

Rapport INRIA 1994 — Programme 6  
Méthodes et outils pour le calcul scientifique

PROJET MODULEF

3 mai 1995



PROJET MODULEF

---

# Méthodes et outils pour le calcul scientifique

---

**Localisation :** *Rocquencourt*

**Mots-clés :**

## 1 Composition de l'équipe

### **Responsable scientifique**

Michel Bernadou, directeur de recherche, Inria

### **Responsable permanent**

Marina Vidrascu, directeur de recherche, Inria

### **Secrétariat**

Maryse Desnous

### **Conseillers Scientifiques**

Philippe G. Ciarlet, professeur, université de Paris 6

Françoise Léné, professeur, ENS Cachan et université de Paris 6

### **Personnel Inria**

Paul Louis George, directeur de recherche

Amine Hassim, chargé de recherche

Patrick Laug, chargé de recherche

Eric Saltel, directeur de recherche

Danièle Steer, ingénieur de recherche

### **Chercheurs invités**

Sai Hen Lo, université de Hong Kong, (6 mois)

Rolf Stenberg, université d'Helsinki (4 mois)

#### **Chercheurs et ingénieurs extérieurs**

Jean-Marie Boisserie

Dominique Chapelle, LCPC

Pascale Paté-Sauton, SIMULOG

Patrick le Tallec, université de Paris 9

#### **Chercheurs doctorants**

Agnès Blanguernon, boursière MESR, université de Paris 6

Maité Carrive, boursière MESR, université de Paris 9

Henri Chajmowicz, boursier ENPC et Inria

Annie Cubier, boursière MESR, université de Paris 6

Matthieu Halard, boursier Ecole Polytechnique

Jim Pioche, boursier MESR, université de Paris 6

Christophe Haenel, boursier MESR, université de Paris 6, à partir d'octobre 1994

Eric Seveno, boursier MESR (Programme Génie), université de Paris 6, à partir d'octobre 1994

Maria-Angeles Vilariño Moreno, université de Malaga

#### **Chercheurs post-doctorants**

Houman Borouchaki, à partir de septembre 1994

#### **Stagiaires**

Christophe Haenel, stagiaire de DEA, université de Paris 6, du 1er mars au 30 juin 1994

Sylvain Coudray, stagiaire de DESS, IFREMER et université de Paris 6, mars-août

Rémi Baudin, stagiaire de DESS, université de Paris 6, avril-juillet 1994

Damien Soulat, chercheur doctorant Paris 6, mars-juillet

## **2 Présentation du projet**

Le projet Modulef a été créé en 1977 pour constituer l'équipe permanente chargée de concevoir, de développer et de diffuser la bibliothèque modulaire d'éléments finis "Modulef". Cette bibliothèque est opérationnelle depuis de nombreuses années et continue de rencontrer un vif succès

puisque plus d'une centaine d'institutions renouvellent chaque année leur adhésion. La gestion de cette bibliothèque a été complètement transférée à la société Simulog, filiale de l'Inria, en janvier 1993.

Cet objectif initial ayant été rempli, les activités du projet se sont désormais recentrées sur les recherches en calcul scientifique, principalement sur les méthodes numériques en mécanique du solide et sur les environnements pour le calcul scientifique.

## 2.1 Activités de recherche

En permettant la mise au point, le contrôle et l'optimisation de nouveaux prototypes avec des gains de temps et d'argent extrêmement importants, le calcul scientifique s'est imposé comme une discipline à part entière dans les sciences de l'ingénieur. Avec le développement accéléré des moyens de calcul, avec la banalisation des postes de travail et avec la mise au point de nouvelles architectures d'ordinateurs, cette discipline connaît une croissance considérable. Il convient donc d'étudier, d'analyser et d'évaluer sur ordinateur des méthodes numériques nouvelles, fiables et performantes : c'est le but de l'ensemble des activités du Programme 6.

Dans cette voie, les activités du projet Modulef sont plus particulièrement axées sur :

- l'étude et le développement de nouvelles méthodes numériques, principalement dans le domaine de la mécanique des solides ;
- l'étude et le développement d'outils d'environnement informatique pour le calcul scientifique : mailleurs, logiciels graphiques, systèmes à base de connaissances ;
- la mise au point des logiciels correspondants, ceux-ci étant naturellement intégrés dans la bibliothèque Modulef.

Ces activités sont détaillées dans le paragraphe 3.

## 2.2 Activités de coordination et d'animation du club Modulef

Le projet Modulef coordonne les activités du club Modulef, créé en 1974, en vue de concevoir et de réaliser une bibliothèque modulaire de programmes scientifiques. Les efforts des membres permanents du projet Modulef et des institutions adhérentes publiques ou privées, françaises ou étrangères, se sont concrétisés par la mise à disposition de la

communauté **Calcul Scientifique** d'un ensemble de modules : ainsi le chercheur qui souhaite tester un nouvel algorithme ou l'ingénieur qui souhaite résoudre un problème nouveau peut atteindre son but :

- en juxtaposant des modules existants ;
- et, le cas échéant, en créant un ou plusieurs modules spécifiques de la partie nouvelle de l'étude.

Naturellement, comme toute bibliothèque de logiciels scientifiques, cet ensemble modulaire continue de nécessiter des efforts de maintenance, de mise à jour, de fiabilité... Ces actions sont menées pour l'essentiel par un ingénieur, pris en charge par le club Modulef et travaillant chez Simulog dans le cadre d'un accord Inria/Simulog concernant le développement, la gestion et la diffusion de la bibliothèque Modulef.

### **3 Actions de recherche**

Celles-ci peuvent être regroupées dans les trois rubriques suivantes :

#### **Analyse numérique de problèmes issus de la mécanique du solide**

La méthode des éléments finis a été initialement mise au point pour résoudre de gros problèmes de mécanique du solide rencontrés en aéronautique. Malgré d'énormes progrès, il reste encore beaucoup à faire notamment dans la mise au point de méthodes d'approximation fiables et performantes pour résoudre des problèmes tels que :

- Elasticité non linéaire/Optimisation de formes
- Structures minces (linéaires ou non)
- Jonctions de structures minces
- Mécanismes
- Matériaux nouveaux et matériaux adaptatifs

#### **Méthodologie numérique**

Les progrès significatifs réalisés par le matériel informatique au cours de la dernière décade ont permis le développement de nouvelles architectures d'ordinateurs à structures vectorielles ou parallèles. Pour utiliser au mieux cette nouvelle génération d'ordinateurs, l'analyste numérique

doit revoir et adapter la méthodologie numérique classique et doit proposer des méthodes nouvelles. Dans ces directions, nous avons abordé les deux thèmes suivants :

- Décomposition de domaines
- Parallélisation d'algorithmes

### **Méthodologie et outils informatiques**

Au delà des méthodes numériques, l'ingénieur "Calcul Scientifique" doit également disposer d'un environnement informatique performant : outils de pré-traitement (maillages), outils de post-traitement (traitements graphiques), outils d'aide à l'utilisation et à la programmation. Nos efforts ont essentiellement porté sur les aspects suivants :

- Maillage
- Traitements graphiques
- Systèmes à base de connaissances
- Génie logiciel

## **Analyse numérique de problèmes issus de la mécanique du solide**

### **3.1 Optimisation de formes de structures non linéaires et de maillages**

*Participants* : M. Halard, P. Le Tallec

Le but de l'étude est de développer un algorithme d'optimisation de formes de structures non linéaires. Etant donné le coût de calcul d'une structure non linéaire en grandes déformations (plus de 5 itérations de Newton sur un espace de plus d'un million d'inconnues), le problème est de mettre au point un algorithme d'optimisation qui ne nécessite pas le calcul complet de la structure à chaque conception intermédiaire. Quand le nombre de variables de conception est faible, la solution consiste à traiter le problème d'optimisation et de calcul comme un problème algébrique unique (*one shot method*).

