

Avant-Projet MACS

Modélisation, Analyse et Contrôle pour le Calcul des Structures

Rocquencourt

THÈME 4B

R *apport*
d'Activité

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
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	6
3.1.3	Modèles numériques multi-échelles en structures composites	7
3.2	Solveurs pour le calcul intensif en mécanique du solide	7
3.3	Dynamique des structures et stabilité	9
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	14
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	16
6.3.1	Modèles simplifiés pour l'interaction fluide-structure	16
6.3.2	Analyse dynamique de machines tournantes	17
6.4	Mécanique active	17
6.4.1	Modélisation numérique de coques piézoélectriques	17
6.4.2	Structures gyrovibrantes	18
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	19
7.1	Projet CEP&M: "Calcul des structures en béton. Analyse des singularités par la méthode de décomposition de domaines avec maillages incompatibles"	19
7.2	Sagem: Modélisation du Comportement Dynamique de Machines Tournantes Composites. (Contrat avec l'Inria et le Pôle Universitaire-Léonard de Vinci)	20
7.3	Action fluide-structure LCPC	21

8	Actions régionales, nationales et internationales	22
8.1	Actions nationales	22
8.1.1	Action coopérative "Modélisation d'organes pour la simulation de chirurgie"	22
8.2	Actions internationales	23
8.2.1	Accord Inria-NSF	23
8.2.2	Projet Liapunov "Etude du comportement dynamique des coques résonnantes"	23
8.2.3	Amérique	23
8.2.4	Asie	24
9	Diffusion de résultats	24
9.1	Animation de la communauté scientifique	24
9.2	Enseignement universitaire	24
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	24
10	Bibliographie	26

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 et M3N]

Personnel Inria

Amine Hassim [CR]

Conseiller scientifique

Patrick Le Tallec [Professeur, Ecole Polytechnique]

Collaborateurs extérieurs

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

Michel Bernadou [Professeur, Pôle Universitaire Léonard de Vinci]

Chercheur invité

Michel Delfour [Université de Montréal, professeur invité par MACS/SOSSO à partir d'octobre]

Chercheur post-doctorant

Frank Génot [à partir de septembre, bourse Inria]

Doctorants

Christophe Haenel [Paris 6, jusqu'en avril]

Miguel Fernández [Université Paris Dauphine, bourse MENRT]

Anca Ferent [Ecole Polytechnique, à partir d'octobre]

Daniel Lepikson [Doctorant de l'Université de Saõ Paulo, à partir de mars]

Stagiaires

Anca Ferent [DEA Paris 6, 4 mois]

2 Présentation et objectifs généraux

NOTA : l'avant-projet MACS, créé le 2 juin 1999, fait suite à l'ancien avant-projet MOS-TRA.

La simulation numérique est maintenant 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 oeuvre reposent en effet, de façon incontournable, sur la modélisation et 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 un résultat bien inférieur (parfois de plusieurs ordres de grandeur) à 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 l'Université de Tampere, 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

[Cha96] D. CHAPPELLE, *Etude des Phénomènes de Verrouillage Numérique pour les Problèmes de Coques Minces*, thèse de doctorat, Université Paris VI, juin 1996.

[CS98] D. CHAPPELLE, R. STENBERG, «Stabilized finite element formulations for shells in a bending dominated state», *SIAM Journal of Numerical Analysis* 36, 1, 1998, p. 32–73.

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 oeuvre 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 [CK98,CB98].

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 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"^[Bat96].

Nous nous sommes, en particulier, intéressés à dégager une méthodologie efficace et robuste pour construire automatiquement une carte, au niveau de chaque élément fini, à partir de données provenant d'un maillage de surface. Des éléments finis de type DKT non-linéaires^[LCM95], capables de représenter des grands déplacements, ont été mis au point dans cet esprit par P. Le Tallec et M. Vidrascu. Ces éléments, développés dans le cadre d'un contrat avec PSA, ont déjà été intégrés dans un code industriel du constructeur automobile.

[CK98] D. CHAPELLE, K.J. BATHE, « Fundamental considerations for the finite element analysis of shell structures », *Computers & Structures* 66, 1, 1998, p. 19–36.

[CB98] D. CHAPELLE, K. BATHE, « On general shell finite elements and mathematical shell models », in : *Advances in Finite Element Procedures and Techniques*, B. Topping (éd.), Civil-Comp Press, p. 25–30, Edinburgh, Scotland, 1998.

[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.

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

[LCM95] P. LE TALLEC, M. CARRIVE, J. MOURO, « Approximation par Eléments Finis d'un modèle de coques géométriquement exact », *Revue Européenne des Eléments Finis* 4, 5-6, 1995, p. 633–662.

3.1.3 Modèles numériques multi-échelles en structures composites

L'étude du comportement dynamique de systèmes mécaniques comportant des éléments structuraux en matériaux composites nécessite en général une approche multi-échelles, afin d'intégrer les diverses échelles (stratifiés, plis et constituants) des composites. La simulation directe à l'échelle (microscopique) des constituants étant irréalisable, une représentation à l'échelle des plis supposés homogènes semble raisonnable. La réalisation d'un tel objectif nécessite de pouvoir :

- identifier les lois de comportement de chaque pli à partir des propriétés mécaniques et géométriques à l'échelle la plus fine (fibre, matrice) ;
- remonter aux contraintes locales à partir d'une solution homogénéisée. Cette approche qui s'appuie sur des techniques de développements asymptotiques (voir A. Bensoussan, J.L Lions, G. Papanicolaou ^[BLP78], Duvaut ^[Duv76]) est classique et a fait l'objet de larges développements à l'Inria ;
- modéliser l'endommagement à l'échelle des plis avec des variables moyennant les phénomènes complexes (micro-fissuration de la matrice et décohésion fibre-matrice). Ce type d'approche basée sur les concepts classiques de la mécanique de l'endommagement a fait l'objet de récents travaux théoriques. Mais le développement et la validation de modèles numériques fiables et performants restent à compléter ^[HV98].

