



HAL
open science

Adaptation d'une stratégie de calcul multiéchelle pour les calculs de délaminage dans les composites stratifiés

Pierre Kerfriden, Olivier Allix, Pierre Gosselet

► To cite this version:

Pierre Kerfriden, Olivier Allix, Pierre Gosselet. Adaptation d'une stratégie de calcul multiéchelle pour les calculs de délaminage dans les composites stratifiés. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03362167

HAL Id: hal-03362167

<https://hal.science/hal-03362167>

Submitted on 1 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Adaptation d'une stratégie de calcul multiéchelle pour les calculs de délaminage dans les composites stratifiés

Pierre Kerfriden, Olivier Allix & Pierre Gosselet

LMT-Cachan (ENS de Cachan/CNRS UMR8535/Université Paris 6)
61, avenue du Président Wilson, F-94235 CACHAN CEDEX, France
kerfriden@lmt.ens-cachan.fr

Résumé :

Cet article présente la simulation numérique du délaminage de composites stratifiés par utilisation d'une stratégie de calcul multiéchelle de décomposition de domaine, avec homogénéisation en espace. Le calcul non-linéaire d'évolution correspondant au chargement progressif du composite est poussé jusqu'à la ruine complète de la structure. L'accent est porté sur l'optimisation de la stratégie utilisée.

Abstract :

This paper presents the numerical calculation of composite laminates debonding using a multiscale mixed decomposition domain method, with homogenization in space. The non-linear problem is computed through loading increments until complete failure of the structure. We focus here on the optimisation of the resolution strategy.

Mots-clefs :

Structures composites ; délaminage ; multiéchelle

1 Introduction

Malgré les nombreuses études menées depuis le début des années 80 sur ce sujet, la prédiction du délaminage dans les composites reste un défi scientifique et un enjeu industriel puisque certains constructeurs souhaitent remplacer une partie de leurs essais mécaniques par des simulations. Durant les 20 dernières années, les nombreuses avancées dans le domaine ont abouti à une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation des composites, et à une meilleure représentation de ces phénomènes à la fois à l'échelle micro et méso ([Nairn (1994), Ladevèze (2002)]). La confiance acquise dans ces modèles très proches de la physique laisse envisager la possibilité de traiter des cas industriels complexes.

Malheureusement, ces deux modélisations s'appuient sur une discrétisation très fine de la structure conduisant, même pour des cas très simples, à la résolution de problèmes dont le nombre de d.d.l. est prohibitif si on s'en tient à des méthodes de calcul traditionnelles. Cependant, les capacités de calcul ont été fortement accrues par les avancées en termes d'homogénéisation et de calcul parallèle ([Feyel (2000), Oden (1999), Farhat (2000)]).

Le but de nos travaux est la simulation du délaminage de structures composites stratifiées complexes, modélisées à l'échelle "méso" : seules les interfaces présentent une aptitude au délaminage. Dans ce cadre, la stratégie multiéchelle de décomposition de domaine mixte décrite dans [Ladevèze (2003)] semble pouvoir répondre à nos besoins par la nature mixte du comportement des interfaces qui permet une intégration aisée du comportement cohésif des interfaces du modèle de stratifié, par le traitement local des non-linéarités du modèle et par la procédure d'homogénéisation automatique de la méthode particulièrement performante lors de l'utilisation de sous-structures élastiques.

Nos premiers travaux portent ainsi sur l'adaptation de cette méthode aux structures étudiées. La première étape consiste donc à intégrer des modèles d'interface cohésive au sein de la stratégie de calcul LATIN multiéchelle. Le traitement des non-linéarités locales et globales induites par le comportement du modèle utilisé nécessite ensuite une étude d'optimisation des paramètres de la stratégie de calcul d'une part, et l'intégration d'algorithmes de résolution de systèmes non linéaires performants, capables éventuellement de traiter les réponses de type "snap-back" d'autre part.

2 Problème de référence

Le modèle retenu pour la simulation du délaminage des structures composite stratifié est décrit dans [Allix (1992)]. Ce modèle introduit des variables d'endommagement d_i et leur loi d'évolution dans deux milieux distincts : les plis et les interfaces du composite. On suppose dans le cadre de ces travaux que seules les interfaces présentent une aptitude au délaminage. L'énergie de déformation de l'interface s'écrit alors (la direction 3 est normale à l'interface, 1 et 2 sont selon les bissectrices des directions des fibres des plis adjacents, $[u_i]$ représente le saut de déplacement, k_i est une raideur) :

$$e_d = \frac{1}{2}((1 - d_1)k_1[u_1]^2 + (1 - d_2)k_2[u_2]^2 + k_3(1 - d_3)[u_3]_+^2 + k_3[u_3]_-^2) \quad (1)$$

Les variables d'endommagement évoluent en fonction de l'histoire du saut de déplacement à l'interface. Les plis sont supposés élastiques linéaires orthotropes.