A titre d'exemple, on représente sur le graphe de la figure 1 la convergence de l'algorithme d'optimisation avec calcul simultané de l'état pour différentes stratégies de line search et on compare avec un calcul d'état simple (log du résidu / nombre d'itérations). Le surcoût de l'optimisation n'est que de deux itérations par rapport au calcul direct.

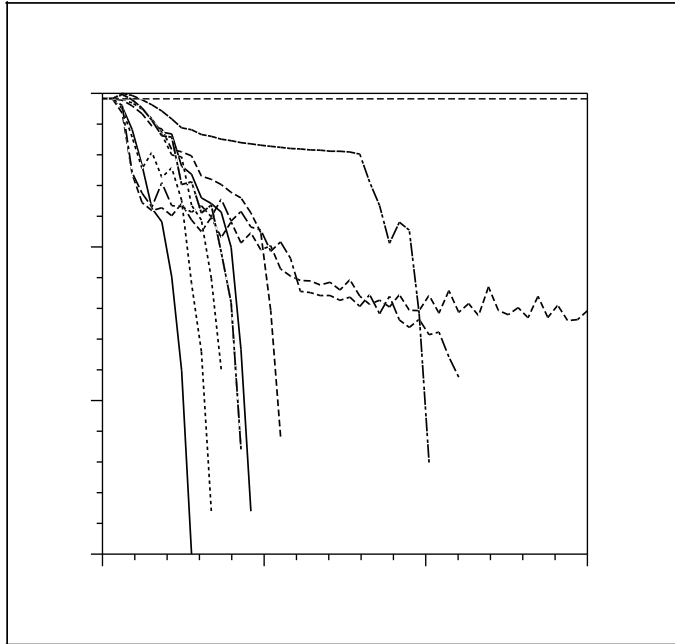


Figure 1 : *Exemple d'optimisation*

La méthodologie employée consiste alors à distinguer trois niveaux d'opérations. Le plus général est l'algorithme d'optimisation avec contraintes. Ce niveau interchangeable doit permettre en particulier d'utiliser les algorithmes les plus récents de points intérieurs. Etant donné la forte non-linéarité de la structure, notre choix porte toutefois sur des méthodes du second ordre ; et ces méthodes calculent la direction de descente en résolvant plusieurs systèmes associés à la même matrice hessienne du lagrangien.

Ceci suppose d'avoir un deuxième niveau : un algorithme de résolution algébrique adapté, de type GMRES, que nous avons spécialement développé, capable de résoudre de tels systèmes. Pour une structure non-



linéaire nécessitant pour son analyse le calcul et la factorisation de la matrice de rigidité tangente, le surcoût pour la résolution du hessien complet est raisonnable.

Le troisième niveau concerne les techniques d'analyse de sensibilité de la structure. Pour des raisons de précision et d'efficacité, les gradients sont calculés de façon analytique et utilisent l'état adjoint.

La méthode a été validée en utilisant un maillage défini explicitement à partir de la donnée des contours, donc dépendant explicitement des variables de contrôle. Il utilise un algorithme de recherche linéaire le long de la direction de descente calculée.

Ce travail constitue le sujet de la thèse de M. Halard. Ce sujet a reçu le soutien du FIRTECH Calcul Scientifique et il devrait déboucher sur des applications industrielles dans le domaine des pneumatiques.

## **3.2 Structures minces (cas linéaire)**

### **3.2.1 Approche de plaques par éléments finis courbes de classe $C^1$**

*Participants*: M. Bernadou, J.M. Boisserie

Lors de travaux antérieurs, des éléments finis courbes de classe  $C^1$  ont été définis, analysés et utilisés pour réaliser l'approximation de plaques et de coques dont les domaines de référence ont des frontières curvilignes. Cette année, l'utilisation de ces méthodes a été validée numériquement pour l'approche de solutions de problèmes de plaques. Cette étude numérique redonne les ordres d'estimation asymptotique d'erreur a priori obtenus par l'analyse mathématique. L'extension de cette étude numérique à des problèmes généraux de coques est en cours.

### **3.2.2 Etude des phénomènes de verrouillage dans l'approximation de coques minces générales**

*Participants*: M. Bernadou, D. Chapelle, R. Stenberg

Dans les équations de coques minces figurent des termes en  $e$  et des termes en  $e^3$  où  $e$  désigne l'épaisseur de la coque. Lorsque l'épaisseur devient très petite et que ces équations de coques sont approchées par des méthodes d'éléments finis, des phénomènes d'instabilité peuvent apparaître notamment dans le cas d'approximations de bas degré. Ce

problème a fait l'objet de nombreuses études (élasticité incompressible, plaques avec cisaillement transverse...) mais à ce jour, il n'y a pas de méthode réellement satisfaisante pour les coques générales et c'est du reste un des challenges du domaine. Après plusieurs essais infructueux, on s'intéresse en ce moment à des méthodes de type éléments finis mixtes stabilisés par des termes de moindres carrés.

### 3.3 Modélisation et approximation de coques en grandes déformations

*Participants* : M. Carrive, P. Le Tallec

L'objectif fixé est la construction et la résolution numérique d'un modèle de coque élastique valable en grandes déformations. Le point de départ a été le modèle de Simo qui est géométriquement exact.

Le modèle que nous avons développé est écrit en configuration actuelle et sous forme tensorielle. Il est donc indépendant de tout mode de représentation de la surface moyenne, de tout référentiel, et autorise les grandes déformations. La formulation variationnelle obtenue peut ensuite être transportée sur une surface (courbe ou plane) de référence choisie.

Nous avons par ailleurs obtenu une justification de la loi de comportement hyperélastique pour les coques. La démonstration repose sur des arguments géométriques traduisant l'indépendance des tenseurs de déformation qui interviennent comme variables du mouvement.

Nous aboutissons finalement à un problème aux limites exprimé sur la configuration de référence choisie. Dans le cas de forces conservatives, le problème obtenu peut s'écrire sous la forme d'un problème de minimisation d'une fonctionnelle énergie, sur l'espace des configurations admissibles.

Pour la résolution numérique, on choisit une surface de référence plane, et on se place dans le repère cartésien. Les trois composantes de la carte sont approchées dans l'espace d'éléments finis d'Argyris et le problème discret obtenu est linéarisé par une méthode de Newton. La méthode a été testée en grands déplacements avec flambement pour des coques de type Koiter. Les résultats obtenus coïncident parfaitement avec ceux de Simo et Bergan.