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*

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

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

[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.

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 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 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. D'autre part, le mauvais conditionnement est un frein pour 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, au niveau 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 quelle que soit la géométrie et le nombre des sous-domaines utilisés.

[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 (éd.), 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.

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.

Pour l'instant, les travaux réalisés par l'équipe dans ce domaine ont principalement 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 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 probablement peu robustes en pratique. Pour obtenir des lois robustes et optimiser les marges de stabilité du système contrôlé, le recours à des méthodes et stratégies issues d'autres branches du contrôle d'EDP (semi-groupes...) et de l'automatique paraît nécessaire.

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, Hae99, BLB98, BH95, BH98, BH99]). 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 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

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

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

[A.B97] A. BLANGUERNON, *Contrôle Actif de Poutres et de Plaques à l'aide d'un Composant Piézocéramique*, Thèse de doctorat, Université Paris VI, mars 1997.

[Hae99] C. HAENEL, *Modélisation, Analyse et Simulation Numérique de Coques Piézoélectriques*, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 1999, Soutenance prévue en décembre.

[BLB98] A. BLANGUERNON, F. LÉNÉ, M. BERNADOU, « Active control of a beam using a piezoceramic element », *Smart Mater. Struct.* 8, 1998, p. 116–124.

[BH95] M. BERNADOU, C. HAENEL, « On the numerical analysis of general piezoelectric thin shells », in : *Computational Mechanics 95*, Springer-Verlag, p. 1650–1655, 1995. Vol. 2.

[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.

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 (§7.3). Par ailleurs, un contrat industriel, portant sur le calcul de grandes structures off-shore par décomposition de domaines, est en cours de réalisation (voir 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 actif 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 (voir notamment §7.2).
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. Pour l'instant, deux sujets de recherche applicative ont été identifiés : les écoulements sanguins (et les déformations concomitantes des vaisseaux) et la simulation des déformations d'organes sous l'effet d'un outil chirurgical, dans le but de concevoir un simulateur d'opération. Une "action de recherche coopérative" est engagée sur cette deuxième application (voir §8.1.1) 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).

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, qu'ils concernent 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 désormais téléchargeable sur le serveur Web de l'Inria-Rocquencourt (<http://www-rocq.inria.fr/modulef/>). Ce nouveau statut facilitera 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.

5.2 Comportement de stratifiés composites sous chocs

Participant : Amine Hassim [correspondant].

ADANIDEC est un logiciel pour l'étude du comportement de structures composites multicouches sous impact. ADANIDEC consiste en :

- une **base de données matériaux** qui contient pour quelques stratifiés composites : (1) à l'échelle du multicouches : la description du stratifié, des résultats de tests expérimentaux et simulations numériques, (2) à l'échelle du pli : les caractéristiques mécaniques (propriétés effectives, contraintes à la rupture, constantes du modèle d'endommagement,...), (3) à l'échelle des constituants, lorsque que c'est possible, les propriétés mécaniques de la fibre et de la matrice, et la description géométrique du volume représentatif.
- des **logiciels** : (1) à l'échelle du multicouche : IMPACT pour calculer le comportement de composites stratifiés sous chargement dynamique, (2) à l'échelle du pli : COMEP pour calculer les propriétés effectives de la couche par utilisation des techniques d'homogénéisation, et (3) des logiciels pour interfacier la base de données matériaux à différents codes de simulations numériques du comportement dynamique des structures (DYNA3D, ANSYS, IMPACT, COMEP).

Une interface graphique Tcl/Tk aide l'utilisateur à manipuler la base de données matériaux et les logiciels aux trois échelles caractéristiques des stratifiés composites : stratifié, pli et constituants (fibre et matrice).

Un menu déroulant permet à l'utilisateur de fabriquer un multicouche en sélectionnant les matériaux dans la base de données, de prédire la tolérance aux chocs de ce stratifié et d'identifier la structure optimale vis-à-vis des chocs en utilisant IMPACT.

5.3 Dynamique des structures

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

Le logiciel **dynaxx** pour 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 §7.3).

6 Résultats nouveaux

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

Participants : Michel Bernadou, Dominique Chapelle, Anca Ferent, Daniel Lepikson, Amine Hassim, Marina Vidrascu.

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

Résumé : *Les actions engagées dans ce domaine portent plus spécifiquement sur les thèmes suivants :*

- i) Fiabilité des méthodes numériques pour les coques minces,*
- ii) Eléments finis de coques pour les applications industrielles,*
- iii) Comportement dynamique de stratifiés composites sous impact.*

6.1.1 Fiabilité des méthodes numériques pour les coques minces

Résumé : *Nous avons formulé et commencé à tester numériquement de nouveaux éléments de coques reposant sur une discrétisation du modèle de Naghdi et s'inspirant des éléments MITC pour éviter le verrouillage numérique.*