Des calculs de délaminage ont été conduit avec succès sur des cas 3D. Cependant, afin de réduire les temps d'études de convergence menées, un cas test 2D simplifié mais représentatif des problèmes occurrent lors du délaminage de structure composite stratifié complexes à été élaboré. Il est représenté figure 1 . La solution représentée est obtenue après 10 incréments d'un chargement en quasistatique, l'initiation du délaminage ayant lieu au 5eme pas.

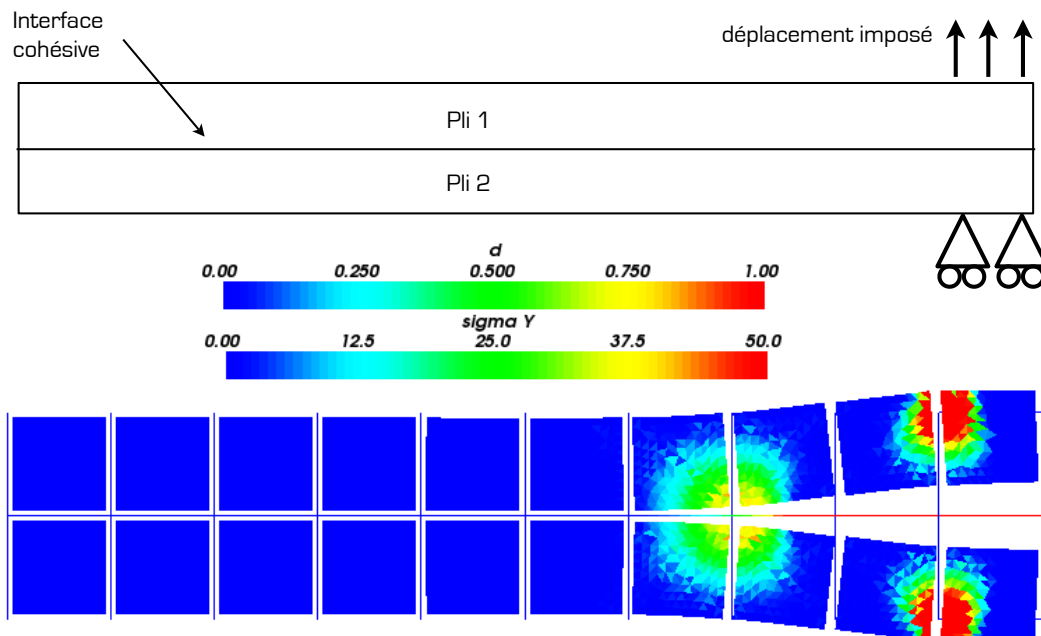


FIG. 1 – Cas test de type poutre DCB en 2D

3 Présentation de la stratégie de calcul et intégration du modèle de stratifié

3.1 Principe de la stratégie

La stratégie proposée est une méthode de décomposition de domaine mixte, multi-échelle en espace, permettant de traiter des problèmes non-linéaires d'évolution. Elle est décrite dans [Ladevèze (2003)]. La méthode repose sur les deux points fondamentaux suivants :

- Une décomposition du domaine en sous-structures et interfaces, chacune de ces entités possédant un comportement et des champs inconnus propres. Les interfaces font apparaître à la fois les inconnues cinématiques et statiques. Une sous-structuration possible pour un problème type de composite stratifié est donné figure 1.
- Une séparation d'échelle micro/macro des inconnues d'interface. Les bases macro traditionnellement utilisées permettent d'extraire les parties linéaires des champs d'interface, en accord avec le principe de Saint-Venant.
- Un algorithme itératif de résolution à deux étapes utilisant des directions de recherche liant les quantités statiques et cinématiques et conférant à la stratégie son caractère mixte. La vérification permanente des conditions de transfert des quantités statiques macros conduit à la résolution sur deux échelles du problème global, les phénomènes à grande longueur d'onde étant captés à l'aide d'une représentation homogénéisée de la structure.