Nous établissons actuellement un estimateur permettant de contrôler a posteriori l'erreur locale pour un problème de plaque. Une prochaine étape consistera à tester numériquement cet estimateur et à l'adapter au problème de coque qui nous intéresse.

### 3.4 Jonctions de structures minces

#### 3.4.1 Jonctions de coques minces

*Participants* : M. Bernadou, P.G. Ciarlet, A. Cubier

L'étude de la déformation de structures telles que des réservoirs, des plateformes pétrolières, des carrosseries de voitures repose sur la résolution du problème de la jonction de deux coques. L'objet de ce travail est l'analyse numérique d'un problème posé sur un assemblage constitué de deux coques minces jointes suivant une partie de leurs frontières ; il se situe dans le cadre de la théorie de Koiter, sous l'hypothèse de petites déformations.

Après avoir formulé et analysé deux types de problèmes correspondant à un comportement rigide ou élastique de la jonction, nous les discrétisons par une méthode d'éléments finis (Argyris), avec prise en compte de l'intégration numérique. En général, la discrétisation des conditions de jonction conduit à la non conformité de la méthode d'approximation. Nous avons alors montré la convergence des solutions des problèmes approchés vers celles des problèmes continus correspondants.

Nous avons ensuite décrit la mise en œuvre numérique d'un nouveau type d'éléments finis qui est bien adapté aux formulations des problèmes de jonction, puis nous avons testé ces éléments sur une structure constituée d'un cylindre surmonté par une portion de calotte sphérique.

Ce travail a fait l'objet de la thèse d'Annie Cubier, soutenue le 14 octobre à l'Université de Paris 6.

#### 3.4.2 Formulation mathématique des problèmes de mécanismes

*Participants* : M. Bernadou, H. Chajmowicz

Les systèmes de poutres flexibles en chaîne ouverte interviennent dans de nombreux domaines d'application : robotique industrielle, domaines spatial et biomédical ... Nous nous intéressons dans cette étude aux

systèmes de poutres élastiques reliées par des articulations permettant des rotations relatives d'amplitudes finies.

Nous définissons une configuration de référence du système, où les poutres de la chaîne sont assimilées à des cylindres droits de sections constantes. A partir de cette configuration, le système est soumis à des incréments des paramètres de commande articulaires au cours du temps, ainsi qu'à un chargement en bout de chaîne. Connaissant les fonctions du temps commandant le système, on cherche alors à calculer la position, la vitesse et l'accélération de l'extrémité terminale du dernier maillon à un instant  $t$  donné.

Au cours des années précédentes ce problème a fait l'objet d'une étude spécialisée au cas de grands déplacements rigides et petites déformations élastiques. Cette année a été consacrée à l'étude d'un autre type de modélisation de ce problème, permettant une prise en compte plus réaliste des conditions aux limites, ainsi qu'une extension ultérieure au cas de grandes déformations. Dans cette approche, on ne sépare pas a priori les champs de déplacements rigides et élastiques des poutres de la chaîne, et on cherche à représenter le plus grand nombre de types de déformations élastiques possibles (torsion, flexion, allongement, cisaillement). On effectue une discrétisation en temps du problème et on se ramène à une suite de problèmes de minimisation d'une fonctionnelle d'énergie, pour lesquels un résultat d'existence a été établi. L'étude numérique est en cours.

### **3.5 Matériaux composites - Matériaux nouveaux**

#### **3.5.1 Étude de l'endommagement**

*Participants* : A. Hassim

Les codes de simulation numérique du comportement dynamique des structures sont généralement basés sur des critères de rupture. L'endommagement est brutal : lorsque le critère est atteint, le matériau est considéré comme instantanément rompu. Cependant, il s'est avéré que ce critère seuil était insuffisant dans le cas des matériaux composites, et qu'il était nécessaire de prendre en compte l'évolution de l'endommagement précédant la rupture. Plusieurs études théoriques ont été développées ces dernières années pour modéliser le comportement non-linéaire des composites qui prenne en compte explicitement l'en-

dommagement du matériau. Les modèles proposés nécessitent la mise en œuvre de techniques de mesures expérimentales élaborées. Parmi ces modèles, on trouve :

- l'approche "micro-macro", construite à partir d'informations et d'hypothèses sur la microstructure. Le passage à l'échelle macroscopique utilise les techniques d'homogénéisation.
- l'approche phénoménologique, directement construite au niveau "macroscopique", avec des variables internes pour représenter les phénomènes microstructuraux.

Dans le cadre d'un contrat BRITE, nous avons démarré l'étude de la loi d'évolution de la fissuration transverse dans les composites stratifiés soumis à des impacts localisés de faible vitesse. La mécanique de l'endommagement est basée sur des notions de contrainte effective analogues à celles introduites par Kachanov et s'inscrit dans le cadre de l'approche proposée par P. Ladevèze. Le stratifié est modélisé à l'échelle de la couche, considérée comme homogène et élastique endommageable. Les dégradations de la couche dues aux décohésions fibre-matrice et à la fissuration de la matrice sont prises en compte par deux paramètres d'endommagement (variables internes) qui décrivent macroscopiquement l'état actuel des défauts internes à l'élément de volume considéré.

Les essais expérimentaux pour déterminer les paramètres physiques caractéristiques de la couche introduits dans la loi d'évolution de l'endommagement sont en cours d'élaboration au Laboratoire d'Essais et d'Évaluations en Environnement (THOMSON ASM).

### 3.5.2 Contrôle vibro-acoustique de plaques

*Participants*: M. Bernadou, A. Blanguernon, A. Hassim, F. Léné, J. Pioche

Le contrôle actif de structures élastiques est un domaine de recherche en pleine expansion. Il repose généralement sur l'utilisation de capteurs et d'actionneurs réalisés à l'aide de matériaux piézoélectriques.

Cette étude est menée en collaboration avec les Laboratoires de Calcul Scientifique et de Chimie-Céramiques de Thomson-LCR. Il s'agit de modéliser numériquement un démonstrateur de contrôle actif de vibrations constitué par l'empilement (voir figure 2) :

- d'un "pot vibrant" induisant des vibrations de fréquence variable ;

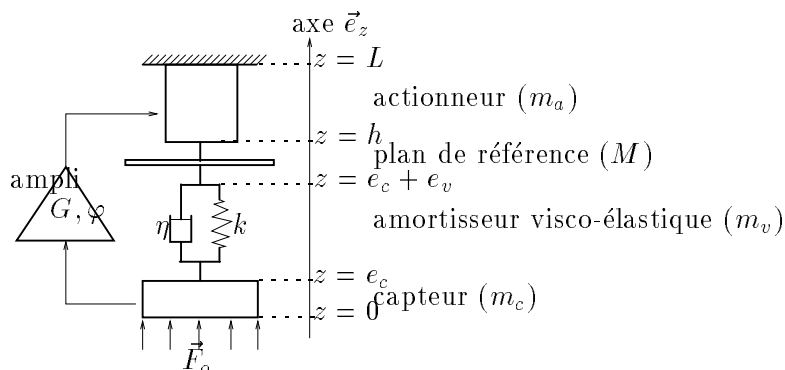


Figure 2 : Schéma de l'expérience

- d'un matériau de liaison visco-élastique ;
- d'une céramique piézoélectrique jouant le rôle de capteur de vibrations ;
- d'une plaque élastique ;
- d'un actionneur piézoélectrique.

