COCV », à paraître.

[21] R. B. GUZMAN, M. TUCSNAK. *Energy decay estimates for the damped plate equation with a local degenerated dissipation.* in « Systems and Control Letters », à paraître.

[22] P. HEBRARD, A. HENROT. *Optimal shape and position of the actuators for the stabilization of a string.* in « Systems and Control Letters », à paraître.

[23] D. KESSLER, J.-F. SCHEID. *A priori error estimates of a finite element method for an isothermal phase-field model related to the solidification process of a binary alloy.* in « IMA J. Numer. Anal. », accepté pour la publication.

[24] F. MAGOULÈS. *Calcul Scientifique et Informatique : Acoustique et Format de Fichiers WAV.* rapport technique, IECN, May, 2001, No.27, 11 pages.

[25] C. ROSIER, L. ROSIER. *Finite speed propagation in the relaxation of vortex patches.* in « Quarterly of Applied Mathematics », à paraître.

[26] T. TAKAHASHI, M. TUCSNAK. *Global strong solutions for the two-dimensional motion of an infinite cylinder in a viscous fluid.* in « J. of Math. Fluid Mechanics (JMFM) », à paraître.