

*Projet MACS**Modélisation, Analyse et Contrôle pour le
Calcul des Structures**Rocquencourt*

THÈME 4B

 *R* **apport
d'Activité**

2002

Table des matières

1. Composition de l'équipe	1
2. Présentation et objectifs généraux	1
3. Fondements scientifiques	2
3.1. Introduction	2
3.2. Développement et analyse de méthodes numériques performantes pour le calcul des structures	2
3.2.1. Fiabilité des méthodes numériques pour les coques minces	3
3.2.2. Eléments finis de coques pour les applications industrielles	3
3.2.3. Modèles numériques multi-échelles en structures composites	3
3.3. Solveurs pour le calcul intensif en mécanique du solide	4
3.4. Dynamique des structures et stabilité	5
3.5. Mécanique active	6
4. Domaines d'application	6
4.1. Panorama	6
5. Logiciels	7
5.1. MODULEF	7
5.2. Comportement de stratifiés composites sous chocs	7
5.3. Toolbox OpenFEM sous Matlab et Scilab	8
6. Résultats nouveaux	8
6.1. Développement et analyse de méthodes numériques performantes pour le calcul des structures	8
6.1.1. Fiabilité des méthodes numériques pour les coques minces	8
6.1.2. Eléments finis de coques pour les applications industrielles	9
6.1.3. Comportement dynamique de stratifiés composites sous impact	9
6.2. Mécanique active	11
6.2.1. Optimisation de capteurs à base de câbles vibrants	11
6.2.2. Comportement de l'activité mécanique du cœur	12
7. Contrats industriels	17
7.1. Michelin : simulation du comportement des nappes de renfort dans un pneu	17
8. Actions régionales, nationales et internationales	18
8.1. Actions nationales	18
8.1.1. Action de recherche coopérative ICEMA2 (Images de l'Activité Electro-Mécanique du Cœur)	18
8.1.2. Action de recherche coopérative Vitesv (VIsualisation Tridimensionnelle et Exploration du Système Vasculaire)	18
8.2. Actions internationales	18
8.2.1. Autres collaborations durables	18
9. Diffusion des résultats	18
9.1. Animation de la communauté scientifique	18
9.2. Enseignement universitaire	19
9.3. Participation à des colloques, séminaires, invitations	19
10. Bibliographie	19

1. Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Dominique Chapelle [Ingénieur des Ponts et Chaussées, détaché à l'INRIA]

Responsable permanent

Marina Vidrascu [DR, INRIA]

Assistante de projet

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

Personnel INRIA

Frank Génot [CR]

Amine Hassim [CR]

Jacques Sainte-Marie [Ingénieur des TPE, détaché]

Ingénieur associé

Claire Delforge [à partir du 1er septembre]

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]

Chercheurs post-doctorants

Arnaud Münch [à partir du 1er septembre]

Robert Cimrman [à partir du 1er septembre]

Doctorant

Anca Ferent [Ecole Polytechnique, jusqu'à fin septembre]

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 la 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

3.1. Introduction

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.

3.2. 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 ».

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

- la fiabilité des méthodes de coques,
- les éléments finis de coques pour les applications industrielles,
- 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.

3.2.1. *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. Chappelle a contribué, à travers sa thèse de doctorat [36], 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 [37]. 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. Chappelle et K.J. Bathe (Professeur au MIT, fondateur et directeur de la société ADINA R&D, Inc.), voir notamment [35], [2].

3.2.2. *Éléments 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 [27]), ou encore des méthodes de type « general shell elements » [2].

3.2.3. *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 recaler 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 [26] [38], 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'écriture 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 [42]. 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.

3.3. 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

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 ou plusieurs systèmes linéaires de grande taille, creux, non-structurés et, en général, très mal conditionnés (cf. [60]). 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 [59]. 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 [58]).

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.

3.4. Dynamique des structures et stabilité

Mots clés : *vibration, couplage fluide-structure.*

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 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 aviateurs).

3.5. Mécanique active

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

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 »[51][52]), 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 [49] (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 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 [47][54] 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. [32][41][33][29][30]), [28]. 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'application

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 prépondérant dans les calculs). Une collaboration étroite est engagée avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Ministère de l'Équipement).

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 §8.1.2 et §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) et d'une Toolbox d'éléments finis(cf. §5.3).

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 5.3.

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 ;

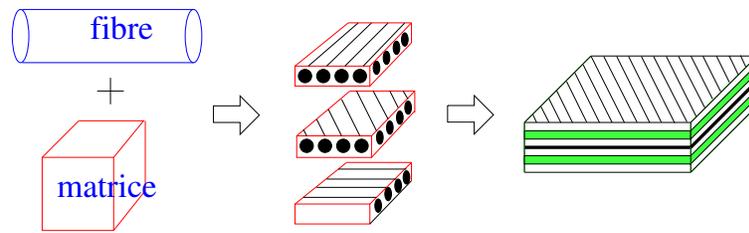


Figure 1.

- 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. Toolbox OpenFEM sous Matlab et Scilab

Participants : Dominique Chapelle, Claire Delforge, Frank Génot, Amine Hassim [correspondant], Marina Vidrascu.

OpenFEM (<http://www.openfem.net>) est une toolbox en opensource qui permet la réalisation de calculs aux éléments finis (pour l'instant en mécanique des solides/structures uniquement) depuis un environnement de calcul matriciel (ECM dans la suite) comme Matlab (<http://www.mathworks.com>) ou Scilab (<http://www.scilab.org>). Elle est réalisée dans le cadre d'une collaboration entre l'INRIA (projet MACS, Rocquencourt) et la société SDTools (<http://www.sdtools.com>).

La possibilité de réaliser des calculs aux éléments finis dans un ECM présente des attraits considérables, que ce soit en termes de diffusion des logiciels et des méthodes, de souplesse de développement, ou encore de facilité d'exploitation des résultats et d'interfaçage.

La première version d'OpenFEM est disponible et téléchargeable sur le site web du logiciel. Elle concerne pour l'instant exclusivement Matlab, mais une version Scilab est en cours de développement.

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

Nous avons poursuivi l'analyse et les tests de l'élément fini de coque-3D baptisé MI3D9, en particulier pour évaluer sa robustesse vis à vis des phénomènes de verrouillage numérique.

