

Projet MACS

Modélisation, Analyse et Contrôle pour le Calcul des Structures

Rocquencourt

THÈME 4B



*R*apport
d'Activité

2001

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	3
3	Fondements scientifiques	4
3.1	Développement et analyse de méthodes numériques performantes pour le calcul des structures	4
3.1.1	Fiabilité des méthodes numériques pour les coques minces	5
3.1.2	Eléments finis de coques pour les applications industrielles	5
3.1.3	Modèles numériques multi-échelles en structures composites	6
3.2	Solveurs pour le calcul intensif en mécanique du solide	7
3.3	Dynamique des structures et stabilité	8
3.4	Mécanique active	9
4	Domaines d'applications	10
4.1	Panorama	10
5	Logiciels	11
5.1	MODULEF	11
5.2	Comportement de stratifiés composites sous chocs	12
5.3	Dynamique des structures	12
6	Résultats nouveaux	13
6.1	Développement et analyse de méthodes numériques performantes pour le calcul des structures	13
6.1.1	Fiabilité des méthodes numériques pour les coques minces	13
6.1.2	Eléments finis de coques pour les applications industrielles	13
6.1.3	Comportement dynamique de stratifiés composites sous impact	14
6.2	Solveurs pour le calcul intensif en mécanique du solide	15
6.2.1	Décomposition de domaines en élasticité non linéaire	15
6.3	Dynamique des structures et stabilité	15
6.3.1	Modèles simplifiés pour l'interaction fluide-structure	15
6.4	Mécanique active	16
6.4.1	Structures gyrovibrantes	16
6.4.2	Comportement de l'activité mécanique du cœur	18
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	19
7.1	Action fluide-structure LCPC	19
7.2	Michelin : simulation du comportement des nappes de renfort dans un pneu . .	21
7.3	Openfem toolbox	21

8	Actions régionales, nationales et internationales	22
8.1	Actions nationales	22
8.1.1	Action CAESARE (Chirurgie Abdominale Et Simulation A Retour d'Effort)	22
8.1.2	Action de recherche coopérative ICEMA (Images de l'Activité Electro-Mécanique du Cœur)	22
8.2	Actions internationales	22
8.2.1	Projet Liapunov « Etude du comportement dynamique des coques résonnantes »	22
8.2.2	Autres collaborations durables	23
9	Diffusion de résultats	23
9.1	Animation de la communauté scientifique	23
9.2	Enseignement universitaire	23
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	23
10	Bibliographie	25

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Dominique Chapelle [Ingénieur des Ponts et Chaussées, mis à disposition de l'INRIA]

Responsable permanent

Marina Vidrascu [DR, INRIA]

Assistante de projet

Maryse Desnous [TR, INRIA, assure également le secrétariat de Gamma, Cosivie et M3N]

Personnel INRIA

Frank Génot [CR]

Amine Hassim [CR]

Jacques Sainte-Marie [Ingénieur des TPE, détaché à partir de mai 2001]

Conseiller scientifique

Patrick Le Tallec [Professeur, Ecole Polytechnique]

Collaborateurs extérieurs

Michel Bernadou [Professeur, Pôle Universitaire Léonard de Vinci]

Frédéric Bourquin [Ingénieur-en-Chef des Ponts et Chaussées, LCPC]

John Cagnol [Professeur, Pôle Universitaire Léonard de Vinci]

Chercheur post-doctorant

José Urquiza [jusqu'à fin août, bourse INRIA]

Doctorants

Miguel Fernández [Université Paris Dauphine, bourse MENRT]

Anca Ferent [Ecole Polytechnique]

2 Présentation et objectifs généraux

La simulation numérique est un outil incontournable de l'ingénieur. Cela est particulièrement vrai dans le domaine de la mécanique des milieux continus en général, et dans le calcul des structures en particulier. C'est dans cette discipline que la méthode des éléments finis s'est initialement développée et c'est encore là qu'elle est le plus utilisée. Dans une chaîne de conception industrielle, les essais numériques tendent de plus en plus à compléter les essais expérimentaux, voire à se substituer à une partie d'entre eux, et permettent ainsi des gains très significatifs dans les coûts et les délais de conception.

Dans ce contexte général, le projet MACS vise à répondre plus spécifiquement à des besoins de recherche nouveaux liés à :

- la nécessité de développer des méthodes numériques de plus en plus fiables, aptes à résoudre des problèmes industriels de très grande taille ;
- l'émergence du contrôle actif de structures, qui permet de concevoir des structures plus minces, plus légères (et donc moins chères), ou qui répondent à un cahier des charges plus strict (en matière de vibrations notamment).

Les deux disciplines en question (calcul et contrôle des structures) sont de plus en plus indissociables. La conception d'une loi de contrôle ainsi que sa mise en œuvre reposent en effet, de façon incontournable, sur la modélisation et la simulation numérique du comportement dynamique de la structure. Par ailleurs, le contrôle actif est devenu un ingrédient essentiel dans

la conception des structures modernes dans la mesure où un nombre croissant d'applications nouvelles inclut un dispositif de contrôle.

L'originalité de notre démarche résulte du « couplage » que nous cherchons à réaliser entre ces deux disciplines scientifiques par la mobilisation de compétences en analyse numérique et calcul des structures d'une part, en contrôle/contrôlabilité et en automatique/temps réel d'autre part.

3 Fondements scientifiques

Quatre axes de recherche sont retenus pour leur complémentarité, leur adéquation à la culture scientifique et aux compétences de l'équipe, ainsi que pour leurs retombées industrielles. Dans cette section, nous mettons l'accent sur la problématique scientifique et la démarche envisagée pour chacun de ces axes.

3.1 Développement et analyse de méthodes numériques performantes pour le calcul des structures

Mots clés : structure, poutre, plaque, coque, fiabilité numérique, matériau composite.

Glossaire :

Structure : Objet tridimensionnel de la mécanique des solides dont une des dimensions au moins (typiquement l'épaisseur) est très inférieure à la taille globale. Cette propriété permet d'utiliser des modèles mécaniques réduits, c'est à dire formulés sur des variétés de dimension 1 (ligne, dite « ligne moyenne ») ou de dimension 2 (« surface moyenne »), et non dans un domaine tridimensionnel. Les poutres, plaques et coques constituent des exemples de structures simples, et une structure générale est constituée d'un assemblage de tels composants.

Poutre : Objet dont deux dimensions (en général du même ordre de grandeur) sont très petites devant la troisième. Le modèle réduit est alors formulé sur une ligne (droite ou courbe).

Coque : Objet dont une dimension (l'épaisseur) est très inférieure aux deux autres. Le modèle de structure est formulé sur la surface moyenne de l'objet.

Plaque : Cas particulier de coque dont la surface moyenne est plane.

Verrouillage numérique : Le verrouillage numérique est un phénomène qui fait que, lorsque l'épaisseur (qui apparaît dans la formulation comme un paramètre) est petite, la méthode numérique fournit des déplacements bien inférieurs (parfois de plusieurs ordres de grandeur) à ceux de la solution exacte, c'est à dire que la structure paraît numériquement beaucoup trop « raide ».

Résumé : *Dans le cadre des méthodes numériques pour le calcul des structures, trois axes de recherche font l'objet de travaux :*

- i) la fiabilité des méthodes de coques,*
- ii) les éléments finis de coques pour les applications industrielles,*
- iii) les modèles numériques de structures composites.*

Les modèles utilisés pour représenter le comportement des structures, en statique et en dynamique, dans les régimes linéaire et non-linéaire, sont de plus en plus fins et requièrent le

développement et l'analyse de méthodes numériques performantes. Dans ce cadre, trois thèmes de recherches plus spécifiques font l'objet de travaux au sein de MACS.

3.1.1 Fiabilité des méthodes numériques pour les coques minces

Les éléments de coque sont manifestement les éléments finis les plus utilisés pour le calcul des structures dans l'industrie, tous secteurs confondus (automobile, aéronautique, génie civil, etc.). Cependant, tous les spécialistes s'accordent pour dire que les éléments de coque aujourd'hui disponibles ne sont pas suffisamment fiables. Une cause essentielle de ce problème réside dans l'apparition du phénomène du verrouillage numérique lorsque la structure est « mince ».

D. Chapelle a contribué, à travers sa thèse de doctorat [Cha96], à mieux faire comprendre le phénomène du verrouillage numérique dans le cas de coques. En particulier, il a mis au point, en collaboration avec R. Stenberg (Professeur à Helsinki University of Technology, Finlande), la première méthode d'éléments finis de coques dont la résistance au verrouillage ait pu être démontrée sans hypothèse simplificatrice [CS98]. En revanche, le traitement spécifique appliqué à la méthode la rend inapte à représenter correctement le comportement en membrane des coques dans les configurations où le verrouillage n'est pas à redouter !