Parmi les nombreux éléments finis de coques utilisés par les ingénieurs, les éléments MITC^[Bat96] sont connus pour être très performants, en particulier vis-à-vis du phénomène de verrouillage numérique (cf. notamment [6, 7]). Or, pour une large part, l'analyse mathématique de ces éléments reste à faire, ce qui permettrait non seulement de justifier ces méthodes mais aussi probablement de les améliorer. Pour cela, une difficulté majeure vient de ce que ces éléments ne découlent pas de la discrétisation d'un modèle de coque explicite, mais sont obtenus en "dégénérant" des éléments 3D. Dans [10], nous avons déjà établi des liens entre ces éléments de type "solide dégénéré" et les modèles de coques classiques (en particulier celui de Naghdi). Nous avons poursuivi ce travail en formulant des éléments finis nouveaux qui reposent sur une discrétisation du modèle de Naghdi, tout en s'inspirant des éléments MITC pour les aspects visant à éviter le verrouillage numérique. Parmi la famille ainsi obtenue, l'élément à 9 noeuds (Q2 modifié) a été implémenté et les premiers tests numériques réalisés montrent une supériorité remarquable de cet élément par rapport à un élément Q2 simple. Des tests plus approfondis sont en cours. L'ensemble de ces nouveaux développements constitue le sujet du stage doctoral de Daniel Lepikson. Ces nouveaux éléments, plus accessibles à l'analyse que les éléments MITC eux-mêmes, pourront faire l'objet d'une étude mathématique dans une étape ultérieure.

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

6.1.2 Éléments finis de coques pour les applications industrielles

Résumé : *Nous avons mené deux actions dans ce cadre :*

- i) un travail portant sur l'inclusion d'une couche fine et raide dans un matériau mou (modélisation et simulation);*
- ii) une validation des éléments de coques DKT non-linéaires et des algorithmes de continuation sur un problème industriel.*

Dans ce cadre, nous avons en premier lieu cherché à identifier des modèles mécaniques et des méthodes numériques aptes à représenter correctement l'inclusion d'une couche fine et raide (typiquement modélisée par une coque) dans un matériau massif plus mou. Les nappes de renfort dans les pneus constituent un exemple d'application-cible pour cette étude. Une première partie de ce travail, dans laquelle nous nous sommes restreints au couplage d'une poutre droite à un solide élastique 2D (le tout en régime linéaire élastique), a été réalisée dans le cadre du stage de DEA d'Anca Ferent (voir [21]). Une analyse asymptotique du problème, assortie de tests numériques, a permis d'identifier les régimes (fonction de l'épaisseur de la couche raide) pour lesquels il est important de prendre en compte l'épaisseur de la couche (et donc les degrés de liberté de rotation). On a également mis en évidence l'importance d'utiliser des éléments finis non-verrouillants pour la structure mince. Anca Ferent va maintenant poursuivre ses travaux dans le cadre d'une thèse, sous la direction de Patrick Le Tallec et de Dominique Chapelle, en s'intéressant au couplage de vraies coques avec un solide 3D, le tout en grands déplacements. Elle a obtenu pour cela une bourse de l'Ecole Polytechnique.

Nous nous sommes également intéressé, en partenariat avec la société Valeo (division embrayages) à la simulation du flambement de diaphragmes d'embrayages, en comparaison avec des résultats d'essais expérimentaux. Cette étude nous a permis de poursuivre la validation en vraie grandeur des éléments de coques DKT non-linéaires^[LCM95] et d'améliorer nos algorithmes de continuation.

6.1.3 Comportement dynamique de stratifiés composites sous impact

Résumé : *Les travaux visent à développer un modèle numérique simplifié pour la simulation d'impacts sur les stratifiés composites. La méthode repose sur l'utilisation d'une deuxième homogénéisation dans l'épaisseur du stratifié qui était jusqu'ici modélisé à l'échelle des plis homogénéisés.*

Cette possibilité d'utiliser la double homogénéisation sera intégrée dans ADANI-DEC pour l'étude de la tenue aux chocs de stratifiés composites.

Dans la continuité des travaux menés ces dernières années, nous nous sommes attachés d'une part à développer un modèle numérique simplifié qui permette de simuler l'impact sur les stratifiés composites, d'autre part à comparer les résultats obtenus à l'aide de ce modèle à ceux fournis par les versions antérieures.

[LCM95] P. LE TALLEC, M. CARRIVE, J. MOURO, « Approximation par Éléments Finis d'un modèle de coques géométriquement exact », *Revue Européenne des Éléments Finis* 4, 5-6, 1995, p. 633-662.

A titre d'exemple, nous avons considéré une plaque constituée de 34 couches de tissus verre-epoxy ($0^\circ - 90^\circ$), d'épaisseur totale de 8 mm. L'impacteur de 100 g avec une vitesse initiale de 10 m/s vient impacter le stratifié en son centre.

Le premier problème est de déterminer l'échelle de discrétisation. Dans les études antérieures le stratifié était modélisé à l'échelle de la couche considérée comme homogène. Les propriétés effectives de la couche étant obtenues par utilisation des techniques d'homogénéisation.

La méthode utilisée pour obtenir un modèle simplifié repose sur l'utilisation d'une deuxième homogénéisation dans l'épaisseur du stratifié. Nous avons ainsi considéré le stratifié constitué de 8 couches, 4 couches puis 1 couche.

Les comparaisons entre les différents modèles ont porté sur le déplacement et vitesse de l'impacteur ainsi que sur la force de contact.

Nous étudions la possibilité, à partir de ce modèle simplifié, d'obtenir une bonne représentation du champ de contraintes à l'échelle des 34 couches de façon à estimer les endommagements liés au choc.

Cette étude a été réalisée en collaboration avec Thomson Marconi Sonar et le logiciel ADANIDEC (cf. §5.2) a été utilisé pour les différentes simulations numériques.

Nous envisageons, au terme de cette série de validations numériques, l'intégration dans ADANIDEC de la possibilité d'utiliser la double homogénéisation pour générer automatiquement un modèle simplifié.