En lien avec la problématique de l'inclusion d'éléments de coque dans un milieu tridimensionnel, voir 6.1.2 et 7.1, nous avons poursuivi la formulation, l'analyse, et les tests d'une méthode d'éléments finis que nous qualifions de « coque-3D ». Cette dénomination signifie que ces éléments finis présentent des caractéristiques (description géométrique, degrés de liberté) identiques à celles d'éléments de solide tridimensionnel, tandis que le modèle mécanique sous-jacent à ces éléments de coque-3D correspond à un modèle de coque. L'élément ainsi formulé et étudié, baptisé MI3D9, utilise les mêmes stratégies d'interpolation mixte des déformations

de membrane et de cisaillement que l'élément MITC9 dans le but d'éviter les phénomènes de verrouillage associés [6]. En outre, il comporte un schéma d'interpolation mixte nouveau pour traiter le verrouillage en pincement qui est inhérent (et spécifique) aux formulations de coque-3D [11].

Une évaluation numérique poussée de l'élément MI3D9 a été menée en employant des problèmes-test spécialement conçus pour mesurer la robustesse des éléments de coque [6]. Les résultats obtenus montrent un comportement relativement robuste vis à vis des phénomènes de verrouillage numérique, sans pour autant que le comportement de l'élément en modes de déformation membranaire ne soit trop affecté par les schémas d'interpolation mixte (qu'on peut interpréter comme des méthodes d'intégration numérique réduite).

Ces résultats sont détaillés dans le mémoire de thèse d'Anca Ferent (thèse soutenue le 2 octobre) [7].

6.1.2. *Éléments finis de coques pour les applications industrielles*

Dans le but de modéliser et simuler les nappes de renfort dans les pneus nous avons formulé des éléments de coque-3D, en grands déplacements, sur la base d'éléments de coque classiques et en utilisant une technique de pénalisation pour construire des éléments dont les degrés de liberté sont compatibles avec déplacements aux interfaces.

En relation avec le partenariat de recherche entre MACS et la société Michelin, le problème se pose de savoir modéliser et simuler efficacement l'inclusion de couches minces raides (et de surcroît fortement anisotropes) dans un milieu tridimensionnel, voir 7.1 et également 6.1.1. Les formulations de coques, adaptées à ce problème du fait de la finesse des couches, se prêtent mal au couplage de par la non-coïncidence des interfaces géométriques avec la surface moyenne de la coque sur laquelle le modèle de coque est formulé. On peut « déporter » les degrés de liberté de la coque aux interfaces en utilisant des relations linéaires, ce qui revient à transformer l'élément de coque en élément de coque-3D, voir 6.1.1. Cependant les déplacements équivalents aux interfaces ne sont pas indépendants car les modèles de coques classiques reposent sur une cinématique (de type Reissner-Mindlin) qui ne prévoit pas de déformation transverse (de pincement). Nous avons donc formulé des éléments (dans le cadre non-linéaire en grands déplacements) qui utilisent une raideur numérique additionnelle pour rendre compte de cette contrainte par pénalisation, ce qui permet donc d'obtenir des éléments de coque-3D à partir d'éléments de coques existants, en l'occurrence les éléments MITC4 et MITC9 [6]. Les éléments ainsi obtenus ont été testés sur des cas-tests classiques, et également pré-validés sur un cas-test industriel directement inspiré des motivations de ce travail, voir figure 2.

Les perspectives de ce travail concernent la formulation d'éléments de coques reposant sur une cinématique plus riche, à l'exemple de l'élément MI3D9 (voir section 6.1.1), ce qui évite le recours aux techniques de pénalisation. On prévoit également l'introduction de lois de comportement spécifiques, avec la prise en compte des problèmes d'identification correspondants, pour représenter correctement le comportement complexe des nappes de renfort.

6.1.3. *Comportement dynamique de stratifiés composites sous impact*

La perte de rigidité locale due à l'endommagement est introduite comme une perturbation de la structure saine. À chaque évolution de l'endommagement, les calculs des termes de perturbations 1^{er} et du 2nd ordre ne font intervenir que des quantités locales faciles à mettre en oeuvre. L'implémentation dans un environnement de travail qui fonctionne sous Matlab est en cours.

Les travaux réalisés dans l'étude du comportement dynamique de stratifiés composites sous impact contribuent au développement et à la mise en place d'outils numériques pour l'évaluation de la tenue aux chocs de matériaux composites. Notre objectif est de construire un outil de calcul robuste et simple basé sur :

- l'utilisation des techniques de développements asymptotiques pour la caractérisation du comportement mécanique de chaque couche composite.
- l'identification de la loi d'évolution de l'endommagement à l'échelle du pli, réalisée à partir d'expériences simples et reproductibles.
- la méthode des éléments finis pour la prédiction de l'endommagement dans les différentes couches et le calcul de la réponse de structures à des impacts.

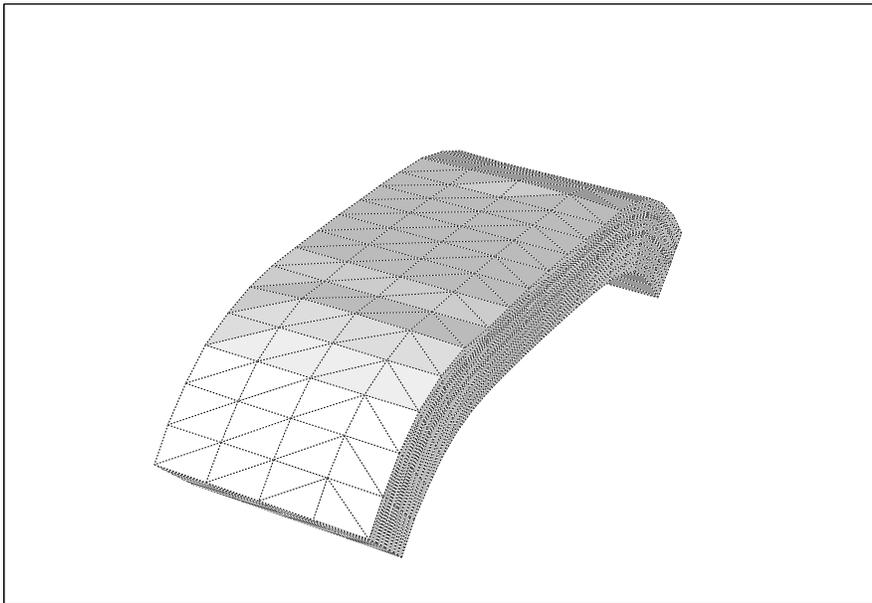


Figure 2. Pneu déformé

Dans la continuité des travaux menés l'année dernière, nous avons poursuivi l'utilisation de la méthode de superposition modale combinée à une méthode de perturbation pour la recherche des *modes propres de vibration* les plus affectés par l'endommagement de la structure. La motivation de ce travail est l'exploitation de la méthode sur un problème de grande taille d'origine industrielle, en collaboration avec G. Vanderborck (Thales Underwater Systems).