Les étapes de l'algorithme de résolution correspondent à la séparation des équations du système en équation d'admissibilité des sous-structures (linéaire et globale) et équations de comportement et d'équilibre d'interface (locales, éventuellement non-linéaires). On distingue donc une étape linéaire et une étape locale, les directions de recherche permettant de fermer chacun des systèmes en donnant une relation vis à vis de l'itération précédente.

3.2 Application au calcul de délaminage

Lors de l'intégration du modèle de délaminage, les interfaces du modèle de stratifié sont confondues avec les interfaces entre les sous-structures de la stratégie de résolution. Le comportement des sous-structures, donc celui des plis, est élastique linéaire orthotrope, il n'est pas nécessaire de mettre à jour les matrices de rigidité et les opérateurs homogénéisés lors de la progression du calcul. Les non-linéarités du modèle sont concentrées sur les interfaces cohésives et traitées localement (en chaque point) par la stratégie de résolution lors de l'étape locale (résolution simultanée des directions de recherche E^+ , de l'équilibre et du comportement des interfaces) ; ce problème est résolu par un algorithme de Newton-Raphson.

Les temps de calculs observés pour résoudre les problèmes locaux sont faibles devant les temps requis pour résoudre les problèmes linéaires macro et par sous-structure. Cependant, l'introduction d'interfaces cohésives et l'apparition d'effets de bord entraînent une diminution drastique du taux de convergence. Ceci nous amène donc à étudier les paramètres de la méthode ayant une influence sur le taux de convergence.

4 Analyse et optimisation de la méthode multiéchelle

On peut distinguer deux situations dans les calculs effectués : celles où il n'y a pas de délaminage (endommagement strictement inférieur à un) et celles où une fissure progresse. Dans le premier cas, la topologie de la structure ne varie pas, les contraintes sont très localisées autour de la zone de chargement, les effets de bords constituent l'essentiel de la réponse et il doit être captés par le problème micro. Dans le second cas une difficulté s'ajoute : devant les changements fondamentaux de la structure, il faut adapter le problème macro de manière à

répercuter au mieux les effets du délaminage à l'ensemble de la structure.

4.1 Influence des directions de recherche

Les quantités d'interfaces sont recherchés entre deux étapes de la stratégie de calcul. A l'étape linéaire, outre l'équilibre macro, on vérifie l'équilibre de chacune des sous-structures soumise à des conditions de Fourier sur son bord caractérisées par la direction de recherche k^- liant déplacements et efforts d'interface.

L'opérateur h^- doit correspondre à la rigidité du complémentaire de la sous-structure considérée. Il doit donc être une bonne approximation du complément de Schur de ce complémentaire rapporté sur l'interface. L'utilisation du complément de Schur lui-même nécessiterait une inversion d'un opérateur de rigidité correspondant pratiquement à celui de la structure globale (et une globalisation de l'étape locale dans le cas classique où h^+ et h^- sont conjuguées).

Une première approximation consiste à ne calculer ce complément que sur une bande d'éléments autour de la sous-structure considérée. En effet, les quantités recherchés ayant des résultantes et moment nuls (grâce au problème macro), leur action est localisée autour des points d'application d'après le principe de Saint-Venant.

Une seconde approximation consiste à utiliser non plus un opérateur pour toute l'interface, mais un opérateur pour chaque point de l'interface, ou même un scalaire bien choisi pour toute l'interface. C'est ce qui est fait classiquement, en prenant comme direction de recherche la valeur E/L , où E est le module de Young des sous-structures proches de celle considérée, et L une mesure caractéristique de l'interface.

Cette approximation ne donnant pas toujours satisfaction, il est proposé de la multiplier par un scalaire k dépendant du problème à traiter. La figure 2 présente les courbes de convergence pour différents k .