Ainsi, on ne connaît toujours pas, à l'heure actuelle, d'élément de coque dont la fiabilité ait été démontrée dans un cadre général, alors que de nombreuses équipes y travaillent dans le monde entier. Face à ce problème difficile, notre stratégie consiste à susciter une synergie entre la compréhension et l'analyse théorique du phénomène d'une part, et la mise en œuvre d'expérimentations numériques guidées par des critères rigoureux d'autre part. Une collaboration étroite en ce sens est en cours entre D. Chapelle et K.J. Bathe (Professeur au MIT, fondateur et directeur de la société ADINA R&D, Inc.), voir notamment [CB98], [2].

3.1.2 Eléments finis de coques pour les applications industrielles

L'objectif de cette thématique consiste à rapprocher les méthodes d'éléments finis de coques analysées dans le cadre classique de l'analyse numérique de celles, souvent sans lien apparent, utilisées par les ingénieurs dans la pratique industrielle. On vise ainsi à faire bénéficier les méthodes industrielles des améliorations (notamment en terme de fiabilité) permises par la finesse et la puissance de l'analyse numérique, en même temps qu'à mieux valoriser les méthodes que nous mettons au point.

Dans le cadre classique, l'utilisation des éléments finis de coque requiert la donnée d'une carte ϕ qui associe à tout point matériel m de la surface moyenne de référence $\hat{\omega}$ (que l'on choisit en général plane) sa position initiale $\phi(m)$. Dans les applications industrielles, les géométries des structures considérées sont en général trop complexes pour être définies par une carte unique et, de fait, les surfaces sont habituellement décrites par une liste de points. Des

-
- [Cha96] D. CHAPELLE, *Etude des Phénomènes de Verrouillage Numérique pour les Problèmes de Coques Minces*, thèse de doctorat, Université Paris VI, juin 1996.
- [CS98] D. CHAPELLE, R. STENBERG, « Stabilized finite element formulations for shells in a bending dominated state », *SIAM Journal of Numerical Analysis* 36, 1, 1998, p. 32–73.
- [CB98] D. CHAPELLE, K. J. BATHE, « Fundamental considerations for the finite element analysis of shell structures », *Computers & Structures* 66, 1, 1998, p. 19–36.

techniques d'approximation par fonctions « splines » ont été parfois utilisées dans ces situations pour reconstruire une carte à partir des coordonnées ponctuelles mais, à cause de son coût, cette approche n'est pas toujours satisfaisante dans la pratique industrielle. A contrario, les ingénieurs utilisent couramment des éléments finis de coques à base de « coques à facettes » (alors que des analyses théoriques ont mis en évidence un défaut de consistance dans ces méthodes^[BDT88]), ou encore des méthodes de type « general shell elements » [2].

3.1.3 Modèles numériques multi-échelles en structures composites

Ce travail concerne l'étude de l'endommagement et de la tenue aux chocs de structures stratifiées composites à matrice organique. Sous chargement transverse de type impact, certaines zones du stratifié peuvent être suffisamment sollicitées pour que des micro-fissurations se développent dans la matrice, suivies par des décohésions fibre-matrice. Ces endommagements au niveau de la micro-structure (matrice et fibre) se traduisent par des dégradations des propriétés mécaniques dans la zone de la couche (mésoscopique) composite et affecte le comportement global (macroscopique) de la structure.

L'approche locale (microscopique) consiste à modéliser finement les phénomènes de dégradation en chaque point de la structure et à utiliser des méthodes d'homogénéisation pour caractériser l'influence de ces phénomènes sur le comportement du matériau. Une telle approche, mise en œuvre à l'échelle des phénomènes physiques que l'on cherche à modéliser, se heurte cependant à trois grandes difficultés au niveau :

- des données du modèle qui sont très difficiles à recalibrer expérimentalement ;
- des résultats numériques car les dégradations du matériau ont tendance à se concentrer dans des zones très étroites (bandes de localisation) entraînant des résultats numériques erronés ;
- du temps calcul qui devient très vite prohibitif.

L'approche globale s'appuie sur des modèles phénoménologiques macroscopiques au niveau du stratifié complet. Ces modèles utilisés depuis longtemps dans les codes de calcul des structures donnent des résultats satisfaisants compte tenu de leur relative simplicité. Mais cette approche donne une représentation globale, donc très approximative, des mécanismes à l'échelle microscopique.

Notre approche localement couplée combine les performances du calcul de structures macroscopique avec un calcul d'évolution de l'endommagement à chaque pas de temps. Nous avons pris en compte trois échelles pour représenter le stratifié, et les informations d'une simulation à une échelle donnée sont utilisées à l'échelle supérieure :

- à l'échelle microscopique la méthode d'homogénéisation ^{[BLP78] [Duv76]}, fournit la loi de comportement de la couche non-endommagée,
- à l'échelle de l'élément fini de la couche *homogénéisée* dans la zone endommagée, une loi d'endommagement non-linéaire est utilisée pour décrire l'évolution du matériau. L'écri-

[BDT88] M. BERNADOU, Y. DUCATEL, P. TROUVÉ, « Approximation of a circular cylindrical shell by Clough-Johnson flat plate finite elements », *Numer. Math.* 52, 1988, p. 187–217.

[BLP78] A. BENSOUSSAN, J.-L. LIONS, G. PAPANICOLAOU, *Asymptotic analysis for periodic structures*, North Holland, 1978.

[Duv76] G. DUVAUT, *Matériaux élastiques à structure périodique*, North Holland, 1976.

- ture de cette loi est basée sur les concepts classiques de la mécanique de l'endommagement, avec des variables moyennant les phénomènes complexes (micro-fissuration de la matrice et la décohésion fibre-matrice). L'identification des coefficients de la loi d'évolution de l'endommagement est réalisée à partir d'expériences simples et reproductibles.
- à l'échelle macroscopique, des simulations numériques tridimensionnelles sont effectuées avec le modèle d'endommagement à l'échelle des plis ^[HV98]. Le calcul numérique fournit les valeurs des paramètres d'endommagement à chaque instant et permet de mettre en évidence le début de micro-fissuration dans les différentes couches.

3.2 Solveurs pour le calcul intensif en mécanique du solide

Mots clés : décomposition de domaine, algorithme numérique, calcul parallèle, élasticité linéaire, élasticité non-linéaire.

Glossaire :

Solveur en mécanique du solide : Ensemble d'algorithmes qui permettent la résolution du problème complet (par exemple une méthode de Newton associée à une discrétisation par éléments finis).

Décomposition de domaines : la décomposition de domaines consiste à subdiviser le domaine de calcul en sous-domaines plus petits et à concevoir une méthode de résolution qui ramène la résolution du problème global à des petits problèmes par sous-domaine. Par ailleurs, en calcul parallèle, ce terme désigne la distribution de données à travers les processeurs.

PVM : Parallel Virtual Machine

Résumé : *La simulation numérique de structures industrielles conduit à des problèmes de grande taille. Leur résolution se heurte à deux difficultés : les géométries sont complexes, et les schémas d'intégration sont nécessairement implicites, ce qui exige l'inversion de systèmes matriciels creux, non-structurés et de très grande taille. Pour mener à bien cette tâche, il convient de concevoir et de développer des algorithmes nouveaux.*

Les moyens de calcul classiques sont souvent insuffisants pour résoudre des problèmes réels en calcul des structures, en particulier les modèles discrets obtenus sur maillages raffinés et adaptés de structures hétérogènes.

L'avenir du calcul haute-performance dans ces domaines réside vraisemblablement dans l'utilisation de grands ordinateurs parallèles ou de réseaux de stations de travail et de nouveaux algorithmes adaptés au calcul numérique intensif.

La stratégie de développement est axée sur l'utilisation de machines parallèles gros grains et d'une programmation par passage de messages utilisant des standards de communication de type PVM ou MPI. Cette approche assure une grande portabilité du logiciel et une utilisation indifférente de réseaux de stations de travail ou de gros ordinateurs parallèles.

D'un point de vue algorithmique, le traitement des problèmes non-linéaires de la mécanique des structures par des algorithmes de type « Newton » débouche sur la résolution d'un

[HV98] A. HASSIM, G. VANDERBORCK, « Computational Procedures for Progressive Impact-Induced Damage Analysis of Laminated Composites », *in: Proceedings of the 69th Shock & Vibration Symposium*, St. Paul, MN, USA, 1998.

ou plusieurs systèmes linéaires de grande taille, creux, non-structurés et, en général, très mal conditionnés (cf. [LV97a]). La grande taille de ces systèmes rend difficile, sinon impossible, l'utilisation de méthodes directes. De plus, le mauvais conditionnement est un frein à l'utilisation de méthodes itératives de type gradient conjugué. Pour résoudre de tels problèmes, au niveau algorithmique, la plupart des solutions proposées et validées s'appuient sur des techniques de décomposition de domaines [LV97b]. C'est une méthodologie générale qui permet de résoudre des systèmes linéaires et non-linéaires issus de la discrétisation d'équations aux dérivées partielles.