Ce démonstrateur est complété par une boucle de contre-réaction qui amplifie et déphase le signal émis par le capteur avant de le transmettre à l'actionneur. Les objectifs sont :

- (i) d'optimiser les facteurs d'amplification et de déphasage pour réduire les oscillations de la structure ;
- (ii) d'optimiser les caractéristiques utilisées dans les capteurs et dans l'actionneur pour contrôler au mieux les structures vibrantes.

Notre contribution se situe au niveau de la modélisation de l'expérience menée au LCR-Thomson et elle comporte deux orientations qui correspondent respectivement aux sujets de thèses de A. Blanguernon et de J. Pioche :

- i) Mise en équation de l'expérience, résolution numérique et confrontation des résultats ; utilisation de ce type de capteur pour réduire les vibrations de structures embarquées ; optimisation des composants et de leurs emplacements.
- ii) Etude mathématique de ces équations puis étude mathématique de la contrôlabilité du système capteur/actionneur par la méthode HUM (Hilbert Uniqueness Method).

Les résultats obtenus sont pour le moment partiels tant au niveau mathématique que numérique.

### 3.5.3 Coques piézoélectriques

*Participants* : M. Bernadou, C. Haenel

La modélisation linéaire de coques minces piézoélectriques de forme quelconque nécessite l'utilisation d'une représentation de la géométrie par un ensemble de coordonnées curvilignes. Dans ce premier travail, nous donnons un résultat d'existence pour un matériau piézoélectrique occupant un domaine tridimensionnel représenté à l'aide d'un système de trois coordonnées curvilignes. Puis, nous particularisons ce résultat au cas d'une coque piézoélectrique tridimensionnelle, et finalement, nous montrons comment ce résultat d'existence peut être étendu à des théories bidimensionnelles incluant, ou non, l'effet de déformations de cisaillement transverse.

## Méthodologie numérique

### 3.6 Décomposition de domaines et calcul parallèle

*Participant* : M. Vidrascu

L'étude des méthodes de décomposition de domaines s'est poursuivie aussi bien sur le plan algorithmique (amélioration des algorithmes itératifs et en particulier des préconditionneurs) que sur le plan de l'implémentation parallèle. Un nouveau préconditionneur adapté aux problèmes de plaques et de coques a été étudié. Le superordinateur KSR1, à mémoire virtuellement partagée acquis fin 1992 par l'Inria a été utilisé pour résoudre différents problèmes d'élasticité 3D. Le détail de ces travaux figure dans l'action multi-projet **Calcul parallèle en simulation numérique**.

### 3.7 Décomposition de domaines et homogénéisation

*Participants* : D. Soulat, M. Vidrascu

Cette étude prolonge le travail de thèse de Damien Soulat (Laboratoire Mécanique et Acoustique de Paris 6) dont l'objectif est de déterminer le

comportement homogène équivalent de structures composites endommagées. Elle consiste à développer des algorithmes utilisant conjointement les méthodes de décomposition de domaines et les techniques d'homogénéisation. Ces algorithmes ont été implémentés en utilisant la bibliothèque *Modulef* et ont été testés sur la *KSR1*.

La première application concerne un matériau du type mousse syntactique constitué de neuf billes de verre noyées dans une résine de carbone isotrope d'époxy. Les paramètres d'endommagement postulés sont l'implosion successive des billes de verre sous l'effet de la pression hydrostatique. La détermination du comportement homogène équivalent du matériau nécessite alors la résolution de trois problèmes d'élasticité, d'un problème thermique et d'un problème de couplage thermoélastique, et ceci pour chaque paramètre d'endommagement.

Ainsi pour un maillage contenant 7346 noeuds et 36864 éléments, divisé en huit sous-domaines parfaitement équilibrés, le gain en temps de résolution obtenu est égal à 7.2 . Une séquence de parallélisation a été introduite dans le module de préparation des données ce qui a permis d'obtenir des gains de temps de l'ordre de 7.5 .

Le second exemple traite l'étude d'un matériau thermoélastique constitué de deux couches d'unidirectionnels carbone/carbone orientées dans des directions différentes et liées entre elles par un picot en carbone, l'endommagement étant caractérisé par des microcavités se propageant le long des interfaces. Le comportement orthotrope équivalent est obtenu par résolution de six problèmes d'élasticité, de trois problèmes thermiques et d'un problème de couplage thermoélastique. La particularité de cette étude est la prise en compte par l'algorithme de décomposition de domaines des conditions de périodicité. Une première approche considère une décomposition du domaine en sous-domaines qui respecte les conditions de périodicité (deux noeuds reliés par une telle condition appartiennent au même sous-domaine). Les gains de temps sur *KSR1* sont relativement médiocres (3.5 pour une décomposition en 5 sous-domaines). Ce résultat s'explique par un non équilibrage des tâches dû à la contrainte introduite sur le découpage.

Une seconde approche, actuellement en cours de développement, consiste à pouvoir prendre en compte des conditions de périodicité pour des noeuds appartenant à des sous-domaines quelconques.



## Méthodologie et outils informatiques

### 3.8 Maillage

#### 3.8.1 Méthode de Delaunay-Voronoi en dimension 2 gouvernée par une carte de tailles

*Participants* : P. L. George, E. Saltel

Ce travail s'inscrit dans la continuité du travail effectué l'an dernier et répond à une demande de robustesse très grande, en particulier de la part de l'équipe du LMT de Cachan qui utilise notre algorithme pour générer des maillages sous contrainte de taille, certains exemples proposés incluant des variations de taille de plus de 1000.

Un rapport de recherche décrit en détail cette méthode de maillage permettant de construire des triangles dont les tailles sont spécifiées à l'avance, ces tailles peuvent présenter de fortes variations.

#### 3.8.2 Méthode de Delaunay-Voronoi en dimension 3

*Participants* : P. L. George, E. Saltel

Le schéma général d'une méthode de Delaunay-Voronoi se résume en:

- 1 l'utilisation d'une méthode (incrémentale) d'insertion de points,
- 2 la préservation d'une frontière donnée,
- 3 la création des points internes,
- 4 une régularisation (éventuelle).

Le rapport de recherches n° 1664 décrit en détail les améliorations apportées dans la construction d'un mailleur automatique de Delaunay-Voronoi.

Cette étude s'est poursuivie cette année avec pour objectif d'améliorer les performances en temps. Les principales idées retenues sont les suivantes:

- l'optimisation de code proprement dite ;
- la recherche de nouvelles méthodes pour forcer la frontière ;
- l'amélioration des méthodes d'optimisation locale d'un maillage.