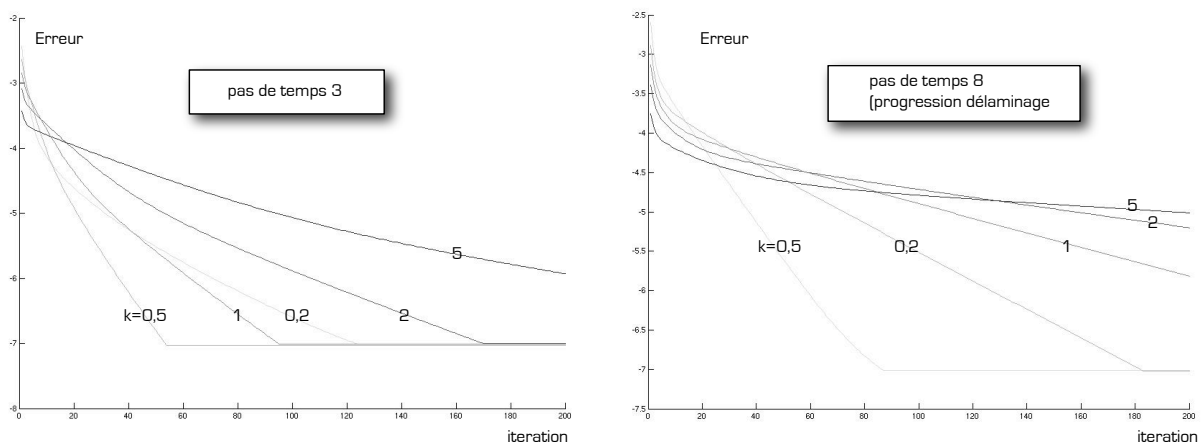


FIG. 2 – Influence du facteur de pondération des directions de recherche sur la convergence

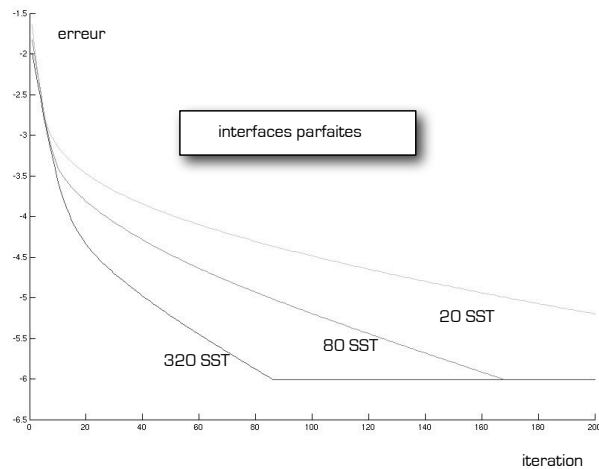
On voit ici la forte influence des directions de recherche sur la convergence de la méthode, et en particulier lorsque le délaminage a lieu. En outre, cette étude nous a permis de mettre en avant le fait que le paramètre scalaire optimum pour un calcul avec interfaces parfaites et un calcul avec interfaces cohésives n'est pas le même. Il semble donc qu'il soit pertinent de tenir compte de la rigidité des interfaces (au moins en pointe de fissure) lors du calcul des directions de recherche. A terme, un de nos objectifs est donc de déterminer une procédure permettant d'obtenir automatiquement des directions de recherche proches de leur valeur optimum.

4.2 Influence de la sous-structuration

Des calculs pour différentes sous-structurations du cas test proposé figure 1 montrent une accélération très nette de la convergence dans le cas d'interfaces parfaites lorsque la sous-structuration devient plus fine (figure 4.2). En effet, le problème macro est alors enrichi et se rapproche du problème micro à résoudre. On peut interpréter ce phénomène comme un enrichissement de type "h" du problème macro. La question posée ici est de savoir si l'on obtient la même accélération pour un enrichissement de type

"p", à savoir un enrichissement polynomial de la base macro. *A priori* on propose d'utiliser des vecteurs de base permettant d'extraire la partie quadratique ou même cubique des distributions d'efforts et de déplacements d'interface.

Cependant, cet enrichissement entraîne un traitement plus lourd du problème macro à chaque itération. Nous cherchons alors à localiser les zones où un tel procédé peut se révéler efficace.



4.3 Adéquation de la base macro au problème du délaminage

Hormis l'éventuelle utilité d'un enrichissement systématique de la base macro dans les zones dominées par l'effet de bord, une question se pose sur la validité de la base macro autour de la pointe de fissure. L'idée utilisée provient des travaux de [Guidault (2006)] et nous encourage à distinguer la partie cohésive de l'interface de la partie délaminée, traitée comme une interface de type contact parfait.