Il faut rappeler en effet que le coût d'une intégration directe des équations non linéaires est nettement supérieur à celui d'une superposition modale, ce qui restreint l'utilisation de cette technique à des expériences numériques académiques de type choc sur éprouvette.

Nous travaillons actuellement à l'implémentation du logiciel dans un environnement de travail qui fonctionne sous Matlab. Le principal avantage de l'environnement Matlab est d'accélérer considérablement la vitesse de développement et la diffusion du logiciel.

6.2. Mécanique active

Participants : Frédéric Bourquin, Robert Cimrman, Dominique Chapelle, Frank Génot, Amine Hassim, Jacques Sainte-Marie, Michel Sorine [projet SOSSO].

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

6.2.1. Optimisation de capteurs à base de câbles vibrants

Nous nous sommes intéressés à une nouvelle génération de capteurs de déplacements pour le génie civil.

Les câbles vibrants peuvent être exploités en tant que capteurs pour mesurer des déplacements relatifs. Le principe sous-jacent réside dans le fait que la fréquence fondamentale d'un câble dépend directement de son élongation. A l'origine, pour ce type de capteurs essentiellement utilisés sur les grandes structures telles qu'on en rencontre en génie civil, l'excitation, nécessaire à la mesure, était engendrée par une percussion : typiquement, un opérateur tapait avec une masse sur le câble tendu. Depuis, l'opérateur a été remplacé par un bobinage actif très proche du câble en fer. Le principe de mesure n'en demeure pas moins le même : la fréquence fondamentale est extraite de la réponse globale du système à l'excitation. Ce type de technologie, à très faibles coûts, pose néanmoins des problèmes d'encombrement et se limite à des câbles de faible longueur.

Position du problème.

Une nouvelle génération de capteurs, pour laquelle l'excitation est obtenue par un ensemble d'aimants passifs, d'égale induction magnétique par unité de longueur mais de longueur variable, distribués le long du câble désormais actif, est actuellement en étude au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées [17]. Elle présente les avantages d'être beaucoup moins encombrante et de se prêter à des structures de grande taille. Nous nous sommes concentrés sur l'optimisation de ce dispositif de mesure et, plus particulièrement, sur le problème de l'optimisation des aimants.

Critère d'optimisation.

La mesure s'effectue en deux temps. Tout d'abord, une tension électrique constante est appliquée au câble : ce dernier commence à vibrer (loi de Laplace) jusqu'à atteindre, en raison de l'amortissement interne, un état d'équilibre correspondant à une déformation constante. Une fois cette position atteinte, la tension est coupée. En raison de la déformation imposée précédemment, le câble vibre à nouveau, induisant un courant électrique (loi de Lenz) que l'on mesure.

En supposant que le mode fondamental est celui qui vibre de manière prépondérante (ce qui se réalise en pratique après un certain temps, l'amortissement augmentant avec les fréquences propres croissantes), la fréquence fondamentale est lue par une technique simple de comptage de zéros. Le critère d'optimisation consiste naturellement à déterminer la position et la longueur de chacun des aimants de manière à maximiser la contribution, à la déformation initiale, du mode propre fondamental par rapport à celles des modes propres suivants.

Optimisation des aimants.

Pour une structure 1D générale, ce problème d'optimisation peut s'interpréter comme la recherche d'une formule de quadrature gaussienne généralisée avec comme fonction poids la première déformée modale. Les

points d'intégration correspondent aux positions des N aimants et les poids aux longueurs. Ce problème admet une solution unique si la base finie de fonctions considérées dans le critère d'orthogonalité (ici les modes propres successifs de la structure mécanique) constitue un système de Tchebychev (théorème de Karlin-Studden). Cette hypothèse s'avère vérifiée en pratique pour un câble homogène, dont le comportement mécanique, en première approximation, est identique à celui d'une corde vibrante.

On montre alors que la solution optimale est celle correspondant à des aimants équirépartis le long du câble homogène, la longueur de chaque aimant étant donnée par une expression analytique. La configuration obtenue est celle déjà connue des praticiens sous le terme de « filtre modal » : le critère de Tchebychev garantit que cette configuration est optimale à l'ordre $2N$, c'est-à-dire qu'avec N aimants, on observe le mode fondamental et que cette observation n'est pas perturbée par les $2N - 1$ modes suivants.

Extensions.

Nous travaillons actuellement à l'extension des travaux précédents à des problèmes d'observation modale plus généraux. En particulier, pour la même structure, il est aisé de prouver qu'avec N capteurs de position équirépartis, il est possible d'observer un mode donné θ_j , $j \in \{1, \dots, N\}$ sans que la mesure soit perturbée par les modes θ_k , $k = 1, \dots, 2N + 1$, $k \neq j$. Il suffit pour cela de modifier les poids associés à chaque capteur. L'extension de ces résultats à des structures plus complexes passe probablement par la traduction de la propriété de Tchebychev des modes propres en des termes mécaniques, en liaison avec les propriétés à la Sturm-Liouville.

Ce travail s'inscrit de manière plus générale dans la perspective de conception de nouvelles structures intelligentes munies dès leur conception d'un dispositif d'observation constitué d'un réseau de capteurs indépendants répartis au coeur de la structure.

6.2.2. Comportement de l'activité mécanique du cœur

L'objectif général est ici la mise au point d'outils permettant d'analyser le comportement du muscle cardiaque à partir de données de type ECG et imagerie médicale, et fournir ainsi une aide au diagnostic de certaines pathologies liées à la conduction ou à la contraction au sein du muscle. Un tel objectif nécessite la modélisation et la simulation du comportement électromécanique du myocarde puis le développement de techniques d'asservissement du modèle sur les mesures disponibles.