En agissant sur ces trois aspects, la vitesse de l'algorithme a été sensiblement augmentée. Pour fixer les idées, les vitesses suivantes ont été obtenues:

- insertion pure (i.e. calcul de la position des points à insérer et insertion par la méthode): quelques 250000 éléments par minute sur une machine HP9000/735-99 ;
- forçage de frontière et insertion: de 40000 à 60000 éléments par minute ;
- processus global (incluant une optimisation, les entrées/sorties et les initialisations utiles) : 30000 éléments/minute en moyenne (nous avons près de 250 exemples de tests allant de quelques tétraèdres à plus de 700000 éléments). Ce travail se poursuit avec comme objectif des vitesses de l'ordre de 100000 tétraèdres à la minute.

### 3.8.3 Méthode de superposition de motifs dans un domaine

*Participants* : R. Baudin, P. L. George

L'idée de base de cette méthode est de construire le maillage d'un domaine quelconque en remplissant ce dernier autant que faire se peut par des éléments formant un motif donné et en complétant le recouvrement par utilisation d'un mailleur automatique. Le but est d'obtenir très rapidement un maillage possédant une bonne régularité.

Cette étude, en dimension 2, comprend les phases suivantes:

- la définition d'un motif régulier (essentiellement formé de quadrangles paramétrés par la donnée d'un angle et de deux tailles) ;
- le recouvrement de la plus grande partie du domaine par ce motif ;
- la définition de (des) zones non couvertes à ce stade et l'utilisation d'un mailleur automatique pour terminer le recouvrement.

### 3.8.4 Méthode P1/P2

*Participant* : P. L. George

Une question qui est souvent posée par les industriels est la création automatique de maillages de type P2 dans des domaines de géométrie quelconque. En théorie, ce travail ne pose pas de problème particulier dès

lors que le maillage P1 utilisé (résultat obtenu en utilisant un mailleur automatique quelconque) satisfait, au voisinage des frontières courbes du domaine, une condition de régularité suffisante (en d'autres termes, le maillage P1 approche de manière suffisamment fine la géométrie). Dans la pratique, il est fréquent que ce type de conditions ne soit pas vérifié et par suite la construction des éléments P2 à partir des éléments P1 conduit à définir des mailles négatives, se chevauchant, ou très mal conditionnées.

Ce travail, en cours de développement, se propose de définir des algorithmes efficaces, quelle que soit la régularité du maillage P1, permettant d'obtenir des maillages P2 valides et de bonne qualité.

### 3.9 Décomposition automatique de domaines

*Participants* : E. Saltel, M. Vidrascu

Un partitionneur automatique est un outil indispensable pour pouvoir utiliser les méthodes de décomposition de domaines. L'algorithme de découpage basé sur les techniques de nuées dynamiques développé par E. Saltel a été amélioré afin de fournir un découpage très bien adapté aux méthodes utilisées. Les résultats de ce partitionneur ont été comparés à ceux obtenus à l'aide du logiciel TOP/DOMDEC de C. Farhat (U. de Boulder). Le détail de ces travaux figure dans l'action multi-projet **Calcul parallèle en simulation numérique**.

### 3.10 Structuration des données dans les calculs par éléments finis

*Participants* : P.L. George, F. Hecht, P. Laug, E. Saltel, E. Seveno

Typiquement, la mise en œuvre de la méthode des éléments finis comprend plusieurs étapes de calcul : prétraitement, maillage, résolution et post-traitement. Au cours de ces différentes étapes, les données sont structurées de manière à respecter plusieurs principes, parfois contradictoires : manipulation facile pour le programmeur, temps d'accès réduit, encombrement mémoire minimal, disponibilité de toutes les informations utiles au calcul, ouverture vers les logiciels existants, adaptation à de nouvelles méthodes, etc. A notre connaissance, parmi les structures de données existantes, aucune n'est totalement satisfaisante. Aussi avons-nous spécifié une nouvelle organisation des informations, qui s'appuie sur

le concept de classe (structure comportant des opérateurs). Cette organisation a été appliquée au domaine des maillages (points, segments, surfaces, volumes). Après validation dans la bibliothèque Modulef, elle pourrait constituer un futur standard.

Ce travail rentre dans le cadre de la collaboration Dassault Aviation - INRIA "GÉNIE" (Science de l'Information et Ingénierie Concourante). Le but de ce travail est d'offrir la possibilité de traiter un certain nombre de problèmes réputés peu commodes (dans le cadre actuel) parmi lesquels se trouvent notamment :

- la génération de maillages P1 approchant au mieux une géométrie courbe ;
- la gestion d'une boucle d'adaptation automatique ;
- la génération de maillages P2 (cf. ci-dessus) ;
- le couplage fluide-structure, thermique-élastique.

### **3.11 Modélisation des connaissances pour le pilotage de modules algorithmiques**

*Participants* : S. Coudray, P. Laug

Un logiciel scientifique est généralement formé d'un ensemble de modules exécutables, que l'utilisateur doit enchaîner pour résoudre un problème complet. Là réside l'inconvénient essentiel de cette organisation, pourtant si propice aux développements nouveaux. Nous avons donc réalisé, au cours de ce stage de DESS Intelligence Artificielle (Paris 6), une application basée sur l'environnement de résolution de problèmes SCARP et utilisant la base de connaissances SHIRKA (INRIA Rhône-Alpes). Plusieurs niveaux d'expertise sont modélisés dans cette application, ce qui permet à la fois au développeur de créer de nouveaux enchaînements et à l'utilisateur de disposer d'un produit fini de type boîte noire.

## **4 Actions industrielles**

Dans le cadre de ses actions de recherche, le projet a noué des collaborations étroites avec un certain nombre de sociétés industrielles dont certaines ont fait l'objet d'études contractuelles. Parmi ces actions, citons :

**Etudes contractuelles**

- Participation au contrat Brite BRE2-CT94-0953 : “Design tools for advanced composite materials based on damage models” (A. Hassim).
- Participation au projet Brite-Euram ETMA (Efficient numerical and physical Turbulence Models for Aeronautics) (M. Vidrascu).
- Avec Simulog : suivi du produit GHS3D (version 2.1), (P.L. George).
- Participation à la convention de soutien de l’Etat à des actions de développement technique et d’innovation entre MICE (Ministère de l’industrie et du commerce extérieur) et Simulog sur les algorithmes de génération de maillages (P.L. George)
- Contrat DRET Utilisation d’un ordinateur à mémoire virtuelle partagée en calcul scientifique (M. Vidrascu)
- Participation au contrat européen ECARP (European Computational Aerodynamics Research Project) Adaptation de maillages (E. Saltel). Les partenaires particulièrement intéressés par ce sujet sont British Aerospace, Dassault Aviation et Dornier Luftfahrt.

**Etudes non contractuelles**

- Dans le cadre d’une bourse Firtech, avec Michelin (centre de recherche de Ladoux) en conception optimale des pneus (P. Le Tallec, M. Halard).
- Avec THOMSON-LCR : étude d’un système capteur/actionneur constitué de céramiques piézoélectriques (M. Bernadou, A. Blanguernon, F. Léné, J. Pioche).
- Avec Turboméca : optimisation de formes de coques minces (en collaboration avec l’université de Malaga) (M. Bernadou). Cette étude prolonge un contrat Dret.