Une analyse mathématique rigoureuse de ces méthodes, aux niveaux continu et discret, permet de concevoir des algorithmes très robustes et de définir des méthodes à deux niveaux pour pouvoir résoudre des problèmes elliptiques avec un grand nombre de sous-domaines (voir Le Tallec [Le 94]).

Dans le projet, on s'intéresse à trois types d'outils nécessaires pour surmonter les difficultés théoriques et pratiques posées par l'utilisation des techniques de décomposition de domaines :

- des techniques de partitionnement automatique permettant de découper des maillages de structures complexes en sous-domaines réguliers et compacts,
- des solveurs itératifs d'interface de type Neumann-Neumann, qui permettent de réduire le problème initial à une succession de problèmes de sous-structures à traction ou à déplacement imposés et résolus en parallèle par sous-domaine,
- des solveurs sur grille grossière permettant de construire des algorithmes multi-niveaux rapides et efficaces quels que soient la géométrie et le nombre des sous-domaines utilisés.

3.3 Dynamique des structures et stabilité

Mots clés : vibration, couplage fluide-structure.

Résumé : *Dans ce thème, on s'intéresse à la stabilité des structures en comportement dynamique, ce qui constitue un préliminaire essentiel au contrôle. Pour l'instant, les travaux de l'équipe se sont plus spécifiquement concentrés autour des problèmes de stabilité provenant de l'interaction avec un fluide.*

La stabilité des structures constitue naturellement une préoccupation majeure des concepteurs. Il s'agit en particulier de s'assurer que la structure ne sera pas le siège de vibrations mal amorties (voire d'amplitude croissante!). Par ailleurs, l'analyse de la stabilité d'un système dynamique général constitue une étape préliminaire essentielle pour pouvoir aborder l'étude du même système auquel on adjoint un dispositif de contrôle.

Les travaux réalisés par l'équipe dans ce domaine ont notamment concerné l'étude de la stabilité d'une structure sous l'effet d'un écoulement fluide. Ceci nécessite de savoir rendre compte, par des modèles et méthodes numériques pertinentes, de phénomènes physiques faisant

-
- [LV97a] P. LE TALLEC, M. VIDRASCU, « Domain decomposition techniques for nonlinear elasticity problems », *in: Computational Science for the 21st century*, Wiley, p. 568–585, 1997.
- [LV97b] P. LE TALLEC, M. VIDRASCU, « Solving large-scale structural problems on parallel computers using domain decomposition techniques », *in: Parallel Solution Methods in Computational Mechanics*, M. Papadrakakis (éditeur), John Wiley & Sons, 1997, ch. 3.
- [Le 94] P. LE TALLEC, « Domain decomposition methods in computational mechanics », *Advances in computational mechanics* (North-Holland), 1994, Volume 1.

intervenir de façon essentielle l'interaction entre une structure en mouvement et un écoulement fluide. Très schématiquement, on peut décrire le couplage qui entre en jeu comme suit : le déplacement de la structure modifie la géométrie du domaine fluide et donc l'écoulement qui à son tour exerce une action sur la structure. Ces phénomènes jouent un rôle capital dans un grand nombre d'applications et dans des domaines très variés (écoulements dans les vaisseaux sanguins, stabilité des ailes d'avion et des grands ouvrages d'art, etc.).

Dans cette démarche, la pertinence des modèles utilisés pour décrire chacun des deux domaines indépendamment l'un de l'autre et la performance des méthodes numériques employées pour discrétiser ces modèles constituent des préalables fondamentaux. C'est donc naturellement en association avec des spécialistes de mécanique des fluides d'autres équipes de l'INRIA (notamment CAIMAN et M3N) que MACS est engagé dans cette action. A travers celle-ci, nos objectifs spécifiques concernent donc le développement de méthodes permettant d'analyser la stabilité de la structure au contact de l'écoulement (pour notamment éviter les phénomènes de « flottement » bien connus des avionneurs).

3.4 Mécanique active

Mots clés : contrôle, capteurs/actionneurs, structure intelligente.

Résumé :

L'objectif général est ici de mettre au point des outils permettant d'analyser et de concevoir des « structures intelligentes » (systèmes composés d'une structure et d'un dispositif de contrôle). La démarche envisagée consiste à s'inspirer à la fois de la théorie du contrôle d'EDPs telle que développée par l'école de Mathématiques Appliquées (notamment les méthodes de type HUM, pour « Hilbert Uniqueness Method »^[Lio88a,Lio88b]), et de l'Automatique.

Un intérêt notable des méthodes de type HUM réside dans le lien étroit qu'elles font apparaître entre la géométrie du système et sa contrôlabilité (et observabilité). Cette information est précieuse pour la conception d'un système avec contrôle intégré (notamment pour le placement des capteurs et actionneurs). En revanche, les lois de commande obtenues par ces méthodes sont difficilement applicables en pratique, car leur écriture sous forme de feedback n'est pas toujours possible ou exploitable, malgré de récentes avancées dans cette direction^[Kom97] (il est à noter que le feedback en question fait de plus appel à une connaissance parfaite de l'état). Par ailleurs le problème de la robustesse (vis-à-vis des erreurs de modélisation en général, et en particulier des erreurs de discrétisation) de ces méthodes est encore largement ouvert. Pour obtenir des lois robustes et optimiser les marges de stabilité du système contrôlé il paraît utile de se tourner vers des méthodes et stratégies issues d'autres branches du contrôle d'EDPs (semi-groupe, pour l'utilisation des représentations d'états) et de l'Automatique (fonctions de

[Lio88a] J.-L. LIONS, *Contrôlabilité exacte, perturbations et stabilisation de systèmes distribués. Volume 1 : contrôlabilité exacte*, Masson, 1988.

[Lio88b] J.-L. LIONS, *Contrôlabilité exacte, perturbations et stabilisation de systèmes distribués. Volume 2 : perturbations*, Masson, 1988.

[Kom97] V. KOMORNIK, « Rapid boundary stabilization of linear distributed systems », *SIAM J. Control Optim.* 35, 5, 1997, p. 1591–1613.

transfert irrationnelles, pour l'utilisation des représentations entrée/sortie). Notons que la plupart des extensions récentes à la dimension infinie de résultats connus pour les systèmes de dimension finie ne s'appliquent que sous l'hypothèse forte de stabilisabilité et de détectabilité exponentielles du système sous-jacent, ce qui n'est pas le cas des structures mécaniques en général. Néanmoins de récents résultats sur les systèmes dissipatifs [KJ96,OC00] avec capteurs/actionneurs colocalisés semblent très prometteurs.

De manière générale, de nombreuses questions restent ouvertes, ne serait-ce qu'au niveau de la mise en œuvre de ces techniques et de l'interprétation physique des marges de robustesse annoncées : ces dernières ne correspondent souvent qu'à un type bien choisi de perturbations structurelles du modèle (par exemple, l'introduction d'un terme parasite dans une factorisation donnée de la fonction de transfert) qu'il est souvent difficile de mettre en rapport avec les incertitudes sur les caractéristiques physiques du système qui correspondent à des perturbations paramétriques, plus difficiles à étudier (anisotropie, amortissement, etc.).

Pour l'instant, les travaux de l'équipe dans ce domaine se sont principalement concentrés sur l'étude (modélisation et simulation numérique) de composants utilisables pour le contrôle des structures en tant que dispositifs de capteurs/actionneurs (matériaux piézoélectriques et magnétostrictifs, cf. [A.B97,Hae00,BLB98,BH98,BH99]), [16]. Tout en poursuivant dans cette direction, nous souhaitons également développer, en aval, certains aspects plus directement liés à l'étude de structures contrôlées.

4 Domaines d'applications

4.1 Panorama

Le calcul des structures, avec ses développements liés au contrôle, a des applications dans la plupart des secteurs industriels. On peut néanmoins identifier plus particulièrement quatre grands domaines dans lesquels les travaux de MACS ont vocation à trouver des applications directes.

1. **Génie civil.** Dans ce domaine, avec l'augmentation de la portée (et donc de la souplesse) des grands ouvrages, le contrôle des vibrations est une préoccupation majeure

-
- [KJ96] A. KELKAR, S. JOSHI, *Control of Nonlinear Multibody Flexible Space Structures, Lectures Notes in Control and Information Sciences*, 221, Springer Verlag, London, 1996.
 - [OC00] J. OOSTVEEN, R. CURTAIN, « Robustly Stabilizing Controllers for Dissipative Infinite-Dimensional Systems with Collocated Actuators and Sensors », *Automatica* 36, 2000, p. 337–348.
 - [A.B97] A. BLANGUERNON, *Contrôle Actif de Poutres et de Plaques à l'aide d'un Composant Piézoélectrique*, Thèse de doctorat, Université Paris VI, mars 1997.
 - [Hae00] C. HAENEL, *Modélisation, Analyse et Simulation Numérique de Coques Piézoélectriques*, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 25 janvier 2000.
 - [BLB98] A. BLANGUERNON, F. LÉNÉ, M. BERNADOU, « Active control of a beam using a piezoceramic element », *Smart Mater. Struct.* 8, 1998, p. 116–124.
 - [BH98] M. BERNADOU, S. HE, « On the computation of hysteresis and closure domains in micromagnetism », *in: SPIE Conference on Mathematics and Control in Smart Structures*, 3323, p. 512–519, 1998.
 - [BH99] M. BERNADOU, S. HE, « Numerical approximation of unstressed and prestressed magnetostrictive materials », *in: SPIE Conference on Mathematics and Control in Smart Structures*, 1999.

des concepteurs (par exemple pour le tablier et les câbles des ponts à haubans). La maîtrise des effets du vent sur les ouvrages est également un objectif déterminant dans la mesure où, dans bon nombre de cas, il s'agit du chargement dimensionnant (c'est à dire prépondérant dans les calculs). Une collaboration étroite est engagée avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Ministère de l'Équipement), notamment à travers un contrat de recherche (§7.1).