Ce travail est lié à l'action de recherche coopérative ICEMA2 (voir 8.1.1)

Position du problème

Le but final est la mise au point d'un dispositif utilisant la complémentarité des observations et de la modélisation, capable de simuler l'excitation électrique, les déformations et les contraintes du muscle cardiaque d'un patient à l'aide :

- d'un modèle électromécanique du cœur,
- de mesures in vivo de différentes natures, en particulier des déformations du cœur, et éventuellement de l'activité électrique.

La simulation numérique d'un modèle du cœur permet d'obtenir la valeur de chacune des variables d'état en tout point et à tout instant, les résultats dépendant alors essentiellement de l'acuité du modèle.

Par ailleurs, les diverses mesures in vivo de l'activité cardiaque (électrique et cinématique) sont bruitées, et avec un échantillonnage spatial et temporel faible, ce qui rend leur interprétation et donc le diagnostic malaisés. Il est ainsi particulièrement important, à partir de mesures éparses dans l'espace et dans le temps, de pouvoir remonter à une connaissance globale de l'organe et de son activité.

La démarche retenue, avec asservissement d'un modèle sur des données expérimentales, vise à tirer parti de la richesse d'un modèle physique complexe en exploitant de manière adaptative l'ensemble des mesures disponibles.

Modélisation

Il est communément admis que les travaux de Huxley [45] sur la dynamique des ponts actine-myosine, au niveau microscopique (du sarcomère), permettent d'expliquer les phénomènes de contraction dans le muscle cardiaque. Pourtant, la plupart des modèles de contraction ne s'appuient pas sur ces bases physiologiques mais

cherchent à modéliser les phénomènes observés expérimentalement, au niveau mésoscopique (de la myofibre), par diverses techniques d'identification [56].

L'étude du mécanisme de formation de ces ponts par une approche multi-échelles, généralisant celle de Zahalak [57], a permis au projet SOSSO de développer une loi de comportement [31], au niveau mésoscopique, issue d'une variante du modèle de Huxley qui décrit le comportement collectif des nanomoteurs moléculaires actine-myosine [46]. Cette loi permet de rendre compte du couplage excitation-contraction. On peut alors obtenir une modélisation 3D complète de l'activité mécanique du cœur en insérant cette loi de comportement dans un modèle rhéologique tel celui de Hill [4].

Le phénomène de propagation de l'onde électrique commandant la contraction du muscle est quant à lui modélisé par des équations non-linéaire de type réaction-diffusion, voir à ce sujet les travaux de Kolmogorov [48] ou encore Hodgkin et Huxley [43] ou plus simplement le modèle dit de FitzHugh-Nagumo [40]. C'est cette dernière formulation qui est utilisée ici (cf. les travaux de l'équipe SOSSO).

Les techniques d'assimilation de données

Les techniques d'estimation/recalage sont beaucoup utilisées dans divers domaines tels que l'aéronautique, les transports, la météorologie ou l'économie. Elles consistent à minimiser l'écart entre la valeur simulée et la valeur mesurée d'une quantité. Les mesures guident le modèle sur une trajectoire réaliste tandis que le modèle fournit une « interpolation spatio-temporelle » des mesures. Dès lors que l'on s'intéresse au recalage de l'état et des paramètres d'un modèle, il existe deux grandes familles de méthodes.

1. Une approche variationnelle basée sur des résultats de contrôle optimal qui consiste à minimiser globalement sur une période temporelle donnée une distance aux observations et aux conditions initiales [50].
2. Une approche séquentielle s'appuyant sur l'estimation stochastique optimale. Dans ce cas, la minimisation est effectuée chaque fois qu'une observation est disponible. Les techniques dites de filtrage de Kalman et celles qui en découlent appartiennent à cette famille [53].

Souvent utilisée en météorologie ou en océanographie [44], l'assimilation de données pour des problèmes de mécanique des milieux continus et particulièrement pour la simulation du cycle cardiaque est prometteuse et novatrice.

Pour les systèmes distribués 4D (trois variables d'espace et le temps), le coût des calculs numériques associés au traitement (après discrétisation en espace) peut être de l'ordre du million de variables d'état. On a donc privilégié ici l'utilisation de techniques séquentielles telles les filtres SEEK [34][55] éventuellement associées à des techniques dites de filtres d'ensemble [39] permettant de réduire les coûts de calcul liés à la mise à jour des matrices de covariance.

Simulations numériques du modèle électromécanique

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.

En 1D, le cœur peut être vu comme un cylindre déformable (figure 3) de volume variable V ; p_v désigne la pression au sein du ventricule. 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 des déformations (cycle p_v/V).

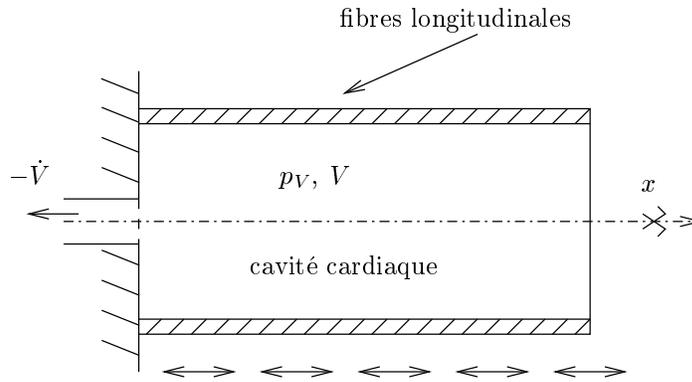


Figure 3. Analogie entre le modèle 1D simulé et un piston.

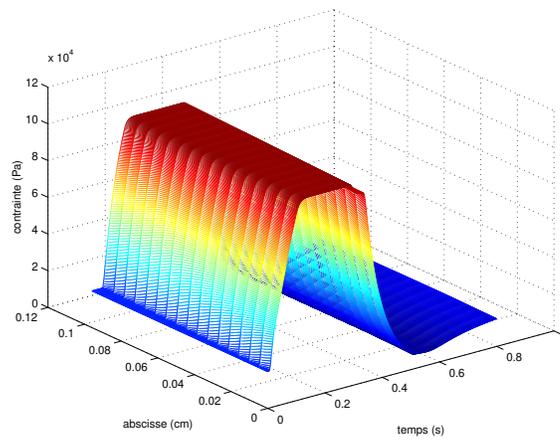


Figure 4. Évolution de la contrainte dans une fibre cardiaque au cours d'un cycle.