4.4 Pilotage des calculs par la non-linéarité locale

L'objectif est ici de pouvoir traiter le passage d'instabilité résultant du délaminage. L'idée est d'associer un solveur à longueur d'arc à la stratégie décrite précédemment. On propose ainsi de relâcher la condition de chargement, en introduisant un paramètre λ pour contrôler les incréments de chargement. K est ici un opérateur de comportement endommagé dépendant de l'histoire de la structure.

$$\forall \underline{u}^* \in \mathcal{U}_{ad0}, \quad \int_{\Omega} Tr \left(\underline{\underline{\epsilon}}(\underline{u}) \mathbf{K} \underline{\underline{\epsilon}}(\underline{u}^*) \right) d\Omega - \int_{\partial\Omega} \lambda \underline{F}_d \cdot \underline{u}^* d\Gamma = 0 \quad (2)$$

L'incrément du paramètre de chargement est relié à l'évolution des inconnues cinématiques du problème par une équation de contrôle :

$$R(\Delta \underline{u}, \Delta \lambda) = 0 \quad (3)$$

On résout ce type de problème par un algorithme de Newton-Raphson portant sur les inconnues (\underline{u}, λ) . Cependant, seul l'équilibre est linéarisé, et on résout le système par un algorithme de type "point selle", en cherchant successivement des solutions $(\underline{u}_n, \lambda_n)$ vérifiant l'équilibre puis l'équation de contrôle. Les variables d'endommagement sont mises à jour à la fin de la résolution du système linéaire portant sur les inconnues cinématiques. Le contrôle du chargement

a été adapté au type de non-linéarité rencontrée ; le paramètre λ est piloté par le ou les points les plus endommagés de la structure, le contrôle est donc local.

Une première idée pour intégrer cette idée à la stratégie décrite précédemment est de résoudre chaque problème d'équilibre linéarisé par la stratégie proposée, en fixant les variables d'endommagement sur les interfaces. Le résidu de Newton calculé à l'itération précédente est appliqué comme chargement volumique sur la structure. On retrouve la robustesse de l'algorithme : une convergence du problème linéarisé de faible qualité (erreur de 10^{-2} en indicateur d'erreur LATIN) suffit à la convergence du problème non-linéaire à chaque pas de chargement.

Cette méthode a été testée sur un cas 1D et permet de passer les pics et "snap-back" des courbes de réponse de structures endommageables. Cependant, l'aspect global et non-linéaire de l'équation de contrôle inhibe les performances de la méthode puisque le solveur LATIN n'est ici utilisé que pour résoudre des problèmes linéaires.

5 Conclusions

Les premiers travaux effectués montrent de réelles facilités de traitement du modèle de composite stratifié avec interfaces cohésives par la stratégie multiéchelle de décomposition de domaine LATIN. Les phénomènes d'initiation et de propagation du délaminage sont aisément simulables. Il est également possible de piloter les calculs par de très fortes non-linéarités locales, pour lesquelles la structure peut présenter une réponse de type "snap-back".

Des travaux d'optimisation sont en cours afin d'accélérer la convergence, d'une part en transmettant une information macro adaptée au problème traité et d'autre part en améliorant les performances du problème micro.

Références

- O. Allix, P. Ladevèze 1992 Interlaminar interface modelling for the prediction of delamination. *Computers & structures* **22** 235-242
- C. Farhat, K. Pierson, M. Lesoinne 2000 The Second Generation FETI Methods and Their Application to the Parallel Solution of Large-Scale Linear and Geometrically Non-Linear Structural Analysis Problems. *J. Comp Meth. Appl. Mech. Eng.*, **184(2-4)** 333-374
- F. Feyel, J.-L. Chaboche 2000 FE^2 multiscale approach for modelling the elasto-viscoplastic behaviour of a long fiber SiC/Ti composite materials. *CMAME* **183** 417-455
- P.-A. Guidault, O. Allix, L. Champaney, J.-P. Navarro 2006 A two-scale approach with homogenization for the computation of cracked structures. *Computers & structures*
- P. Ladevèze, O. Loiseau, D. Dureisseix 2001 A micro-macro and parallel computational strategy for highly heterogeneous problems. *IJNME* **52(1-2)** 121-138
- P. Ladevèze, G. Lubineau 2002 An enhanced mesomodel for laminates based on micromechanics. *Composites Science & Technology* **62(4)** 533-541
- P. Ladevèze, A. Nouy 2003 On a multiscale computational strategy with time and space homogenization. *CMAME* **192** 2-25
- J. Nairn, S. Hu 1994 Matrix microcracking. *Damage Mechanics of Composite Materials* 187-243
- J.-T. Oden, K. Vernaganti, N. Moes 1999 Hierarchical modelling of heterogeneous solids *CMAME*, **172** 1327-1344