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 quelques 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

Résumé : *L'algorithme de type Newton avec continuation combiné à une résolution par décomposition de domaines du problème tangent est un outil robuste pour résoudre un problème d'élasticité non linéaire.*

Dans le cadre de l'action transversale "Modélisation d'organes", un modèle précis de déformation du foie a été étudié. Le foie est ici considéré comme un matériau hyperélastique incompressible. Le but de cette étude est de comparer les résultats à ceux obtenus avec un modèle linéaire (voir 8.1.1). Afin de modéliser la capsule de Glisson, (la membrane qui enveloppe le foie) un modèle surfacique de coque à forte résistance membranaire a été couplé au modèle

volumique sous-jacent (avec des contraintes de déplacements égaux entre les deux). Le système ainsi obtenu est très mal conditionné et permet donc de valider la fiabilité du préconditionneur utilisé.

6.3 Dynamique des structures et stabilité

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

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

6.3.1 Modèles simplifiés pour l'interaction fluide-structure

Résumé : *L'objectif de ce travail est l'obtention 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).*

Les techniques classiques de simulation numérique de phénomènes d'interaction fluide-structure reposent sur le couplage, par des algorithmes appropriés, d'un "code solide" qui simule le comportement de la structure soumise aux effets induits par l'écoulement d'une part, et d'autre part d'un "code fluide" capable de prendre en compte les déplacements de la structure baignée par le fluide, en général par le moyen d'une modélisation "arbitrairement lagrangienne-eulerienne" (ALE)^[DGH82]. Ces techniques, qui sont adaptées aux cas de grands déplacements de l'interface, sont très coûteuses en temps de calcul, du fait surtout du domaine fluide, car aux difficultés inhérentes à la simulation du fluide (modèles non-linéaires, effet de la convection, etc.) s'ajoutent, à chaque pas de temps, des modifications d'ordre géométrique liées au déplacement de la structure qui doivent être prises en compte dans l'ensemble du domaine fluide.

Si les déplacements de la structure sont de petite amplitude une modélisation ALE peut paraître excessive. L'apport principal du travail de recherche réalisé au cours de cette année repose sur le développement d'un modèle linéaire d'interaction fluide-structure, qui permet de prendre en compte les effets de la structure en conservant un domaine fluide fixe dans un cadre de petits déplacements de l'interface. Ensuite, ce modèle est obtenu au moyen d'une linéarisation des équations de Navier-Stokes incompressibles en formulation ALE. Cette linéarisation permet en particulier d'obtenir des conditions aux limites de type "transpiration" qui reposent sur une justification théorique. Cette étape de travail a abouti à un rapport de recherche Inria [18] et une communication orale au congrès Espagnol de mathématiques appliquées.

[DGH82] J. DONEA, S. GIULIANI, J. HALLEUX, « An arbitrary Lagrangian Eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 33, 1982, p. 689–723.

6.3.2 Analyse dynamique de machines tournantes

Résumé :

L'objectif de cette étude est le calcul du comportement dynamique d'une structure industrielle dont plusieurs composants en matériaux composites tournent à très grande vitesse.

Cette étude se place dans la suite logique de la précédente dans laquelle les structures étaient en matériaux métalliques homogènes et isotropes. Cette 2^{ème} Phase se caractérise par la prise en compte de composants structuraux en matériaux composites.

Il s'agit dans un premier temps de calculer l'évolution des fréquences naturelles en fonction des vitesses de rotation afin de déterminer les vitesses critiques (diagramme de Campbell) et les possibles instabilités. Dans un deuxième temps, on calcule les déformées à des excitations synchrones (balourds) ainsi que les contraintes dynamiques au passage des vitesses critiques (voir & 7.2).

6.4 Mécanique active

Participants : Michel Bernadou, Frédéric Bourquin¹, Dominique Chapelle, Manuel Collet², Michel Delfour, Frank Génot, Amine Hassim, Christophe Haenel, Michel Sorine³.

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

Résumé : *Les activités actuelles de MACS en mécanique active peuvent être regroupées selon deux rubriques :*

- i) la modélisation numérique de matériaux piézoélectriques (de type coques minces) et de matériaux magnétostrictifs. Une bonne maîtrise de ces modélisations est indispensable car ces matériaux sont utilisés dans la réalisation de la plupart des capteurs et des actionneurs ;*
- ii) la modélisation et le contrôle de structures gyrovibrantes, qui sont des capteurs inertiels d'un type nouveau.*

6.4.1 Modélisation numérique de coques piézoélectriques

Dans la plupart des applications utilisant des matériaux piézoélectriques, ces matériaux apparaissent sous la forme de structures minces, de type plaques ou coques, ou bien des pastilles réalisées à l'aide de ces matériaux sont collées sur des structures minces réalisées à l'aide de matériaux classiques.

Une première partie de l'étude consiste à obtenir des modèles de coques piézoélectriques bidimensionnels :

- par intégration sur l'épaisseur, nous obtenons un premier modèle bidimensionnel simplifié qui s'apparente pour l'aspect purement mécanique au modèle de coque mince de

1. LCPC

2. PULV

3. projet SOSSO

W.T. Koiter. La simplification consiste à négliger les termes d'énergie qui sont d'ordre e/R par rapport aux termes principaux retenus (ici e = épaisseur, R = rayon de courbure moyen de la coque);

- par analyse asymptotique, ce qui débouche, moyennant des conditions assez restrictives, sur un modèle de coque membranaire et sur un modèle de coque en flexion.

Le premier modèle est ensuite approché par une méthode d'éléments finis conforme (l'élément de type P4-Ganev pour approcher les composantes tangentielles du déplacement, l'élément de type P5-Argyris pour approcher la composante transe). Des tests numériques sur une plaque puis sur un cylindre illustrent la pertinence de la méthode.

Ce qui précède est repris ensuite dans le contexte d'équations dynamiques de coques piézoélectriques.