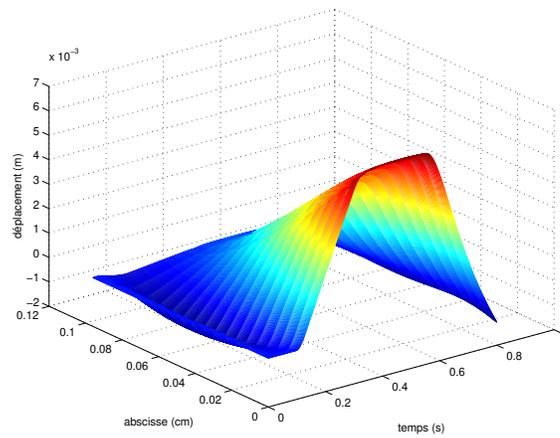


Figure 5. Déplacement d'une fibre cardiaque au cours d'un cycle.

Pour un jeu donné de conditions initiales, de paramètres du modèle, de conditions aux limites et initiales, les variables d'état du modèle simulé convergent après quelques battements vers un attracteur. Quand on perturbe l'entrée électrique ou bien certains paramètres liés à la contraction les variables d'état convergent, après quelques battements, vers un nouvel attracteur, voir figure 6. Ceci illustre la stabilité du modèle.

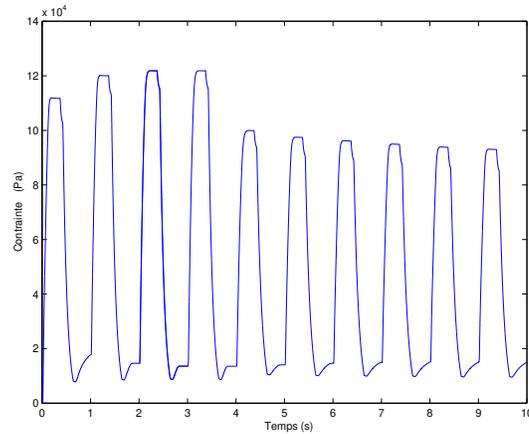


Figure 6. Evolution de la contrainte dans une fibre pendant 10 battements. A la fin du 4e battement et des suivants, une perturbation sur l'entrée électrique et les paramètres de contraction est ajoutée.

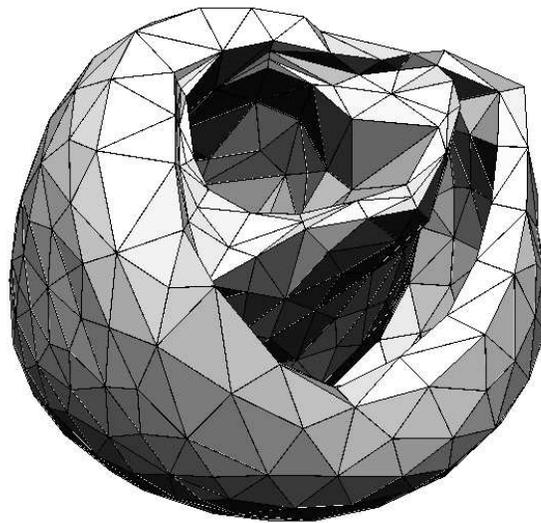


Figure 7. Maillage de coeur raffiné.

L'assimilation de données

Dans la pratique, les mesures disponibles proviennent d'examen médicaux réalisés sur un patient. Mais avant de pouvoir valider les techniques d'assimilation de données développées sur ces données réelles, on a cherché à en évaluer le comportement et les potentialités sur des données provenant de simulations numériques.

En considérant que les mesures expérimentales disponibles concernaient les déplacements du muscle, on a cherché à estimer, outre les variables d'état du modèle, l'entrée électrique notée $u(x, t)$ ainsi que les paramètres liés à la contraction notés k_0 et σ_0 . Les figures 8 et 9 ci-dessous présentent les résultats des estimations.

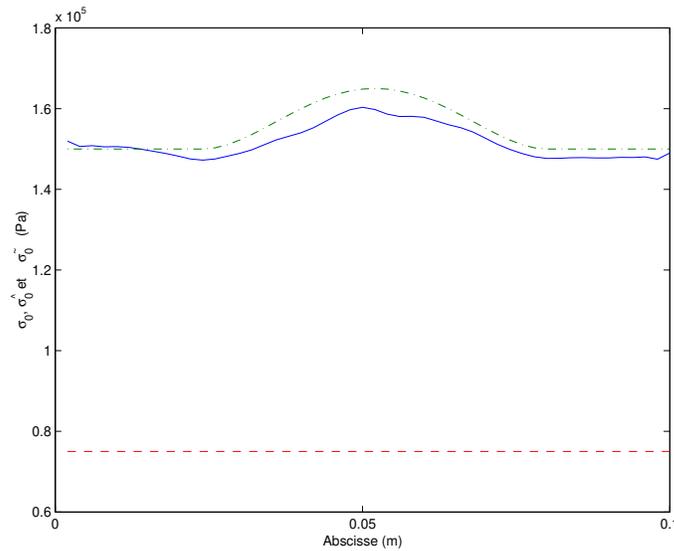


Figure 8. Valeur de référence du paramètre de contraction $\sigma_0(x)$ (-), son estimation (-) et la valeur de $\sigma_0(x)$ (- -) choisie pour initialiser la technique d'estimation.