**5 Actions nationales et internationales**

Le projet a plusieurs collaboration parmi lesquelles :

- Collaboration Ifremer-Inria sur les matériaux composites (A. Hassim) et sur les matériaux sandwich (thèse R. Kail, M. Bernadou, F. Léné)

- Contrat européen HCM Mathematical modeling and analysis of thin shells problems. L'INRIA est contractant principal et le réseau comporte huit autres partenaires européens (M. Bernadou, P.G. Ciarlet).

Le projet a accueilli, dans le cadre de ses séminaires, plusieurs chercheurs, dont :

- José Herskovits
- Pascal Frey

Le projet a également accueilli, pour des visites de courte durée, plusieurs chercheurs, dont :

- Rolf Stenberg (méthodes mixtes pour les problèmes de plaques, coques, Navier-Stokes...)
- Sai Hen Lo (maillages)

## 6 Diffusion des résultats

### 6.1 Diffusion de produits

GHS3D : logiciel de maillage en 3D (réalisé en collaboration avec le projet Menuisin)

La bibliothèque Modulef a été diffusée en 1994 à 99 exemplaires. (cf 6.4.2)

### 6.2 Actions d'enseignement

#### 6.2.1 Enseignement universitaire

M. Bernadou :

Cours au D.E.A de Mécanique de Paris 6 « Approximation des problèmes de coques minces par des méthodes d'éléments finis ».

Approximation of thin shells by F.E.M. (10 lectures), University Fudan, Shanghai, 25 Avril - 5 Mai 1994.

P. Laug :

Cours au DEA d'Analyse Numérique de l'Université Paris-Dauphine :  
Programmation en langage C.

### 6.2.2 Séminaires et formation permanente

**Cours Modulef** 11-15 juillet 1994 Penn-State University : Présentation de la bibliothèque et de la méthodologie de programmation de Modulef (D. Arnold, M. Bernadou, P.L. George, M. Vidrascu).

**Ecole de Printemps 1994: Coques** 21-25 Mars 1994, ESIEE (M. Bernadou, P.G. Ciarlet)

**Ecole Simulacion Numerica en Mecanica y Fisica** 19-23 Septembre 1994, Séville (M. Bernadou, E. Casas Renteria, L. Ferragut Canals, D. Gomez Pedreira, J.L. Lions, Y. Maday, C. Moreno Gonzalez, C. Parès Madronal, O. Pironneau, J. Real Anguas)

#### Séminaires :

Groupe de travail «Mathématiques et matériaux actifs». Coorganisation M. Bernadou, D. Cioranescu (Université de Paris 6), J.P. Puel et M. Tucsnak (Université de Versailles-St Quentin en Yvelines), Année universitaire 1993-1994.

Approximation de problèmes de coques minces, Jiaotong University, Xi'an (Chine), May 7, 1994 (M. Bernadou).

Approximation of general thin shells by DKT methods, Centre de Calcul de l'Académie des Sciences, Pékin, 11 Mai 1994 (M. Bernadou).

Diverses méthodes d'approximation de problèmes de jonctions de structures, Malaga, 27 Septembre 1994 (M. Bernadou).

Coques piézoélectriques, Groupe de travail «Mathématiques et matériaux actifs», Versailles, 20 Juin 1994 (M. Bernadou).

Méthode automatique de maillages en dimension 3, aspects numériques, R.P.I., Troy USA, Juillet 1994 (P.L. George).

Génération et optimisation de maillages en dimension 3, Cerca, Montréal Canada, Juillet 1994 (P.L. George).

### 6.2.3 Jurys de thèse ou d'habilitation

M. Bernadou

- ARREGUI I., Une technique eulérienne pour la simulation des coques minces en grands déplacements, Institut Aérotechnique de St Cyr, 28 Février 1994 (Rapporteur)

- KAIL R., Modélisation asymptotique et numérique de plaques et de coques stratifiées, Université Pierre et Marie Curie, 9 Juin 1994 (Co-directeur de thèse avec F. Léné)
- THIRIET M., Etude des écoulements dans les voies respiratoires intrathoraciques proximales et les artères de gros calibre de la circulation systémique, Mémoire d'habilitation, Université de Paris 7, 28 Juin 1994 (Invité)
- KAISS A., Modélisation du comportement viscoélastique de l'œil et de sa trépanation, Université Paris-Dauphine, 21 Juillet 1994 (Rapporteur)
- VILARIÑO MORENO M.A., Contribución al estudio del modelo lineal de láminas delgadas de W.T. Koiter : fundamentación matemática y aproximación mediante el método no conforme de elementos finitos delicuento de Sander, Universidad de Malaga, 26 Septiembre 1994 (Co-directeur de thèse avec F. Palma et P. Trouvé)
- CUBIER A., Analyse et simulation numérique de jonctions de coques minces, Université Pierre et Marie Curie, 1994 (Directeur de Thèse)
- PELLERIN A., Approche asymptotique et modélisation numérique des coques élastiques en dynamique moyenne fréquence (Rapporteur)

#### 6.2.4 Membre du Comité de Rédaction de:

M. Bernadou

- Finite Elements in Analysis and Design.
- Revue Européenne des Eléments Finis.

#### 6.3 Participation aux manifestations

M. Bernadou

- Some remarks about piezoelectric shells, Computational Structures Technology, Athens, August 31-September 2, 1994.
- Modulef en 1994. Coques piézoélectriques, 6ème Ecole d'Automne Franco-Espagnole sur la Simulation numérique en physique et en ingénierie, Séville, 19-23 Septembre 1994.



M. Carrive, P. Le Tallec,

- Ecriture intrinsèque d'un modèle de coque élastique en grandes déformations, Colloque d'analyse numérique, Les Karellis, Mai 1994.

H. Chajmowicz

- Un problème dynamique de poutres élastiques non-linéaires, Congrès National d'Analyse Numérique, Les Karellis, Mai 1994.

A. Hassim

- Meeting Contrat Brite : ADANIDEC KICK-OFF meeting. Thomson ASM Valbonne, 3-4 Mai 1994.
- Technical Meeting Contrat Brite : Mathematical development of damage models. Université de Gent, 7-8 juillet 1994.
- Meeting Contrat Brite. Université de Gent. 20-21 septembre 1994.

M. Halard

- Participation au Groupe de Recherche d'optimisation de formes à Toulouse.

P. L. George

- Présentation de la méthode de Delaunay avec contrôle de taille, 26<sup>e</sup> Congrès d'Analyse Numérique, Les Karellis (Savoie), 30 mai - 3 juin 1994.

M. Halard, P. Le Tallec

- Optimisation de structures non linéaires et de maillages, 26<sup>e</sup> Congrès d'Analyse Numérique, Les Karellis (Savoie), 30 mai - 3 juin 1994.

P. Laug

- Spécification et implémentation de types abstraits pour le calcul scientifique, 26<sup>e</sup> Congrès d'Analyse Numérique, Les Karellis (Savoie), 30 mai - 3 juin 1994.
- Congrès StruCoMe 94 [15]

P. Le Tallec, T. Sassi, M. Vidrascu

- Three-dimensional Domain Decomposition Methods with Non-matching Grids and Unstructured Coarse Solvers, Seventh international conference on domain decomposition methods in scientific and engineering computing, Penn State University, October 27-30, 1993.