2. **Construction mécanique** (automobile, aéronautique, spatial...). Dans ce secteur, les structures minces sont omniprésentes (carrosserie d'automobile, carlingue d'avion...), et la simulation numérique constitue un maillon essentiel de la chaîne de conception. Par ailleurs, l'adjonction de dispositifs de contrôle sur les structures constitue un domaine d'étude très actif. En outre, la haute valeur ajoutée autorise l'emploi de matériaux élaborés, comme les matériaux nouveaux et les composites. Dans ce cadre également, des actions industrielles sont en cours avec des grandes entreprises.
3. **Génie biomédical**. La simulation numérique est très probablement appelée à jouer un rôle essentiel dans ce secteur en pleine expansion, et les travaux de MACS devraient y trouver de nombreuses applications, notamment dans le domaine de la biomécanique. Deux « actions de recherche coopérative » sont engagées dans ce domaine (voir §8.1.1 et §8.1.2) et MACS y participe activement.
4. **Logiciel**. De par ses multiples contributions à l'obtention de méthodes numériques fiables et performantes, MACS a naturellement vocation à jouer un rôle dans la production de grands codes industriels, voire de codes commerciaux. Des liens concrets avec des « producteurs de codes » existent déjà, notamment à travers la collaboration avec K.J. Bathe, professeur au MIT et directeur de l'entreprise qui développe le code ADINA. Enfin, MACS joue également un rôle dans le domaine du logiciel scientifique par la diffusion de la bibliothèque d'éléments finis Modulef (logiciel libre, cf. §5.1) et d'une Toolbox d'éléments finis(cf. §7.3).

5 Logiciels

5.1 MODULEF

Participants : Dominique Chapelle, Amine Hassim, Marina Vidrascu [correspondant].

La quasi-totalité des développements logiciels réalisés par l'équipe sont effectués dans l'environnement constitué par la bibliothèque Modulef. Cette bibliothèque fournit en effet une véritable base logicielle qui, par sa conception modulaire fondée sur des structures de données rigoureusement définies et particulièrement adaptées aux méthodes d'éléments finis, permet d'intégrer aisément de nouveaux développements, que ce soit au niveau des modèles, des types de discrétisation, ou encore des algorithmes de résolution nouveaux.

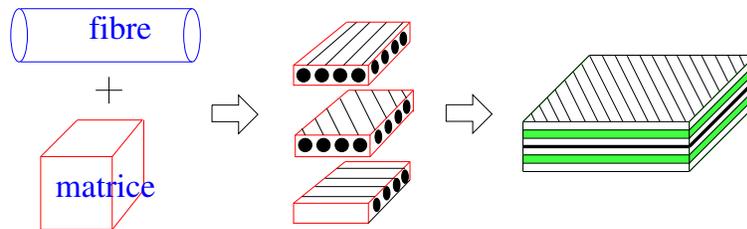
Jusqu'en 1998, le logiciel Modulef était diffusé par Simulog dans le cadre d'un club d'utilisateurs qui versaient une cotisation annuelle. Afin d'en permettre une diffusion plus large, il a été décidé d'en faire un logiciel libre à partir de 1999, et nous nous sommes chargés de coordonner les opérations correspondant à ce changement de statut.

Modulef est téléchargeable sur le serveur Web de l'INRIA-Rocquencourt (<http://www-rocq.inria.fr/modulef/>). Le statut de logiciel libre facilite également l'interfaçage et/ou l'intégration de modules issus de Modulef dans d'autres logiciels, qu'il soient eux-mêmes libres ou commercialisés sous une forme ou une autre, voir notamment 7.3.

5.2 Comportement de stratifiés composites sous chocs

Participant : Amine Hassim [correspondant].

ADANIDEC est un logiciel pour l'étude du comportement dynamique de stratifiés composites sous impact. Nous avons considéré les trois échelles caractéristiques des stratifiés composites (fibre/matrice, pli et stratifié) pour la construction et l'étude du comportement du stratifié. Les informations d'une construction ou d'une simulation à une échelle donnée sont utilisées à l'échelle supérieure.



A chaque échelle nous avons intégré une base de données matériaux ainsi que des outils de simulation numérique appropriés :

- caractérisation des propriétés effectives (homogénéisation) et visualisation des contraintes locales à l'échelle inférieure des constituants ;
- loi d'évolution de l'endommagement à l'échelle intermédiaire de l'élément fini du pli ;
- simulation du comportement dynamique du stratifié sous impact à l'échelle macroscopique localement couplée avec un calcul d'évolution de l'endommagement à chaque pas de temps.

Une interface graphique Tcl/Tk aide l'utilisateur à manipuler la base de données matériaux et les logiciels aux trois échelles du stratifié.

5.3 Dynamique des structures

Participants : Patrick Le Tallec, Marina Vidrascu [correspondant].

Le logiciel **dynaxx** permet de résoudre des problèmes dynamiques de coques en grands déplacements (mais tous les autres éléments finis d'élasticité de la bibliothèque Modulef peuvent être utilisés). Une méthode de Newmark est utilisée pour la discrétisation en temps, un algorithme de Newton pour la discrétisation en espace. Ce module est également destiné à être utilisé pour la partie **structure** dans la simulation du couplage fluide-structure. Dans ce cas, la communication avec le **code fluide** est faite via un **coupleur** en utilisant la bibliothèque PVM. Ce logiciel utilise la bibliothèque Modulef et a déjà été mis à la disposition de tous nos partenaires, en particulier les participants de l'action fluide-structure LCPC (voir §7.1).

6 Résultats nouveaux

6.1 Développement et analyse de méthodes numériques performantes pour le calcul des structures

Participants : Dominique Chapelle, Anca Ferent, Amine Hassim, Marina Vidrascu.

Mots clés : fiabilité numérique, éléments MITC, couplage coque/3D, composites, endommagement.

6.1.1 Fiabilité des méthodes numériques pour les coques minces

Résumé : *Nous avons poursuivi l'analyse des éléments de coque MITC formulés dans le cadre du modèle de Naghdi, et mis au point de nouveaux éléments ne nécessitant pas de carte de surface.*

L'analyse des éléments de coques de type MITC^[Bat96] formulés dans le cadre du modèle de Naghdi a été poursuivie. De nouveaux éléments ne nécessitant pas la donnée d'une carte de la surface moyenne ont été formulés et testés. Ils ont montré des performances très comparables aux éléments reposant sur une carte, et donc très satisfaisantes. Daniel Lepikson, dont le sujet de thèse portait sur la formulation et l'analyse de l'ensemble de ces éléments MITC-Naghdi, a soutenu sa thèse à l'Université de São Paulo (USP) le 28/3. La collaboration avec l'équipe de USP, dont cette thèse en co-tutelle est une manifestation, se poursuit dans le cadre du projet ProTeM-CC « FEF » (voir 8.2.2) et sa thématique centrale évolue vers la formulation et la simulation numérique de modèles de coques piézoélectriques.

6.1.2 Eléments finis de coques pour les applications industrielles

Résumé : *Nous avons formulé et commencé l'analyse d'éléments de coques visant à faciliter la prise en compte d'une couche mince incluse dans un milieu tridimensionnel.*

On a formulé une méthode d'éléments finis de coque avec des degrés de liberté sur les faces externes de la structure. Plus précisément, les déplacements à travers l'épaisseur de la structure sont choisis quadratiques, et on a donc une formulation à 9 degrés de liberté sur chaque fibre transverse. Cette formulation rend très facile l'inclusion de la coque dans un milieu 3D (de par la coïncidence des degrés de liberté à l'interface), et donc la modélisation de couplages divers. En outre, elle permet la prise en compte de déformations dans l'épaisseur, ce qui est essentiel pour toutes les applications dans lesquelles des grandes déformations sont observées. Ce travail est notamment motivé par le partenariat avec Michelin sur la simulation des nappes de renfort dans les pneus, voir section 7.2.