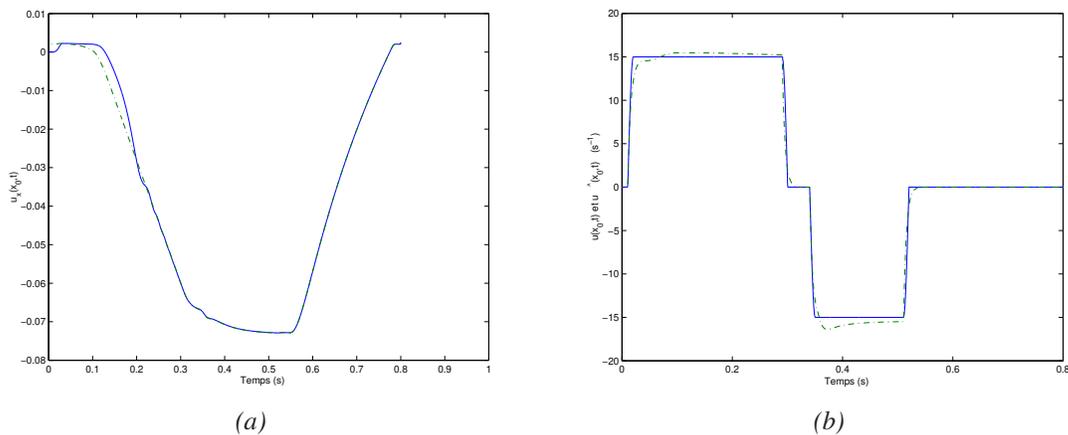


Figure 9. (a) la déformation de référence en un point du muscle au cours d'un battement (-) et son estimation (-), (b) l'entrée de référence $u(x_0, t)$ en un point du muscle au cours d'un battement (-) et son estimation (-).

Perspectives

Il s'agit de poursuivre la construction du modèle 3D afin qu'il permette de représenter correctement l'excitation électrique, les déformations et les efforts au sein du myocarde. Parallèlement, les impératifs métrologiques liés au faible échantillonnage de certaines mesures (par exemple les déplacements) ou à la difficulté d'accéder à certaines autres (contraintes, pression) doivent être prises en compte pour le développement des techniques d'assimilation.

La difficulté principale réside dans le compromis à trouver entre la complexité du modèle et donc son acuité (nombre de paramètres à estimer) et la quantité limitée de données métrologiques disponibles permettant de mener à bien l'identification.

7. Contrats industriels

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

Participants : Dominique Chapelle, Anca Ferent, Arnaud Münch, 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.

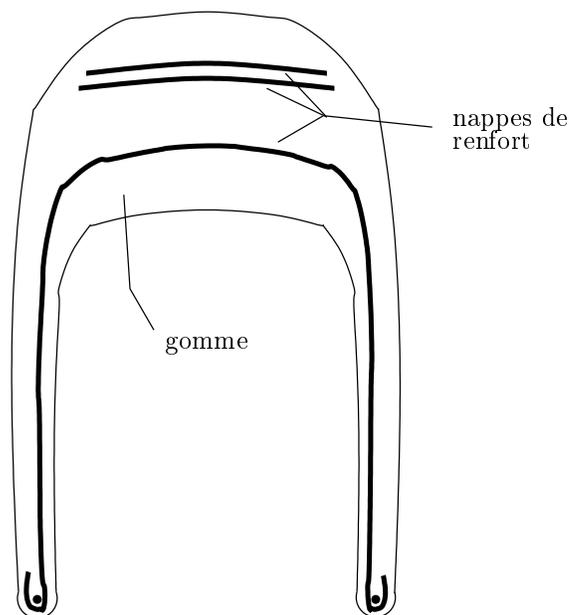


Figure 10. Section transversale du pneu

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 les sections [6.1.2](#), [6.1.1](#).

8. Actions régionales, nationales et internationales

8.1. Actions nationales

8.1.1. Action de recherche coopérative ICEMA2 (*Images de l'Activité Electro-Mécanique du Cœur*)

Participants : Dominique Chapelle, Frank Génot, Patrick Le Tallec, Robert Cimrman, 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 6.2.2.

8.1.2. Action de recherche coopérative Vitesv (*Visualisation Tridimensionnelle et Exploration du Système Vasculaire*)

Participants : Dominique Chapelle, Marina Vidrascu.

Cette action est animée par Marc Thiriet (Projet M3N) et réunit les projets Epidaure Caiman et Prisme de Sophia Antipolis, et les projets GAMMA et MACS et M3N de Rocquencourt ainsi que le laboratoire J.L. Lions et l'université de Montpellier.

Le but est de mettre à la disposition du monde de la santé un outil de simulation basé sur la reconstruction de la géométrie tridimensionnelle des vaisseaux sanguins à partir de l'imagerie médicale. Cette reconstruction 3D sera associée aux simulations numériques de l'écoulement sanguin conçues comme aide à la planification thérapeutique. Pour plus de précisions voir le rapport M3N.

8.2. Actions internationales

8.2.1. 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 Bucalem).

9. Diffusion des résultats

9.1. Animation de la communauté scientifique

- Dominique Chapelle est membre du comité éditorial de la revue « Computers & Structures ».
- Dominique Chapelle est coordonnateur scientifique des Ecoles CEA-EDF-INRIA « Problèmes Non-Linéaires Appliqués ».
- Frédéric Bourquin et Frank Génot ont organisé l'École CEA-EDF-INRIA « Avancées récentes en commande robuste, Applications à la mécanique des structures », INRIA Rocquencourt, 18-22 novembre 2002.

9.2. Enseignement universitaire

- Amine Hassim : Cours et T.D sur les *Bases Mathématiques de la Méthode des Eléments Finis*, à l'école Supérieure d'Ingénierie Léonard de Vinci.
- Jacques Sainte-Marie :
 - Encadrement de deux thèses :
 - * L. Nouvelière (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et université d'Evry Val d'Essonne) *Commandes robustes appliquées au contrôle assisté d'un véhicule à basse vitesse*. Soutenance le 5 décembre 2002.
 - * S. Glaser (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et université de Versailles-Saint Quentin) *Modélisation et contrôle d'un véhicule en trajectoire limite. Application au développement d'un système d'aide à la conduite* soutenance automne 2003.
 - Cours, T.D. et T.P. Algèbre Linéaire et Calcul Formel à l'université de Versailles-Saint Quentin, printemps 2002.
 - Encadrement de projets scientifiques à l'université de Versailles-Saint Quentin, printemps 2002.

9.3. Participation à des colloques, séminaires, invitations

Dominique Chapelle

- Conférencier-invité à la *10ème Ecole Franco-Espagnole de mathématiques appliquées*, 23-27 Septembre 2002.
- *G.D.R. Nouvelles Applications en Optimisation de Formes*, Cannes, 14-15 Mars 2002, « OpenFEM, une toolbox opensource d'éléments finis » (avec F. Génot et A. Hassim).