P. Le Tallec, J. Mandel, M. Vidrascu

- Balancing Domain Decomposition for Plates, Seventh international conference on domain decomposition methods in scientific and engineering computing, Penn State University, October 27-30, 1993.

P. Le Tallec, J. Mandel, M. Vidrascu

- Parallel Domain Decomposition Algorithms for Solving Plate and Shell Problems, The second international conference on Computational Structures Technology, Athens, Greece, August 30-September 1, 1994.

P. Le Tallec, E. Saltel, M. Vidrascu

- Solving Large Scale Structural Problems on Parallel Computers using Domain Decomposition Techniques, The second international conference on Computational Structures Technology, Athens, Greece, August 30-September 1, 1994.

P. Le Tallec, M. Vidrascu

- Méthodes de décomposition de domaines et implémentation dans Modulef, Colloque d'Analyse Numérique, Les Karelis, Mai 1994.

M. Vidrascu

- Parallel computing at INRIA, Joint NEC-GMD Workshop on Scientific Parallel Computing, Bonn, 20 Septembre 1994.

## 6.4 Activités extérieures

### 6.4.1 Réunions diverses

#### Comité des utilisateurs IDRIS

Plusieurs réunions au centre de l'IDRIS (Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique) pour l'accès au C98 (M. Vidrascu).

**Comité exécutif Modulef**

Une réunion Inria-Simulog est organisée environ toutes les 6 semaines pour assurer le suivi de la gestion du club Modulef (D. Steer, M. Vidrascu pour l'Inria, D. Bégis, P. Paté pour Simulog).

**6.4.2 Club Modulef**

**Objectifs** Les principaux objectifs du club Modulef sont les suivants :

- Développer une bibliothèque d'éléments finis utilisant les derniers résultats de recherche théorique (analyse fonctionnelle) et numérique ainsi que l'expérience des industriels dans la résolution de problèmes concrets importants ;
- Regrouper les organismes intéressés par un même sujet afin de déterminer la méthodologie optimale et de la programmer ;
- Favoriser les échanges et le transfert aussi bien du savoir faire de chacun que des logiciels ;
- Valider les nouvelles méthodes : comparaison d'un module avec ceux déjà implantés et insertion éventuelle ;
- Promouvoir l'utilisation de Modulef.

**Structure du club** La vie du club est régie par un règlement qui est le moins contraignant possible et qui respecte aussi bien l'autonomie et la liberté de chacun que la libre circulation des programmes aux fins de recherche.

Le club est régi par deux Comités :

- le Comité Directeur (orientations, décisions) ;
- le Comité exécutif (suivi des actions et recommandations sur leurs évolutions, coordination...).

Au 30/09/94, le club comprend 99 adhérents institutionnels actifs soit 18 sociétés industrielles (dont 3 étrangères), 49 laboratoires universitaires ou centres de recherche français et 32 laboratoires universitaires étrangers.

**Contenu de la bibliothèque** La bibliothèque est écrite en Fortran 77. Ces modules sont destinés à résoudre, par la méthode des éléments finis, différents types de problèmes modélisés à l'aide d'équations aux dérivées partielles. Parmi les domaines abordés, on peut citer :

- la thermique stationnaire ou transitoire, linéaire ou non, bi ou tridimensionnelle ;
- l'élasticité bi ou tridimensionnelle dans l'hypothèse des petites et grandes déformations ;
- les matériaux nouveaux ;
- l'écoulement bidimensionnel de fluides.

Le logiciel est très riche d'un point de vue algorithmique ; il comporte entre autres :

- plusieurs algorithmes de maillage en dimension 2 et 3 ;
- des méthodes d'éléments finis directes ou duales (hybrides, mixtes) ;
- plusieurs techniques de résolution de systèmes linéaires par des méthodes directes ou itératives ;
- des techniques de décomposition de domaines.

**Méthodologie** La bibliothèque est construite suivant le principe de l'analyse descendante. Pour la résolution de problèmes nouveaux, l'algorithme est décomposé en opérateurs mathématiques. Généralement un grand nombre de ces opérateurs est déjà réalisé informatiquement sous la forme de modules. Cette approche entraîne un gain de temps important pour l'utilisateur qui peut se limiter uniquement à la conception des opérateurs associés à la partie novatrice de son étude.

**Environnement - Diffusion** Le projet a animé l'assemblée générale du club Modulef (1 juin 1994) qui a eu lieu cette année pendant le congrès d'analyse numérique aux Karelis.

Danièle Steer en collaboration avec Pascale Paté ont créé un serveur Modulef sous mosaic. La documentation de présentation du Club est accessible via mosaic ainsi que des informations sur la vie du Club. La mise sur mosaic de l'ensemble de la documentation Modulef est en cours. Une version expérimentale utilisant un traducteur automatique de latex en HTML a été réalisée en collaboration avec Michel Kern (projet Ident) et utilisée avec succès lors du cours Modulef à Penn-State.

**Accord de diffusion Inria - Simulog** Depuis le premier janvier 1993, la diffusion de la bibliothèque est effectuée par Simulog (filiale de l'Inria) dans le cadre d'une convention Inria - Simulog.

## 7 Publications

### Livres et monographies

- [1] M. BERNADOU, *Méthodes d'Éléments Finis pour les Problèmes de Coques Minces*, Masson, Paris, 1994.
- [2] P. JOLY, M. VIDRASCU, *Solution of linear systems, Modulef Guide 5*, INRIA, 1994.

### Thèses

- [3] A. CUBIER, *Analyse et simulation numériques de jonction de coques minces.*, thèse de doctorat, Université Paris VI, 14 Octobre 1994.
- [4] R. KAIL, *Modélisation asymptotique et numérique de plaques et coques stratifiées*, thèse de doctorat, Université Paris 6, 9 Juin 1994.
- [5] M. VILARIÑO MORENO, *Contribución al estudio del modelo lineal de láminas delgadas de W.T. Koiter : fundamentación matemática y aproximación mediante el método no conforme de elementos finitos delicuento de Sander*, thèse de doctorat, Universidad de Malaga, 26 Septembre 1994.

### Articles et chapitres de livre

- [6] M. BERNADOU, P. CIARLET, B. MIARA, «Existence theorems for two-dimensional linear shell theories», *J. Elasticity* 34, 1994, p. 111–138.
- [7] M. BERNADOU, P. MATO-EIROA, P. TROUVÉ, «On the convergence of a D.K.T. method valid for shells or arbitrary shape», *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.* 118, 1994, p. 373–391.
- [8] M. BERNADOU, « $C^1$ -curved finite elements and applications to plate and shell problems», *J. Computer Appl. Mathematics* 50, 1994, p. 133–144.

### Communications à des congrès, colloques, etc.

- [9] M. BERNADOU, C. HAENEL, «Some remarks about piezoelectric shells», *in: Computational Structures Technology 1994 - Advances in Finite Element Techniques*, M. Papadrakakis, B. Topping (éd.), Civil-Comp. Press, p. 1–7, Edinburgh, 1994.