Il est important que ces éléments présentent des bonnes propriétés de robustesse vis-à-vis de l'épaisseur, et notamment qu'ils soient peu sensibles au verrouillage numérique. Dans ce but, on traite les déformations en membrane et cisaillement par des techniques de type MITC^[Bat96].

[Bat96] K. J. BATHE, *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, 1996.

On a mis en évidence une source supplémentaire de verrouillage due au degré de liberté en pincement. Pour pallier ce verrouillage, on propose d'interpoler les déformations en pincement aux noeuds du maillage et d'utiliser les interpolées dans la formulation variationnelle. On a démontré que cette méthode permet effectivement d'éviter le verrouillage en pincement.

Le séjour d'Anca Ferent au MIT de février à juillet a été l'occasion d'approfondir la validation numérique et mécanique de la méthode, en collaboration avec K.J. Bathe. Les tests numériques réalisés sur des benchmarks ont montré des performances aussi bonnes que la méthode MITC9, à laquelle les techniques de traitement du verrouillage ont été empruntées pour ce nouvel élément. On souhaite maintenant évaluer plus finement si la convergence est ou non optimale. Pour cela, il est essentiel de tenir compte des effets induits par les couches limites, qui peuvent être très prononcés dans les coques. Il faut donc analyser en détails les modes de déformations rencontrés dans ces couches limites, afin d'être à même de prévoir un raffinement adéquat du maillage dans la direction de la couche.

6.1.3 Comportement dynamique de stratifiés composites sous impact

Résumé : *Les travaux liés à la prédiction de l'endommagement et à l'évaluation de la tenue au choc de stratifiés composites ont conduit cette année à une amélioration significative du code ADANIDEC. L'implémentation de la méthode de superposition modale combinée à une méthode de perturbation permet d'obtenir à présent des résultats aussi précis qu'une intégration directe avec des temps de calcul nettement plus faibles.*

Compte tenu du contenu fréquentiel de l'excitation et de la prise en compte de la perte de rigidité due à l'endommagement progressif de la structure, nous avons auparavant privilégié une intégration directe des équations non linéaires par des schémas classiques de Newmark implicites.

Cette année, nous avons implémenté une méthode de perturbation initialement développée pour le calcul des modes de résonance et d'antirésonance de structures piézoélectriques pour lesquelles les raideurs d'origine piézoélectrique et diélectrique avaient été introduites. Cette méthode a été validée et a donné de bons résultats pour l'étude des patchs piézo-électriques. Nous avons adapté cette méthode pour l'étude du comportement dynamique de stratifiés composites sous impact par la méthode de superposition modale en introduisant l'endommagement localisé comme une perturbation. En pratique :

- on détermine d'abord les modes propres de la structure non-endommagée. Le spectre est borné en fonction des valeurs limites que l'on se fixe pour considérer les coefficients de perturbation comme négligeables.
- à chaque évolution de l'endommagement, on calcule les termes de perturbations du 1^{er} ordre pour les vecteurs propres, et du 1^{er} et du 2nd ordre pour les fréquences à partir du spectre de la structure saine et de la perte de rigidité locale due à l'endommagement. Ces calculs ne font intervenir que des quantités locales très faciles à mettre en œuvre.

Notre étude a montré que la superposition d'un nombre restreint de modes conduit à des résultats globaux satisfaisants en termes de déplacements. L'économie de résolution est importante et on peut envisager l'étude de structures complexes.

6.2 Solveurs pour le calcul intensif en mécanique du solide

Participants : Patrick Le Tallec, Marina Vidrascu.

Mots clés : algorithme numérique, décomposition de domaine, méthode numérique, programmation parallèle, élasticité non-linéaire.

Résumé : *Une action est menée depuis plusieurs années pour concevoir des solveurs efficaces pour la résolution de problèmes de très grande taille de structures linéaires ou non-linéaires tels qu'ils se posent couramment dans les bureaux d'études industriels. Ces algorithmes, basés sur des méthodes de décomposition de domaines, sont bien adaptés aux architectures parallèles.*

6.2.1 Décomposition de domaines en élasticité non linéaire

Les algorithmes de décomposition de domaines pour des problèmes symétriques ou non ont été validés sur différents problèmes. En particulier, dans cadre de l'action Caesare (voir 8.1.1), un algorithme de type Newton avec continuation combiné à une résolution par décomposition de domaines du problème tangent est utilisé pour traiter le modèle de référence de déformation du foie.

6.3 Dynamique des structures et stabilité

Participants : Dominique Chapelle, Miguel Fernández, Amine Hassim, Patrick Le Tallec, Marina Vidrascu.

Mots clés : équation de Navier-Stokes, formulation ALE, machines tournantes.

6.3.1 Modèles simplifiés pour l'interaction fluide-structure

Résumé : *On analyse la stabilité d'une structure en interaction avec un fluide en écoulement. Pour cela, on étudie le problème spectral obtenu en linéarisant la formulation couplée en ALE.*

Au cours de l'année 2000-2001 Miguel A. Fernández finit sa formation doctorale en Mathématiques Appliquées, dans le projet MACS et à l'Université Paris Dauphine, sous la direction de P. Le Tallec et de D. Chapelle.

L'objectif de la thèse est l'obtention et la justification de modèles simplifiés pour l'interaction fluide-structure, afin de pouvoir analyser la stabilité d'une structure placée dans un écoulement à un coût notablement réduit par rapport à celui d'une simulation du modèle complet (typiquement en formulation ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian)).

Le travail se poursuit avec l'étude du problème spectral issu de l'analyse de stabilité linéaire en interaction fluide-structure. On montre que les solutions de ce problème peuvent être obtenues à partir des valeurs caractéristiques d'un certain opérateur compact agissant dans un espace de Hilbert. Ce travail a fait l'objet d'une publication conjointe avec P. Le Tallec.

L'introduction d'un schéma de discrétisation par éléments finis ramène le problème de la stabilité du système couplé au calcul des valeurs propres de plus petite partie réelle d'un problème généralisé aux valeurs propres non-symétrique et de grande taille. Le calcul de ces valeurs propres est réalisé avec la mise en œuvre d'un algorithme couplant la méthode IRAM (Implicit Restarted Arnoldi Method) avec la transformation de Cayley généralisée [LS97].

6.4 Mécanique active

Participants : Frédéric Bourquin ¹, Dominique Chapelle, Frank Génot, Amine Hassim, Jacques Sainte-Marie, Michel Sorine ².

Mots clés : contrôle, capteurs/actionneurs, piézoélectricité, gyroscopes.

6.4.1 Structures gyrovibrantes

Résumé : *Ce travail concerne l'analyse et l'optimisation de systèmes gyrovibrants, c'est à dire de structures dont certains modes de vibration présentent des propriétés gyroscopiques. On a formulé un critère d'optimisation des gyrovibrants visant à la réduction du spill-over de contrôle du système. Une procédure d'optimisation numérique a ensuite conduit à une réduction très significative de ce critère.*

Ce travail de recherche s'intègre en grande partie dans le projet Liapunov « Optimisation des structures gyrovibrantes » (cf. 8.2.1). Il s'inscrit également dans le prolongement de travaux déjà réalisés dans le projet SOSSO^[CS92].

Position du problème. Un gyroscope classique est constitué d'une partie rotative montée sur un roulement. L'usure au niveau des parties mobiles impose un surdimensionnement lors de la conception et pénalise la robustesse. Une solution à moindres frais pour contourner ce problème technique peut être trouvée dans une nouvelle génération de capteurs inertiels dont l'élément sensible est un résonateur. Quelques exemples de tels capteurs existent déjà en pratique, de géométries très diverses (hémisphère [LL82], double diapason [L96], poutre [KKS90]). Une étude préliminaire a porté sur l'analyse du phénomène mécanique sous-jacent, c'est-à-dire la précession de l'onde stationnaire engendrée par la force de Coriolis, afin d'identifier les

¹LCPC

²projet SOSSO

-
- [LS97] R. LEHOUCQ, J. SCOTT, « Implicitly restarted Arnoldi methods and eigenvalues of the discretized Navier-Stokes equations », *rapport de recherche n° 2712J*, Sandia National Laboratories, 1997.
 - [CS92] P. CONSTANCIS, M. SORINE, « Wideband control of gyro/accelerometer multisensors in a strap down guidance system », *Journal of Guidance, Control and Dynamics* 15, 4, 1992.
 - [LL82] E. LOPER, D. LYNCH, « The HRG: a New Low-Noise Inertial Rotation Sensor », *in: Proc. 16th Joint Services Data Exchange for Inertial Systems*, p. 1-6, Los Angeles, CA, 16-18 novembre 1982.
 - [L96] P. LÉGER, « QuapasonTM - A New Low-Cost Vibrating Gyroscope », *in: 3rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, p. 143-149, 28-29 mai 1996. Part I.
 - [KKS90] S. KUDO, M. KONNO, S. SUGAWARA, T. YOSHIDA, « Consideration on Equivalent Mechanical Circuits for Vibrating Gyroscope », *in: IEEE Ultrasonics Symposium*, p. 397-400, 1990.

caractéristiques géométriques et mécaniques nécessaires à son obtention. Nous avons opté pour des structures à symétrie de révolution présentant ce phénomène du fait de la présence d'au moins un mode propre double.