Anca Ferent

- *CaNum2002* Anglet, Juin 2002 « Eléments finis de coque-3D » et « modèle sous-jacent » (avec Dominique Chapelle).

Frank Génot et Amine Hassim

- *G.D.R. Nouvelles Applications en Optimisation de Formes*, Cannes, 14-15 Mars 2002, « Optimisation des gyroscopes vibrants ».

Marina Vidrascu

- *Indo-French workshop on Parallel Computing for Engineering Computation*, Institute of Physics, Bhubaneshvar, Orissa, 11-15 mars 2002 « Domain decomposition methods ».

10. Bibliographie

Bibliographie de référence

- [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*. in « Internat. J. Numer. Methods Engrg. », numéro 2, volume 48, 2000, pages 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] D. CHAPELLE, F. CLÉMENT, F. GÉNOT, P. LE TALLEC, M. SORINE, J. URQUIZA. *A Physiologically-Based Model for the Active Cardiac Muscle*. in « Lectures Notes in Computer Science », volume 2230, Eds T. Katila, I.E. Magnin, P. Clarysse, J. Montagnat, J. Nenonen, Springer-Verlag, 2001.
- [5] P. LE TALLEC. *Domain Decomposition Methods in Computational Mechanics*. North-Holland, 1994, Volume 1.

Livres et monographies

- [6] D. CHAPELLE, K. J. BATHE. *The Finite Element Analysis of Shells-Fundamentals*. Springer Verlag, sous-presse.

Thèses et habilitations à diriger des recherche

- [7] A. FERENT. *Conception et Analyse d'Eléments Finis de Coques Minces Adaptés à l'Inclusion dans un Milieu Tridimensionnel*. thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 2002.

Articles et chapitres de livre

- [8] K. J. BATHE, D. CHAPELLE, P. S. LEE. *A shell problem 'highly sensitive' to thickness changes*. in « Internat. J. Numer. Methods Engrg. », 2003, In press.
- [9] B. BROGLIATO, A. A. TEN DAM, L. PAOLI, F. GÉNOT, M. ABADIE. *Numerical Simulation of Finite Dimensional Multibody Nonsmooth Mechanical Systems*. in « ASME Applied Mechanics Reviews », numéro 2, volume 55, Mars, 2002, pages 107-150.
- [10] D. CHAPELLE, A. FERENT. *Modeling of the inclusion of a stiff sheet in a soft elastic material*. in « M3AS », 2003, sous presse.
- [11] D. CHAPELLE, A. FERENT, P. LE TALLEC. *The treatment of "pinching" locking in 3D-shell elements*. in « M2AN », 2003, sous presse.
- [12] D. CHAPELLE, D. OLIVEIRA, M. BUCALEM. *MITC elements for a classical shell model*. in « Comput. & Structures », 2003, In press.
- [13] J. SAINTE-MARIE, L. NOUVELIÈRE, S. MAMMAR. *Modelling, estimation and analysis of inter-vehicular spacing during congested situations*. in « soumis à IEEE Trans. Intelligent Transportation systems ».
- [14] J. SAINTE-MARIE, L. NOUVELIÈRE, S. MAMMAR. *Optimal longitudinal control of road vehicles with capacity/safety considerations*. in « soumis à Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control ».
- [15] J. SAINTE-MARIE. *A sampling technique for band-limited signals with respect to a transform associated with a group representation*. in « soumis à Journal of Approximation Theory ».

- [16] J. VILLARD, H. BOROUCAKI, D. CHAPELLE. *Simulation du drapé des tissus par maillage adaptatif*. in « C. R. Acad. Sci. Paris », volume t.335, 2002, pages 561-566, Série I.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [17] F. BOURQUIN, M. JOLY. *Analysis and optimization of magned-based vibrating wire sensor*. in « Structural Health Monitoring 2002 », ENS Cachan, France, 10-12 Juillet, 2002.
- [18] F. BULTEAU, J. SAINTE-MARIE, S. MAMMAR, S. GLASER. *Modèle non linéaire des véhicules et étude des situations en limite de stabilité*. in « Conférence internationale d'automatique », Nantes, France, juillet, 2002.
- [19] J.-F. GERBEAU, M. VIDRASCU. *An algorithm for fluid-structure interaction problems in blood flow*. in « MS4CMS"02" », novembre, 2002.
- [20] S. GLASER, S. MAMMAR, J. SAINTE-MARIE. *Lateral Driving Assistance using Embedded Driver-Vehicle-Road Model*. in « 6th conference on Engineering Systems Design and Analysis », Istanbul, Turquie, Juillet, 2002.
- [21] A. HASSIM, G. VANDERBORCK. *Design of Laminated Composites Against Impact Loading*. in « Proceedings of the 73th Shock & Vibration Symposium », Newport, Rhode Island, USA, 2002.
- [22] L. NOUVELIÈRE, J. SAINTE-MARIE, S. MAMMAR, N. M'SIRDI. *Contrôle intégré d'un véhicule en automatisation basse vitesse*. in « Conférence Internationale d'Automatique », Nantes, France, juillet, 2002.
- [23] M. SERMESANT, Y. COUDIÈRE, H. DELINGETTE, N. AYACHE, J. SAINTE-MARIE, D. CHAPELLE, F. CLÉMENT, M. SORINE. *Progress towards Model-Based Estimation of the Cardiac Electromechanical Activity from ECG Signals and 4D Images*. in « Conférence MS4CMS », INRIA, Rocquencourt, France, novembre, 2002.

Rapports de recherche et publications internes

- [24] M. FERNÁNDEZ, P. LE TALLEC. *Linear stability analysis in fluid-structure interaction with transpiration. Part II : numerical analysis and applications*. Rapport de recherche, numéro 4571, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4571.html>.
- [25] M. FERNÁNDEZ, P. LE TALLEC. *Linear stability analysis in fluid-structure interaction with transpiration. Part I : formulation and mathematical analysis*. Rapport de recherche, numéro 4570, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4570.html>.