- [10] M. BERNADOU, B. LALANNE, «On the numerical analysis of buckling of general thinshells», *in: World Congress of Nonlinear Analysis*, Walter de Gruyter, Berlin, to appear.
- [11] M. BERNADOU, «Straight and curved finite elements of class  $C^1$  and some applications to thin shell problems», *in: Finite Element Methods, Fifty Years of the Courant Element*, M. Krizek, P. Neittaanmaki, R. Stenberg (éd.), Marcel Dekker, p. 63-77, New-York, 1994.
- [12] M. BERNADOU, «Numerical analysis of thin shell junctions», *in: Asymptotic Methods for Elastic Structures*, L. Trabucho (éd.), to appear.
- [13] A. HASSIM, «Calcul des Structure en Matériaux Composites», *in: StruCoMe 94*, 22-24 novembre 1994. Paris - France.
- [14] A. HASSIM, «Characterization of Composite Materials using a two-scale Asymptotic Homogenization Method», *in: Smart Structures and Materials 1994*, p. 479-485, 14-16 February 1994. Orlando (Floride)-U.S.A.
- [15] P. LAUG, «Structuration des données dans les calculs par éléments finis», *in: Congrès StruCoMe 94*, 22-24 novembre 1994. Paris - France.
- [16] P. L. TALLEC, M. HALARD, «Optimization of nonlinear structures and meshes», *in: Advances in Structural Optimization*, B. T. . M. Papadarakakis (éd.), Computational Structures Technology, Civil-Comp Press, p. 113-117, Edinburgh, september 1994.
- [17] P. L. TALLEC, J. MANDEL, M. VIDRASCU, «Parallel Domain Decomposition Algorithms for Solving Plate and Shell Problems», *in: Advances in parallel and vector processing for structural mechanics*, B. Topping, M.Papadarakakis (éd.), Civil-Comp Press, p. 139-146, Athens, August 1994.
- [18] P. L. TALLEC, J. MANDEL, M. VIDRASCU, «Balancing Domain Decomposition for Plates», *in: Domain decomposition Methods in Science and Engineering (Proceedings of the Seventh International Conference on Domain Decomposition, October 27-30, 1993)*, D. E. Keyes, J. Xu (éd.), American Mathematical Society, 1995. à paraître.
- [19] P. L. TALLEC, E. SALTEL, M. VIDRASCU, «Solving Large Scale Structural Problems on Parallel Computers using Domain Decomposition Techniques», *in: Advances in parallel and vector processing for structural mechanics*, B. Topping, M.Papadarakakis (éd.), Civil-Comp Press, p. 127-134, Athens, August 1994.
- [20] P. L. TALLEC, T. SASSI, M. VIDRASCU, «Three-dimensional Domain Decomposition Methods with Nonmatching Grids and Unstructured Coarse Solvers», *in: Domain decomposition Methods in Science and Engineering (Proceedings of the Seventh International Conference on Domain Decomposition, October 27-30, 1993)*, D. E. Keyes, J. Xu (éd.), American Mathematical Society, 1995. à paraître.

## Cours photocopiés

- [21] P. LAUG, *Programmation en langage C*, Université Paris-Dauphine, DEA d'Analyse Numérique, octobre - décembre 1993.

## Rapports de recherche et publications internes

- [22] S. COUDRAY, «Modélisation des connaissances pour le pilotage de modules algorithmiques», Rapport de DESS, Paris 6 / IFREMER, septembre 1994.
- [23] A. DUTOYA, A. HASSIM, «Mathematical Model of Damage and Specifications of experimental parameters for Transverse Cracking in Laminate Composite», contrat BRITE, juillet 1994.
- [24] C. HAENEL, «Modélisation de coques piézoélectriques», Rapport de stage DEA, Paris 6, juin 1994.

## 8 Abstract

The Modulef project studies, from a theoretical and numerical point of view, new approximation methods for structural mechanic problems. On the other hand, it develops reliable software tools for scientific computation.

The main activities of the project concern :

- the study and development of new numerical methods, essentially in the field of solid mechanics.
- the study of efficient pre-conditioners for domain decomposition methods and their parallel implementation.
- the study and development of software tools such as automatic mesh generation, graphic representation or expert systems.
- the practical implementation, within the Modulef library, of the algorithms studied.

Furthermore, the project is in charge with the coordination of the Modulef club which brings together universities and industrial companies from several different countries, in order to design and implement a library of finite element modules. The Modulef library has been constructed such that it combines the notions of abstract approach with that of modular programming. Various algorithms and software features make the Modulef library a powerful tool for research and development.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Présentation du projet</b>	<b>2</b>
2.1	Activités de recherche . . . . .	3
2.2	Activités de coordination et d'animation du club Modulef . . .	3
<b>3</b>	<b>Actions de recherche</b>	<b>4</b>
3.1	Optimisation de formes de structures non linéaires et de maillages	5
3.2	Structures minces (cas linéaire) . . . . .	7
3.2.1	Approche de plaques par éléments finis courbes de classe $\mathcal{C}^1$ . . . . .	7
3.2.2	Etude des phénomènes de verrouillage dans l'approximation de coques minces générales . . . . .	7
3.3	Modélisation et approximation de coques en grandes déformations	8
3.4	Jonctions de structures minces . . . . .	9
3.4.1	Jonctions de coques minces . . . . .	9
3.4.2	Formulation mathématique des problèmes de mécanismes	9
3.5	Matériaux composites - Matériaux nouveaux . . . . .	10
3.5.1	Étude de l'endommagement . . . . .	10
3.5.2	Contrôle vibro-acoustique de plaques . . . . .	11
3.5.3	Coques piézoélectriques . . . . .	13
3.6	Décomposition de domaines et calcul parallèle . . . . .	13
3.7	Décomposition de domaines et homogénéisation . . . . .	13
3.8	Maillage . . . . .	15
3.8.1	Méthode de Delaunay-Voronoi en dimension 2 gouvernée par une carte de tailles . . . . .	15
3.8.2	Méthode de Delaunay-Voronoi en dimension 3 . . . . .	15
3.8.3	Méthode de superposition de motifs dans un domaine .	16
3.8.4	Méthode P1/P2 . . . . .	16
3.9	Décomposition automatique de domaines . . . . .	17
3.10	Structuration des données dans les calculs par éléments finis . .	17
3.11	Modélisation des connaissances pour le pilotage de modules algorithmiques . . . . .	18



<b>4 Actions industrielles</b>	<b>18</b>
<b>5 Actions nationales et internationales</b>	<b>19</b>
<b>6 Diffusion des résultats</b>	<b>20</b>
6.1 Diffusion de produits . . . . .	20
6.2 Actions d'enseignement . . . . .	20
6.2.1 Enseignement universitaire . . . . .	20
6.2.2 Séminaires et formation permanente . . . . .	21
6.2.3 Jurys de thèse ou d'habilitation . . . . .	21
6.2.4 Membre du Comité de Rédaction de: . . . . .	22
6.3 Participation aux manifestations . . . . .	22
6.4 Activités extérieures . . . . .	24
6.4.1 Réunions diverses . . . . .	24
6.4.2 Club Modulef . . . . .	25
<b>7 Publications</b>	<b>27</b>
<b>8 Abstract</b>	<b>29</b>