Enfin, en vue d'applications au contrôle actif des structures, nous abordons la modélisation de composants piézoélectriques insérés dans, ou collés sur, des structures constituées de matériaux classiques.

L'ensemble de ce travail constitue la thèse de C. Haenel.

6.4.2 Structures gyrovibrantes

Ce travail de recherche, qui est en phase de démarrage, s'intègre en grande partie dans le projet Liapunov "Etude du comportement dynamique des coques résonnantes" (cf. 8.2.2). Il s'inscrit également dans le prolongement de travaux déjà réalisés dans le projet SOSSO^[CS92].

De façon générale, les gyrovibrants sont des systèmes mécaniques dont certains modes de vibration présentent des propriétés de type gyroscopique. Dans le travail en cours, on s'intéresse plus particulièrement aux gyrovibrants dont le système mécanique sous-jacent est constitué par une coque mince. Un exemple d'un tel gyrovibrant est constitué par le résonateur hémisphérique (HRG)^[ZK85].

Plus spécifiquement, les objectifs sont de

1. Mieux comprendre les phénomènes mécaniques qui sont à la base des propriétés gyroscopiques des gyrovibrants en général, et des coques résonnantes en particulier ;
2. Identifier et implémenter des méthodes numériques permettant de simuler les phénomènes gyroscopiques dans les coques résonnantes, ce qui nécessite de savoir simuler le comportement dynamique de structures soumises à un mouvement d'ensemble dans un repère inertiel ;
3. Identifier et mettre en oeuvre (numériquement) des stratégies de contrôle réalistes et robustes permettant d'assurer le bon fonctionnement des gyrovibrants (entretien des vibrations gyroscopiques, élimination des perturbations).

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

[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.

[ZK85] V. ZHURAVLEV, D. KLIMOV, *Gyroscope à Résonateur Hémisphérique*, M. Nauka, 1985.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Projet CEP&M : “Calcul des structures en béton. Analyse des singularités par la méthode de décomposition de domaines avec maillages incompatibles”

Participants : Michel Bernadou, Dominique Chapelle, Patrick Le Tallec, Marina Vidrascu.

Cette étude est menée avec la société Doris-Engineering.

Les structures offshore en béton se caractérisent par des épaisseurs d'éléments en béton qui varient beaucoup (de 0.4m à 1.5m). Les intersections de ces éléments sont massives et peuvent avoir des formes compliquées. L'analyse de la structure se fait à partir d'un modèle global plus ou moins raffiné. Pour des raisons de coût, les intersections ne présentent pas le même degré de raffinement que les parties courantes. L'analyse de ces “singularités” se fait en générant en utilisant un maillage plus fin, qui se raccorde au modèle éléments finis global sur des frontières spécialement choisies.

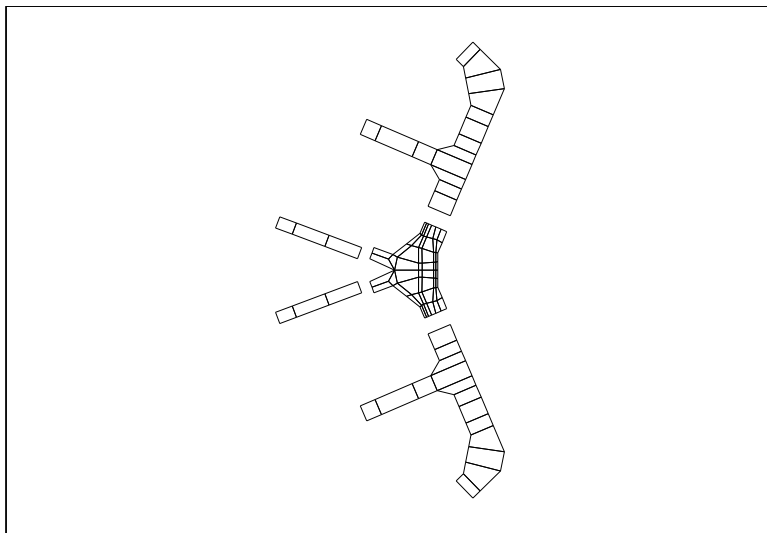


FIG. 1 – Coupe horizontale des différents sous-domaines

Le but de cette étude est de développer une méthode numérique, basée sur des techniques de décomposition de domaines avec des maillages incompatibles, qui permette de déterminer

précisément les contraintes dans les intersections massives.

Cette année le travail a consisté, plus précisément, à définir un modèle plus robuste qui prenne en charge le rééquilibrage des forces externes ainsi qu'un nouveau modèle de maillage incompatible. Pour conclure cette étude, cette approche sera validée sur plusieurs cas de charge concrets fournis par Doris-Engineering. Nous considérons un nouveau maillage adapté de l'intersection de deux éléments épais (voir figure 7.1. Le calcul des contraintes dans les parties où le ferrailage est renforcé permettra de justifier le choix de ces zones.

7.2 Sagem : Modélisation du Comportement Dynamique de Machines Tournantes Composites. (Contrat avec l'Inria et le Pôle Universitaire-Léonard de Vinci)

Participants : Michel Bernadou, Manuel Collet⁴, Amine Hassim, Michel Sorine⁵.

Cette étude se place dans la suite logique de la précédente dans laquelle les structures étaient en matériaux métalliques homogènes et isotropes. Cette 2^{ème} Phase se caractérise par la prise en compte de composants structuraux en matériaux composites.

Le système mécanique est composé de 3 principaux sous-ensembles :

- une partie tubulaire constituée de tronçons de tubes séparés par des raccords (tronçons de tubes plus souples) et de deux cloisons-disques ;
- une partie dite "fond" supportant le moteur et permettant la liaison mécanique avec le palier bas ;
- une partie "couvercle" supportant le palier haut.