Bibliographie générale

- [26] A. BENSOUSSAN, J.-L. LIONS, G. PAPANICOLAOU. *Asymptotic analysis for periodic structures*. North Holland, 1978.
- [27] M. BERNADOU, Y. DUCATEL, P. TROUVÉ. *Approximation of a circular cylindrical shell by Clough-Johnson flat plate finite elements*. in « Numer. Math. », volume 52, 1988, pages 187-217.

- [28] 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 », éditeurs E. C. P. SIVASUNDARAM S., pages 71-79, 2001.
- [29] M. BERNADOU, S. HE. *On the computation of hysteresis and closure domains in micromagnetism*. in « SPIE Conference on Mathematics and Control in Smart Structures », volume 3323, pages 512-519, 1998.
- [30] M. BERNADOU, S. HE. *Numerical approximation of unstressed and prestressed magnetostrictive materials*. in « SPIE Conference on Mathematics and Control in Smart Structures », 1999.
- [31] J. BESTEL, F. CLÉMENT, M. SORINE. *A biomechanical model of muscle contraction..* in « Lectures Notes in Computer Science », volume 2208, Eds W.J. Niessen and M.A. Viergever, Springer-Verlag, 2001.
- [32] A. BLANGUERNON. *Contrôle Actif de Poutres et de Plaques à l'aide d'un Composant Piézo-céramique*. Thèse de doctorat, Université Paris VI, mars, 1997.
- [33] A. BLANGUERNON, F. LÉNÉ, M. BERNADOU. *Active control of a beam using a piezoceramic element*. in « Smart Mater. Struct. », volume 8, 1998, pages 116-124.
- [34] M. CANE, A. KAPLAN, N. MILLER, B. TANG, E. HACKERT, A. BUSALACCHI. *Mapping tropical Pacific sea level : Data assimilation via a reduced state Kalman filter*. in « J. Geophys. Res. », numéro 2, volume 101, 1996, pages 599-617.
- [35] D. CHAPELLE, K. J. BATHE. *Fundamental considerations for the finite element analysis of shell structures*. in « Computers & Structures », numéro 1, volume 66, 1998, pages 19-36.
- [36] D. CHAPELLE. *Etude des Phénomènes de Verrouillage Numérique pour les Problèmes de Coques Minces*. thèse de doctorat, Université Paris VI, juin, 1996.
- [37] D. CHAPELLE, R. STENBERG. *Stabilized finite element formulations for shells in a bending dominated state*. in « SIAM Journal of Numerical Analysis », numéro 1, volume 36, 1998, pages 32-73.
- [38] G. DUVAUT. *Matériaux élastiques à structure périodique*. North Holland, 1976.
- [39] G. EVENSEN. *Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics*. in « J. Geophysical Research », volume 99, 1994, pages 10143-10162.
- [40] R. FITZHUGH. *Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membran..* in « Biophys. J. », volume 1, 1961, pages 445-466.
- [41] C. HAENEL. *Modélisation, Analyse et Simulation Numérique de Coques Piézoélectriques*. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 25 janvier, 2000.
- [42] 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.

- [43] A. L. HODGKIN, A. F. HUXLEY. *A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve.* in « J. Physiol. », volume 177, 1952, pages 500-544.
- [44] I. HOTEIT. *Filtrage de Kalman réduits et efficaces pour l'assimilation de données en océanographie.* thèse de doctorat, Université J. Fourier, Grenoble, 2001.
- [45] A. HUXLEY. *Muscle structure and theories of contraction.* in « Progress in biophysics and biological chemistry », volume 7, Pergamon press, 1987.
- [46] F. JÜLICHER, A. AJDARI, J. PROST. *Modeling molecular motors.* in « Reviews of Modern Physics », numéro 4, volume 69, October, 1997.
- [47] A. KELKAR, S. JOSHI. *Control of Nonlinear Multibody Flexible Space Structures.* série Lectures Notes in Control and Information Sciences, numéro 221, Springer Verlag, London, 1996.
- [48] A. KOLMOGOROV, I. PETROVSKY, N. PISCOUNOFF. *Etude de l'équation de la diffusion avec croissance de la quantité de matière et son application à un problème biologique.* in « Bull. Univ. Moscou Math, Serie Int. A », numéro 1, 1937, pages 1-25.
- [49] V. KOMORNIK. *Rapid boundary stabilization of linear distributed systems.* in « SIAM J. Control Optim. », numéro 5, volume 35, 1997, pages 1591-1613.
- [50] J. L. LIONS. *Contrôle optimal des systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles.* Dunod, 1968.
- [51] J. L. LIONS. *Contrôlabilité exacte, perturbations et stabilisation de systèmes distribués. Volume 1 : contrôlabilité exacte.* Masson, 1988.
- [52] J.-L. LIONS. *Contrôlabilité exacte, perturbations et stabilisation de systèmes distribués. Volume 2 : perturbations.* Masson, 1988.
- [53] M. NAJIM. *Modélisation et identification en traitement du signal.* Masson, 1988.
- [54] J. OOSTVEEN, R. CURTAIN. *Robustly Stabilizing Controllers for Dissipative Infinite-Dimensional Systems with Collocated Actuators and Sensors.* in « Automatica », volume 36, 2000, pages 337-348.
- [55] D. PHAM, J. VERRON, M. ROUBAUD. *Singular evolutive Kalman filter with EOF initialization for data assimilation in oceanography.* in « J. Mar. Syst. », volume 16, 1997, pages 323-340.
- [56] J. WU, W. HERZOG. *Modelling concentric contraction of muscle using an improved cross-bridge model.* in « Journal of Biomechanics », volume 32, 1999, pages 837-848.
- [57] G. ZAHALAK. *A distribution moment approximation for kinetic theories of muscular contraction.* in « Mathematical Biosciences », volume 114, 1981, pages 55-89.

- [58] P. LE TALLEC. *Domain decomposition methods in computational mechanics*. Advances in computational mechanics (North-Holland), 1994, Volume 1.
- [59] P. LE TALLEC, M. VIDRASCU. *Solving large-scale structural problems on parallel computers using domain decomposition techniques*. éditeurs M. PAPADRAKAKIS., in « Parallel Solution Methods in Computational Mechanics », John Wiley & Sons, 1997, chapitre 3.
- [60] P. LE TALLEC, M. VIDRASCU. *Domain decomposition techniques for nonlinear elasticity problems*. in « Computational Science for the 21st century », Wiley, pages 568-585, 1997.