Critères d'optimisation. En raison, entre autres, des phénomènes d'amortissement dans la structure mécanique, ce type de gyroscope nécessite l'ajout d'un dispositif de contrôle actif dont l'objectif est d'entretenir la vibration stationnaire sans perturber le phénomène de précession. Les travaux de Zhuravlev [Zhu92] proposant des lois de contrôle déjà éprouvées en pratique, nous nous sommes attachés à l'optimisation du système complet, c'est-à-dire de la structure mécanique munie de son dispositif de contrôle.

Un premier critère d'optimisation visant à minimiser les phénomènes de *spill-over* (excitation non désirée des hautes fréquences par le dispositif de contrôle) a été élaboré à partir d'une approximation de la fonction de transfert du système (*SMAI2001*).

Ce critère a ensuite été raffiné pour prendre en compte les couplages intermodaux engendrés par la rotation du capteur (*SIAM San Diego*).

Optimisation de forme. Ce travail concerne la mise en place d'une chaîne d'optimisation des gyrovibrants de types coques minces axisymétriques autour du premier critère présenté ci-dessus [19]. Le contrôleur travaillant autour de la fréquence propre double de l'onde stationnaire exploitée pour la mesure, l'optimisation consiste en pratique à maximiser l'écart entre cette fréquence et les autres. Le problème d'optimisation associé se caractérise par une fonction coût non-linéaire des fréquences propres sous contraintes non-linéaires portant à la fois sur la géométrie et, à travers le gain du capteur (coefficient de Bryan), sur les vecteurs propres.

La procédure d'optimisation choisie rassemble les aspects suivants :

- Calcul des modes et fréquences propres de la structure (Modulef) et des gradients par différentiation automatique de code en mode adjoint (Odysée).
- Algorithme d'optimisation par une technique de points intérieurs de type Quasi-Newton [Her92].

Cette stratégie d'optimisation a démontré son efficacité : un gain de 57,8% sur le critère (et donc en termes d'énergie indésirable injectée sur les modes autres que le fondamental) a été acquis par rapport au gyrovibrant hémisphérique, voir la forme obtenue en figure 1. De plus, les simulations, réalisées dans l'environnement Scilab-Scicos, de la dynamique en boucle fermée de la structure gyrovibrante optimisée valident la diminution recherchée des effets de *spill-over* par rapport au résonateur hémisphérique.

Soulignons enfin que ce sujet semble prometteur en termes de retombées industrielles, comme en témoigne l'intérêt déjà manifesté par la SAGEM et la DGA.

[Zhu92] V. ZHURAVLEV, « Oscillation Shape Control in Resonant Systems », *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 56, 5, 1992, p. 725–735.

[Her92] J. HERKOVITS, « An Interior Point Technique for Nonlinear Optimization », *Rapport de Recherche n° 1808*, INRIA, 1992, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-1808.html>.

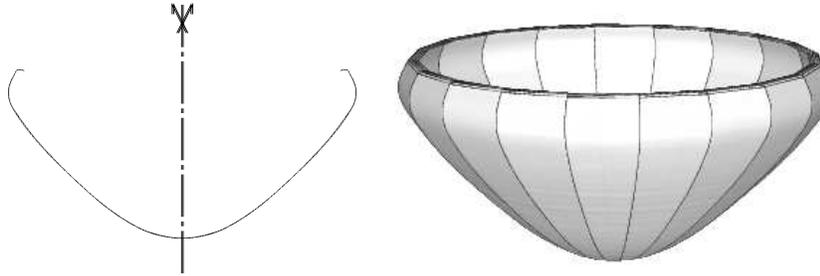


FIG. 1 – Gyrovibrant optimisé

6.4.2 Comportement de l'activité mécanique du cœur

Résumé : *Les recherches menées concernent la modélisation de l'activité mécanique du muscle cardiaque et particulièrement l'asservissement du modèle développé sur des données d'observation (ECG, imagerie médicale, ...).*

Ce travail est lié à l'action de recherche coopérative ICEMA (voir 8.1.2).

L'objectif est d'obtenir une modélisation 3D de l'activité mécanique du cœur en réponse à la commande électrique et de permettre à ce modèle de tenir compte (au sens de l'identification) au cours d'une simulation, de données effectivement mesurées telles la pression artérielle, l'électrocardiogramme (ECG) ou des images de déformation des ventricules. La modélisation du muscle cardiaque et l'asservissement du modèle sur des données d'observation ne vont pas sans soulever certains problèmes :

- le cœur est le siège de phénomènes mécaniques fortement non linéaires, rapides, avec de grandes déformations,
- étant donné la fréquence des battements cardiaques et les difficultés inhérentes à la métrologie, les données d'observation seront nécessairement « éparses ». Ainsi, on ne dispose que de quelques images par phase du cycle.

Il est donc impératif que les informations apportées par le modèle et les observations soient complémentaires. C'est dans le couplage d'un modèle électromécanique complexe avec des techniques performantes de traitement de signaux (images, ECG) que réside la difficulté et l'originalité des recherches menées.

Le modèle mécanique choisi résulte de l'intégration, dans un modèle rhéologique de type Hill-Maxwell, du modèle d'élément contractile développé par Bestel et Sorine au sein du projet SOSSO [Bes00]. Dans un premier temps, on a considéré une version simplifiée 1D du modèle de l'activité mécanique du ventricule gauche, en cherchant à rendre compte au mieux des efforts et déformations au cours des diverses phases du cycle cardiaque. Ce travail nous a permis de :

1. calibrer le modèle rhéologique afin qu'il rende compte des phénomènes effectivement observés dans un ventricule ;
2. mettre en lumière les travaux à mener afin d'obtenir une bonne complémentarité entre la modélisation et l'observation.

[Bes00] BESTEL J., *Modèle différentiel de la contraction musculaire contrôlée. Application au système cardiovasculaire*, thèse de doctorat, Université Paris IX Dauphine, 2000.

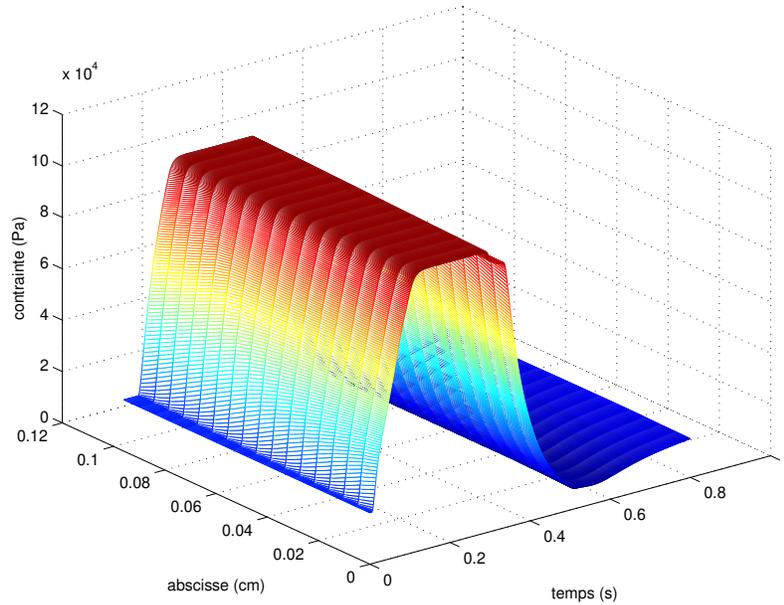


FIG. 2 – Évolution de la contrainte dans une fibre cardiaque au cours d'un cycle.

La simulation du modèle 1D permet de reproduire les quatre phases du cycle cardiaque (contraction isovolumique, éjection, relaxation isovolumique et remplissage). Pour chacune des phases non isovolumiques, on utilise une modélisation simplifiée du circuit artériel (valve+aorte pour l'éjection et valve+oreillette pour le remplissage). Les résultats des simulations sont globalement conformes à la physiologie du cœur en termes d'évolution des contraintes et déformations (cycle P/V).

La construction du modèle 3D est en cours. Pour cela, on est parti d'un maillage de cœur (contenant une information géométrique sur la direction des fibres musculaires) diffusé par le « Bioengineering Institute »³ de l'Université d'Auckland (Nouvelle-Zélande). On a ensuite raffiné ce maillage en utilisant des outils de raffinement surfacique (YAMS) et de génération automatique 3D (GHS3D) du projet GAMMA, voir figure 4.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Action fluide-structure LCPC

Participants : Dominique Chapelle, Miguel Fernández, Serge Piperno ⁴, Marina Vidrascu.