L'ensemble, disposé verticalement, est mis en vitesse par un moteur disposé en bas de la machine autour de son axe de révolution. Le maintien autour de cet axe est réalisé à partir de paliers réalisant en partie inférieure une liaison de type rotule, et en partie supérieure en centrage court. La structure complète comprend :

- des parties structurales en matériaux composites fibre de carbone-résine époxy : tronçon de tube, fonds inférieur et supérieur, disques inférieur et supérieur, raccords.
- des liaisons (joint de colle époxy) entre ces pièces,
- des composants métalliques : palier inférieur, rotor moteur, palier supérieur. Les paliers sont caractérisés par des matrices de raideur et d'amortissement dont les coefficients sont fonction de la vitesse de rotation.

Bien que l'objectif final soit l'estimation de la durée de vie de la structure complète, l'étude proposée se limite à la détermination des zones les plus sollicitées où la fatigue peut apparaître, des modes de sollicitations ainsi que des contraintes au passage des vitesses critiques et à l'analyse de la réponse de la structure vis-à-vis de ses différents défauts (signature des défauts).

4. PULV

5. projet SOSSO

Dans la modélisation, les parties tournantes et les parties fixes ont un comportement linéaire et leurs déformations sont supposées petites. Les effets thermiques ainsi que la pression interne sont supposés négligeables.

Cette étude a été réalisée en quatre étapes.

- La modélisation géométrique et mécanique : optimisation du maillage 3D axisymétrique et génération des données mécaniques nécessaires à l'étude.
- L'analyse du comportement dynamique de la structure tournante dans le domaine fréquentiel :
 - calcul (et visualisations globales et locales) des premiers modes propres,
 - analyse du diagramme de Campbell, calcul des fréquences critiques,
 - réponses aux balourds et à des excitations au niveau des points d'ancrage des paliers (bâti).
- Les simulations temporelles permettant d'apprécier les difficultés de la mise en vitesse. Les déplacements ainsi que les contraintes dynamiques ont été calculées pour chacune des couches des composites ainsi que pour les autres parties non composites (collage, parties mécaniques)
- L'étude des contraintes maximales dans les zones les plus sollicitées en fonction des variations des propriétés des paliers. Les paliers sont caractérisés par des matrices de raideur et d'amortissement (anisotropes) dont les coefficients sont fonction de la vitesse de rotation.

7.3 Action fluide-structure LCPC

Participants : Dominique Chapelle, Serge Piperno⁶, Marina Vidrascu.

Le LCPC pilote un partenariat de recherche financé par le Ministère de l'Équipement sur la période 1998–2001, dans lequel MACS est partie-prenante. 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 ("soufflerie numérique").

Cette année, un ingénieur-expert (Pierre-Emmanuel Bournet) a été recruté conjointement par MACS et CAIMAN pour une mission de six mois basée à l'Inria-Sophia. Cette mission a consisté à poursuivre la validation du code NSI3 utilisé dans ce projet en comparant les résultats de simulations à des résultats expérimentaux obtenus en soufflerie par le CSTB autour de profils de ponts. On a ainsi pu évaluer la pertinence des différents modèles de turbulence et de lois de paroi implémentés dans NSI3 dans les configurations d'écoulement qui intéressent le projet. La majeure partie de ces validations a été réalisée avec une structure fixe, mais des résultats préliminaires ont également été obtenus avec une structure en déplacements imposés.

6. projet CAIMAN

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions nationales

8.1.1 Action coopérative “Modélisation d’organes pour la simulation de chirurgie”

Participants : Patrick Le Tallec, Marc Thiriet⁷, Marina Vidrascu.

Cette action est animée par Hervé Delingette (Projet Epidaure) Les équipes concernées sont : projets Epidaure et Sinus de l’Inria Sophia-Antipolis, projets Imagis et Sharp de l’Inria Grenoble, projets MACS et M3N de Rocquencourt et l’IRCAD de Strasbourg.

La contribution de MACS/M3N est de développer un modèle biomécanique aussi réaliste que possible et de comparer les résultats obtenus à l’aide de ce modèle à ceux fournis par les modèles simplifiés en temps réel.

Le modèle considéré est un solide 3D mou et incompressible, enveloppé dans une membrane beaucoup plus raide (la capsule de Glisson). Cette membrane rigide a un effet non-négligeable sur le comportement du foie. En effet les déplacements sont beaucoup plus réguliers (voir figures 2 et 3) et les forces de réaction sont considérablement plus importantes.

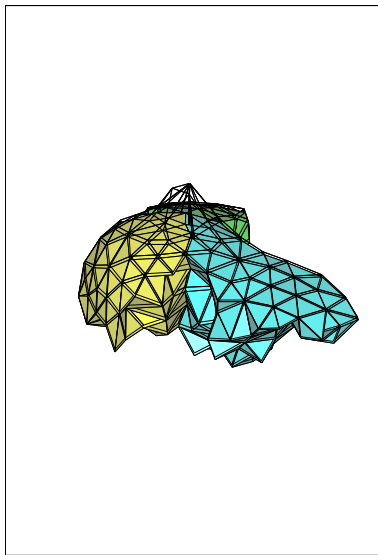


FIG. 2 – Déformations du modèle volumique

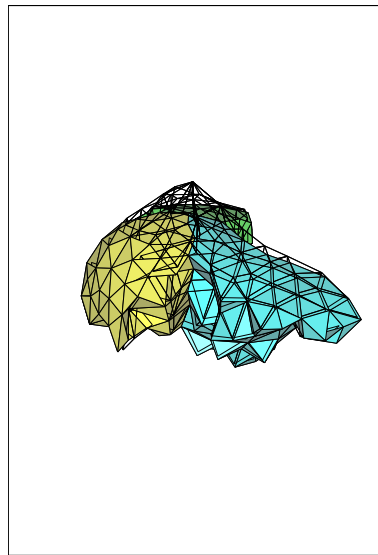


FIG. 3 – Déformations du modèle couplé (avec coques)

L’obtention des caractéristiques physiques des tissus mous est un problème ardu, pas encore bien résolu. Il s’agit de paramètres d’entrée du modèle considéré qui influencent largement les résultats. Pour l’instant la donnée du module d’Young a permis de déterminer les coefficients nécessaires dans la loi hyperélastique. Il y a en particulier des différences importantes suivant que les essais ont été faits in-vivo ou non.

⁷.Projet M3N

D'un point de vue numérique, le problème conduit à des difficultés importantes car, en particulier, les systèmes obtenus sont très mal conditionnés. Pour résoudre, on utilise des techniques de type Newton avec continuation et de décomposition de domaines, qui ont ainsi pu être améliorées.

8.2 Actions internationales

8.2.1 Accord Inria-NSF

Participants : Dominique Chapelle, Marina Vidrascu.

L'action NSF-Inria sur la "Décomposition de Domaines et Parallélisation en Calcul Scientifique" se poursuit. Le coordinateur scientifique est Serge Piperno (Caiman - Sophia). Participent à cette action les projets Caiman, Sinus, M3N et MACS de l'Inria ainsi que les Universités de Boulder, Denver et le Courant Institute.

8.2.2 Projet Liapunov "Etude du comportement dynamique des coques résonnantes"

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

Ce projet, auquel participent les projets MACS et SOSSO en collaboration avec l'Université de Moscou, a été accepté pour la période allant de septembre 1999 à juin 2000.

Les travaux réalisés dans ce cadre concernent la théorie dynamique des gyroscopes à coque vibrante, dont le résonateur hémisphérique (HRG) constitue un exemple. Ces systèmes d'un type nouveau posent des problèmes spécifiques, à la fois au plan mécanique et au plan numérique. En effet, du fait que la coque ne joue pas dans ces dispositifs un rôle proprement structural, mais celui d'un senseur inertiel, les problèmes posés sortent du champ de la théorie classique des coques. Plus spécifiquement, l'analyse du comportement des ondes élastiques se développant dans une coque soumise à un mouvement d'ensemble dans un repère inertiel d'une part, et d'autre part la nécessité de contrôler ces ondes, constituent des points particulièrement délicats. Par ailleurs, l'utilisation d'un milieu élastique comme élément présentant des propriétés inertielles constitue une idée récente, et qui reste largement à développer, en théorie des gyroscopes.

8.2.3 Amérique

- Collaboration sur le verrouillage numérique avec le MIT et ADINA R&D (Pr Bathe).
- Collaboration sur les éléments finis de coques avec l'Université de São Paulo (Miguel Bucalem). C'est dans ce cadre que Daniel Lepikson effectue un stage doctoral chez MACS de mars 1999 à février 2000. D. Chapelle s'est rendu en mission à São Paulo en novembre pour faire le point sur cette collaboration et définir un programme d'actions futures.

8.2.4 Asie

- Mission de D. Chapelle en Malaisie à l'USM (Penang) du 6 au 17 septembre pour le compte du MENRT, du Ministère des Affaires Etrangères et de l'Inria (avec J.P. Puel de l'UVSQ), pour un cours éléments finis et calcul scientifique.

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

Dominique Chapelle est membre des comités éditoriaux des revues "Computers & Structures" et "Computer Modeling in Engineering & Sciences".

Michel Bernadou a été rapporteur de la thèse de A. Sene (Grenoble I et Université Gaston Berger, St Louis, Sénégal), de B. Jemai (Ecole Centrale de Lyon), de P. Karamian (Université de Caen) et a été dans le jury de thèse de C. Haenel (Paris 6) et S. He (Université d'Orsay).

Dominique Chapelle a été "opponent" (avocat général) pour la soutenance de M. Lyly (Helsinki University of Technology, Finlande) et a participé au jury de thèse de P. Karamian (Université de Caen).

Marina Vidrascu a été rapporteur de la thèse de M. Barbotou (Université de Montpellier) et du Projet LTR Parasol, et a participé à un jury de concours d'ingénieur CNRS à l'Université d'Orsay.

Marina Vidrascu représente l'Inria au Firtech Calcul Scientifique.

9.2 Enseignement universitaire

- Dominique Chapelle : Cours de Calcul Scientifique à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Amine Hassim : Cours et T.D sur les *Bases Mathématiques de la méthode des éléments Finis*, au Pôle Universitaire Leonard de Vinci, de Février à Avril 1999.

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Michel Bernadou

- Modélisation numérique des matériaux magnétostrictifs, *Groupe de travail MECAMAT "Couplages Multiphysiques"*, Journées Couplages Mécanique-Magnétisme, LMT Cachan, 7-8 Décembre 1998.
- Numerical approximation of unstressed or prestressed magnetostrictive materials, *SPIE Conference on Mathematics and Control in Smart Structures*, Newport Beach, 1-5 Mars 1999.
- Modélisation numérique de coques minces piézoélectriques, *Groupe de travail MECAMAT "Couplages Multiphysiques"*, Journées Couplages Mécanique-Electrique, Université de Versailles/Saint Quentin en Yvelines, 10-11 mai 1999.