Le LCPC pilote un partenariat de recherche financé par le Ministère de l'Équipement sur la période 1998-2001 qui réunit comme autres partenaires le Centre Scientifique et Technique

³<http://www.bioeng.auckland.ac.nz>

⁴projet CAIMAN

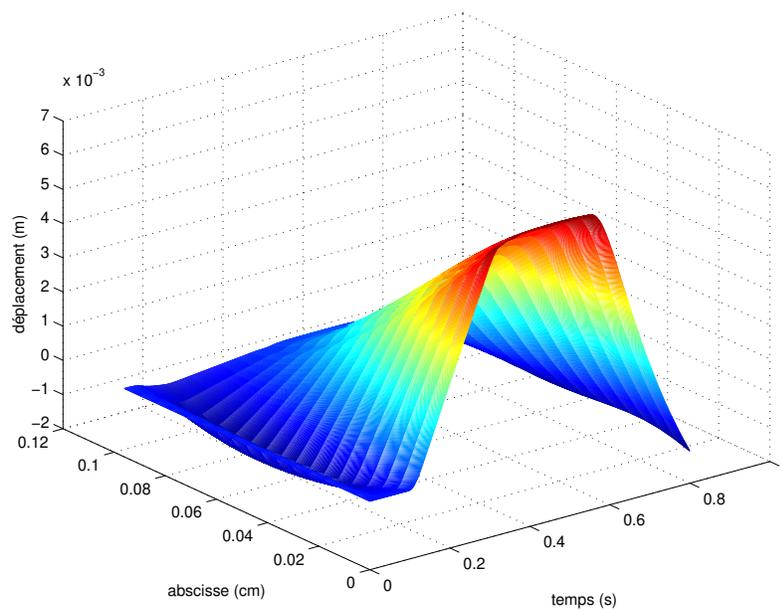


FIG. 3 – Déplacement d'une fibre cardiaque au cours d'un cycle.

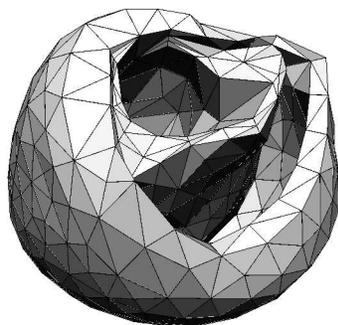


FIG. 4 – Maillage de cœur raffiné

du Bâtiment (CSTB) ainsi que les projets CAIMAN (ENPC-INRIA) et MACS. Le thème de ce partenariat concerne les « Effets du vent sur les structures du génie civil ». Dans ce cadre, le rôle de l'INRIA est de développer des outils de simulation numérique appropriés (« soufflerie numérique »).

Cette année a vu la poursuite d'une campagne de validation poussée des simulations numériques réalisées au moyen du code de couplage fluide-structure de l'INRIA (NSI3-FS), par comparaison des résultats numériques avec des résultats d'expériences en soufflerie conçues spécialement dans ce but et réalisées par le CSTB. Les résultats obtenus sont encourageants. La validation est en cours d'achèvement, et l'étude se conclura par une évaluation globale de la démarche.

Par ailleurs, dans ce cadre également, les travaux sur la prise en compte simplifiée des conditions de couplage se poursuivent et fournissent déjà des résultats concrets, voir 6.3.1.

7.2 Michelin : simulation du comportement des nappes de renfort dans un pneu

Participants : Dominique Chapelle, Anca Ferent, Marina Vidrascu.

Les nappes de renfort des pneus sont des couches minces constituées de matériaux résistants qui sont « immergées » dans la gomme du pneu pour rigidifier l'ensemble. L'objet de ce contrat est de mettre au point des méthodes numériques qui permettent de simuler le comportement de ces nappes, avec des contraintes qui sont celles d'un environnement de calcul industriel. Compte tenu de la finesse de ces couches, on utilise une modélisation de type coque, mais la difficulté consiste alors à assurer la continuité des déplacements à l'interface entre la nappe (coque) et la gomme (solide 3D). En effet, les inconnues de la coque sont localisées sur la surface moyenne de celle-ci, et non sur ses faces externes. La problématique de recherche correspondante est décrite en détails dans la section 6.1.2.

7.3 Openfem toolbox

Participants : Dominique Chapelle, Frank Génot, Amine Hassim, Marina Vidrascu.

Ce travail est mené en collaboration avec la société SDTools. L'objectif est de créer une boîte à outils MATLAB en logiciel libre qui puisse traiter des problèmes de calcul de structure par éléments finis. Le logiciel reposera sur les structures de données développées par SDTools et intégrera plusieurs éléments finis (2d, 3d) provenant de la bibliothèque Modulef.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions nationales

8.1.1 Action CAESARE (Chirurgie Abdominale Et Simulation A Retour d'Effort)

Participants : Dominique Chapelle, Marc Thiriet ⁵, Marina Vidrascu.

Cette action en « Télémedecine et Technologies pour la Santé », animée par Hervé Delinquette (Projet Epidaure) se termine cette année. Les équipes concernées sont : projets Epidaure de l'INRIA Sophia-Antipolis, projets Imagis et Sharp de l'INRIA Grenoble, projets MACS et M3N de l'INRIA Rocquencourt, l'IRCAD de Strasbourg et la société ESI. Le but du projet est de mettre au point et de valider un système de simulation d'interventions chirurgicales apte à prendre en compte les principaux gestes chirurgicaux tels que la préhension et la découpe des tissus (voir 6.2.1).

8.1.2 Action de recherche coopérative ICEMA (Images de l'Activité Electro-Mécanique du Cœur)

Participants : Dominique Chapelle, Frank Génot, Patrick Le Tallec, José Urquiza, Jacques Sainte-Marie, Marina Vidrascu.

Cette action est animée par Frédérique Clément (Projet SOSSO) et réunit les projets Epidaure et Sinus de Sophia Antipolis, et les projets SOSSO et MACS de Rocquencourt.

L'objectif est d'associer des méthodes d'imagerie de l'activité électro-mécanique du cœur à des simulations numériques de modèles représentant ces phénomènes pour permettre l'identification de ces modèles. On vise ainsi à obtenir des modèles réalistes, donc prédictifs, du comportement cardiaque. Les phénomènes de propagation de l'influx électrique et de contraction du muscle cardiaque sont décrits par des EDPs, qui sont naturellement couplées. Dans ce contexte, le projet MACS s'occupe plus particulièrement de la modélisation et de la simulation du comportement mécanique. Les travaux sont décrits en détail dans la section 6.4.2.

8.2 Actions internationales

8.2.1 Projet Liapunov « Etude du comportement dynamique des coques résonnantes »

Participants : Dominique Chapelle, Frank Génot, Amine Hassim, Marina Vidrascu.

Ce projet, coordonné par F. Génot, qui entre dans le cadre des actions de collaboration financées par l'Institut Liapunov, réunit les projets MACS et SOSSO avec des chercheurs de l'Université de Moscou (I. Zhbanov et V. Zhuravlev). Il s'inscrit dans le prolongement de la collaboration précédente « Etude du comportement dynamique des coques résonnantes ». Pour les résultats nouveaux obtenus dans ce contexte, se reporter à la section 6.4.1.

⁵Projet M3N

8.2.2 Autres collaborations durables

- Collaboration sur le verrouillage numérique avec le MIT et ADINA R&D (Klaus-Jürgen Bathe).
- Projet ProTeM-CC « FEF » (Fiabilité des méthodes d'Éléments Finis pour le calcul des structures : aspects théoriques et numériques) avec l'Université de São Paulo (Miguel Bucelem).

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

- Dominique Chapelle est membre du comité éditorial de la revue « Computers & Structures ».
- Dominique Chapelle est coordinateur scientifique des Ecoles CEA-EDF-INRIA « Problèmes Non-Linéaires Appliqués ».
- Michel Bernadou a organisé un mini-symposium « Matériaux Intelligents et Contrôle Actif de Structures » au sein du 1^{er} Congrès National de Mathématiques Appliquées et Industrielles SMAI 2001, Pompadour, 28mai-1juin 2001.
- Michel Bernadou et John Cagnol ont organisé « Mathematical Modeling and Simulation in Acoustics » MACSINET au Pôle Universitaire Léonard de Vinci les 27 et 28 septembre.
- Michel Bernadou est membre du comité éditorial de la Revue européenne des éléments finis et de Finite elements in analysis and design.

9.2 Enseignement universitaire

- Dominique Chapelle : *Ecole CIMPA-ISFMA 2001*. Shanghai, Chine, 20-31 Août 2001.
- Amine Hassim : Cours et T.D sur les *Bases Mathématiques de la Méthode des Éléments Finis*, à l'école Supérieure d'Ingénierie Léonard de Vinci, de février à avril 2001.
- Frank Génot : Cours et T.D. sur *La Programmation Impérative*, à l'Université Paris XIII, Institut Galilée, de février à juin 2001.
- Jacques Sainte-Marie :
 - Cours, T.D et T.P *Algèbre Linéaire et Calcul Formel* à l'université de Versailles-Saint Quentin, printemps 2001.
 - Encadrement de projets scientifiques à l'université de Versailles-Saint Quentin, automne 2001.

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Michel Bernadou

- *ICAST 2001*, College Park, October 15th-17th 2001. « Modelization and numerical approximation of piezoelectric thin shells » (avec C. Haenel).
- *Conférence QNDE*, Brunswick, USA July 30th-August 2nd 2001. « Numerical modelization of magnetic materials based on energy minimization » (avec S. Depeyre et S. He).

- *Séminaire à l'Université de Rome II*, 27 avril 2001. « Numerical Analysis of Piezoelectric thin Shells and Magnetostrictive Materials ».
- *Séminaire au Franhofer Institute for Nondestructive Testing*, Sarrebruck, 14 mai 2001. « On the Numerical Analysis of Magnetostrictive Materials ».
- *First French-Finish Seminar on Innovative Methods for Advanced Technologies*, Espoo, Finland, Nov. 22-23, 2001. « On the numerical modelization of magnetic materials at microscopic scale ».

Dominique Chapelle

- *First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*, MIT, Cambridge, USA, 12-15 Juin 2001. Organisateur de la session spéciale « Reliability of finite elements for thin shells ».
- *ENUMATH 2001*, Ischia, Italie, 23-28 Juillet 2001. Conférencier invité.
- *FIMH 2001*, Helsinki, Finlande, 15-16 Novembre 2001. « A physiologically-based model for the active cardiac muscle contraction » (voir co-auteurs dans la bibliographie).
- Séminaires au LM2S le 25/1, à l'Université de Saõ Paulo le 29/3, au LNCC (Petropolis, Brésil) le 30/3, à l'Université de Rennes le 19/4, à l'Université de Grenoble le 3/5.
- Participation au jury de thèse (co-direction de thèse) de D. Lepikson à l'Université de São Paulo le 28/3.
- Rapporteur et « opposant » pour la soutenance de M. Malinen à Helsinki University of Technology le 17/11.

Anca Ferent

- *First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*, MIT, Cambridge, USA, 12-15 Juin 2001. « Asymptotic analysis of the coupled model shells-3D solids ».

Miguel Fernández

- *First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*, MIT, Cambridge, USA, 12-15 Juin 2001. « From ALE to transpiration » (avec P. Le Tallec)
- *First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*, MIT, Cambridge, USA, 12-15 Juin 2001. « Investigation of sensitivity analysis for fluid-structure interaction systems » (avec M. Moubachir)

Frank Génot

- *SIAM Conference on Control and Its Applications*, San Diego, USA, 11-14 juillet 2001. « Optimum Design of Vibrating Gyroscopes ».

Amine Hassim

- *SMAI2001, 1^{er} Congrès National de Mathématiques Appliquées et Industrielles*, Pompadour, 28 mai-1er juin 2001. « Contrôle et optimisation de structures gyrovibrantes » (avec F. Génot)
- *72th Shock & Vibration Symposium, Destin, FL, USA* « Changes in the Structural Vibration Characteristics of Laminated Composites under Impact Loading » (avec G. Vanderborck)

Marina Vidrascu

- *First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*, MIT, Cambridge, USA, 12-15 Juin 2001. « Finite element modeling for surgery simulation » (avec H. Delingette et N. Ayache)

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] M. BERNADOU, *Finite Element Methods for thin Shell Problems*, Wiley, Chichester, 1996.
- [2] D. CHAPELLE, K. J. BATHE, « The mathematical shell model underlying general shell elements », *Internat. J. Numer. Methods Engrg.* 48, 2, 2000, p. 289–313.
- [3] D. CHAPELLE, *Etude des phénomènes de verrouillage numérique pour les problèmes de coques minces*, thèse de doctorat, université de Paris 6, 18 juin 1996.
- [4] P. LE TALLEC, *Domain Decomposition Methods in Computational Mechanics*, North-Holland, 1994, Volume 1.

Livres et monographies

- [5] M. BERNADOU, *Le Calcul Scientifique*, Collection Que Sais-je? P.U.F., 2001.
- [6] D. CHAPELLE, K. J. BATHE, *The Finite Element Analysis of Shells*, Springer Verlag, En préparation.

Articles et chapitres de livre

- [7] P. ALART, M. BARBOTEUX, M. VIDRASCU, « A domain decomposition strategy for non classical frictional multicontact problems », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 190, 2001, p. 4785–4803.
- [8] B. BROGLIATO, A. A. TEN DAM, L. PAOLI, F. GÉNOT, M. ABADIE, « Numerical Simulation of Finite Dimensional Multibody Nonsmooth Mechanical Systems », *ASME Applied Mechanics Reviews*, A paraître.
- [9] D. CHAPELLE, K. J. BATHE, « Optimal consistency errors for general shell elements », *C. R. Acad. Sci. t.332*, 2001, p. 771–776, Série I.
- [10] D. CHAPELLE, « Some new results and current challenges in the finite element analysis of shells », *in : Acta Numerica*, Cambridge University Press, 2001, p. 215–250.
- [11] M. FERNÁNDEZ, P. LE TALLEC, « Un nouveau problème spectral en interaction fluide-structure avec transpiration », *C. R. Acad. Sci.*, soumis.
- [12] M. FERNÁNDEZ, M. MOUBACHIR, « Etude de sensibilité d'un système mécanique en interaction fluide-structure », *C. R. Acad. Sci.* 333, 2001, p. 487–492, Série I.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [13] N. AYACHE, D. CHAPELLE, F. CLÉMENT, Y. COUDIÈRE, H. DELINGETTE, J. DÉSIDÉRI, M. SERMESANT, M. SORINE, J. URQUIZA, « Towards model-based estimation of the cardiac electro-mechanical activity from ECG signals and ultrasound images », *in : Functional Imaging and Modeling of the Heart*, Springer, p. 120–127, 2001.
- [14] M. BERNADOU, S. DEPEYRE, S. HE, « Numerical modelization of magnetic materials based on energy minimization », *in : Review of Progress in QNDE (Quantitative Nondestructive Evaluation)*, 21, à paraître.
- [15] M. BERNADOU, C. HAENEL, « Modelization and numerical approximation of piezoelectric thin shells », *in : Proceedings of the 12th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST'01)*, à paraître.

- [16] M. BERNADOU, C. HAENEL, « Numerical modelization of piezoelectric thin shells », *in : Proceedings of the 3rd International Conference on Non-Linear Problems in Aviation and Aerospace*, E. C. P. Sivasundaram S. (éditeur), p. 71–79, 2001.
- [17] D. CHAPELLE, F. CLÉMENT, F. GÉNOT, P. LE TALLEC, M. SORINE, J. URQUIZA, « A physiologically-based model for the active cardiac muscle contraction », *in : Functional Imaging and Modeling of the Heart*, Springer, p. 128–133, 2001.
- [18] D. CHAPELLE, A. FERENT, « Asymptotic analysis of the coupled model shells-3D solids », *in : First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*, 2001.
- [19] D. CHAPELLE, F. GÉNOT, A. HASSIM, M. SORINE, « Optimisation des gyroscopes vibrants », *in : Colloque National en Calcul des Structures*, p. 829–836, Giens (Var), 2001.
- [20] M. FERNÁNDEZ, P. LE TALLEC, « From ALE to transpiration », *in : First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 2*, p. 1166–1169, 2001.
- [21] M. FERNÁNDEZ, M. MOUBACHIR, « Investigation of sensitivity analysis for fluid-structure interaction systems », *in : First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 2*, p. 1170–1173, 2001.
- [22] P. MEILLAND, M. BERNADOU, S. DEPEYRE, S. HE, « Prediction of magnetic microstructure in iron with a new finite element model », *in : Review of Progress in QNDE (Quantitative Nondestructive Evaluation), 21*, à paraître.
- [23] S. MAMMAR AND J. SAINTE-MARIE AND S. GLASER, « On the use of Steer-by-Wire Systems in lateral driving assistance applications », *in : Proceedings : International Workshop on Robot and Human Interaction*, IEEE, novembre 2001.
- [24] G. VANDERBORCK, A. HASSIM, « Changes in the Structural Vibration Characteristic of Laminated Composites under Impact Loading », *in : Proceedings of the 72th Shock & Vibration Symposium*, Destin, FL, USA, 2001.
- [25] M. VIDRASCU, H. DELINGETTE, N. AYACHE, « Finite element modeling for surgery simulation », *in : First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*, 2001.

Rapports de recherche et publications internes

- [26] D. CHAPELLE, M. VIDRASCU, « Éléments finis de coque pour les nappes de renfort », *Rapport de contrat Michelin*, INRIA, Rocquencourt, 2001.
- [27] M. FERNÁNDEZ, M. MOUBACHIR, « Sensitivity Analysis for an Incompressible Aeroelastic System », *Rapport de Recherche n°4264*, INRIA, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4264.html>.