- On the numerical modelization of magnetostrictive materials, *ASME Mechanics and Materials Conference*, Blacksburg (Virginia), June 27-30 1999.
- Contribution to the numerical modelization of piezoelectric thin shells, *ASME Mechanics and Materials Conference*, Blacksburg (Virginia), June 27-30 1999.
- Some results on the modelization and approximation of piezoelectric shells, *ICIAM*, Edinburgh, 5-9 July 1999.
- Actives structures through the use of piezoelectric patches, *Joint French/Chilean Workshop on “Mathematical and Numerical tools for the simulation of complex systems: application to the City of tomorrow”*, Santiago du Chili, 27-30 september 1999.
- Modélisation numérique de matériaux piézoélectriques et magnétostrictifs utilisables en contrôle actif de structures, *Séminaire du Département de Mathématiques de l’EPFL de Lausanne*, 21 Mai 1999

Dominique Chapelle

- Séminaires invités au LNCC (Petrópolis, Brésil) et à l’USP (São Paulo, Brésil).

Miguel Fernàndez

- Un modelo simplificado de interacción fluido-estructura, *XVI Congreso de Ecuaciones Diferenciales y Aplicaciones, VI Congreso de Matemática Aplicada*, 21-24 Septiembre 1999, Las Palmas de Gran Canaria, Espagne.

Marina Vidrascu

- Simulation of the deformations of a human liver by domain decomposition *Mini-symposium on Domain Decomposition at USNCCM’99* 4 -6 août 1999, Boulder
- Simulation du foie *AISIM: 3ème reunion pléinière*, Rocquencourt, 10-12 mai99
- Simulation numérique du foie : Modèle déformable de référence *AISIM: 4ème reunion pléinière*, Sophia-Antipolis, 8-10 septembre 1999
- The Neumann-Neumann domain decomposition algorithm, Université Bergen, janvier 1999
- La méthode des éléments finis : principes et applications, *Journées de la Culture Mathématique*, 27 janvier 1999

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, *Etude des phénomènes de verrouillage numérique pour les problèmes de coques minces*, thèse de doctorat, université de Paris 6, 18 juin 1996.
- [3] P. LE TALLEC, *Domain Decomposition Methods in Computational Mechanics*, North-Holland, 1994, Volume 1.

Livres et monographies

- [4] M. BERNADOU, R. OHAYON (éditeurs), *Tenth International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST'99)*, to appear.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [5] C. HAENEL, *Modélisation, Analyse et Simulation Numérique de Coques Piézoélectriques*, thèse de doctorat, Université Paris VI, 1999.

Articles et chapitres de livre

- [6] K. BATHE, A. IOSILEVICH, D. CHAPELLE, «An evaluation of the MITC shell elements», *Computers & Structures*, à paraître.
- [7] K. BATHE, A. IOSILEVICH, D. CHAPELLE, «An inf-sup test for shell finite elements», *Computers & Structures*, à paraître.
- [8] M. BERNADOU, C. HAENEL, «Modelization and numerical approximation of piezoelectric thin shells, Part1 : The continuous problems; Part 2: Approximation by finite element methods and numerical experiments; Part 3: From the patches to the active structures», *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, à soumettre.
- [9] A. BLANGUERNON, F. LÉNÉ, M. BERNADOU, «Active Control of a beam using a piezoceramic element», *Smart Materials and Structures* 8, 1998, p. 116–124.
- [10] D. CHAPELLE, K. BATHE, «The mathematical shell model underlying general shell elements», *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, à paraître.
- [11] D. CHAPELLE, R. STENBERG, «Locking-free mixed stabilized finite element methods for bending-dominated shells», in: *CRM Proceedings and Lecture Notes, 21*, American Mathematical Society, 1999, p. 81–94.
- [12] P. LE TALLEC, M. VIDRASCU, «Efficient solution of mechanical and biomechanical problems by domain decomposition», *Numerical Linear Algebra with Applications*, à paraître.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [13] M. BERNADOU, C. HAENEL, « Numerical analysis of piezoelectric shells », *in* : *Centre de Recherches Mathématiques, CRM Proceedings and Lecture Notes, 21*, p. 55–63, 1999.
- [14] M. BERNADOU, S. HE, « Numerical approximation of unstressed or prestressed magnetostrictive materials », *in* : *SPIE Conference on Mathematics and Control in Smart Structures, 3667*, 1999.
- [15] M. BERNADOU, « Some approximation methods for linear thin shell problems », *in* : *Centre de Recherches Mathématiques, CRM Proceedings and Lecture Notes, 21*, p. 37–54, 1999.
- [16] D. CHAPELLE, M. FERNÁNDEZ, P. LE TALLEC, « Un modelo simplificado de interacción fluido-estructura », *in* : *Actes du XVIIe CEDYA et VIe CMA*, R. Montenegro, G. Montero, G. Winter (éditeurs), p. 1437–1444, 1999.
- [17] A. HASSIM, G. VANDERBORCK, « Multiple Scale Computational Tool for Laminated Composites », *in* : *Proceedings of the 70th Shock & Vibration Symposium*, Albuquerque, New Mexico, USA, 1999.

Rapports de recherche et publications internes

- [18] D. CHAPELLE, M. FERNÁNDEZ-VARELA, P. LE TALLEC, « Un modèle simplifié d'interaction fluide-structure », *Rapport de recherche*, INRIA, 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3703.html>.

Divers

- [19] M. COLLET, A. HASSIM, « Modélisation du Comportement Dynamique de Rotors Composites », 1999, Convention de recherche Sagem-Inria: rapport étapes 1 et 2.
- [20] M. COLLET, A. HASSIM, « Modélisation du Comportement Dynamique de Rotors Composites », 1999, Convention de recherche Sagem-Inria: rapport final.
- [21] A. FERENT, *Méthodes numériques pour l'inclusion d'une couche raide dans un matériau mou*, Mémoire de DEA, Université Paris 6 et Ecole Polytechnique, 1999, Responsable de stage: D. Chapelle.