



**HAL**  
open science

## Mésodynamique des 3D C/C : une première stratégie multiéchelle dédiée

Jayant Sen Gupta, Olivier Allix, Pierre-Alain Boucard, Alain Fanget,  
Pierre-Louis Héreil

► **To cite this version:**

Jayant Sen Gupta, Olivier Allix, Pierre-Alain Boucard, Alain Fanget, Pierre-Louis Héreil. Mésodynamique des 3D C/C : une première stratégie multiéchelle dédiée. CFM 2003 - 16e Congrès Français de Mécanique, 2003, Nice, France. hal-01987869

**HAL Id: hal-01987869**

**<https://hal.science/hal-01987869>**

Submitted on 21 Jan 2019

**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.

## Mésodynamique des 3D C/C : une première stratégie multiéchelle dédiée

Jayant Sen Gupta\*, Olivier Allix\*, Pierre-Alain Boucard\*, Alain Fanget† & Pierre-Louis Héreil†

\*: Laboratoire de Mécanique et de Technologie  
E.N.S. de Cachan / C.N.R.S. / Université Paris VI  
61, avenue du Président Wilson, 94230 Cachan  
e-mail: sengupta@lmt.ens-cachan.fr

†: Centre d'Essai de Gramat  
46500 GRAMAT

### Résumé :

Dans un précédent travail mené conjointement par le CE Gramat et le LMT Cachan, une modélisation d'un composite 3D C/C à une échelle mésoscopique (échelle des blocs de matrice, sections de toron, interfaces) a été proposée et identifiée. La simulation tridimensionnelle du comportement sous choc de ce matériau à cette échelle conduit à des problèmes de taille considérable.

Dans ce travail, nous nous intéressons à une stratégie de calcul par sous-structuration dans le but de

(i) diminuer le coût des analyses et d'en rendre le traitement parallèle

(ii) pouvoir traiter les interfaces de façon adaptée.

La démarche suivie s'inscrit dans le cadre de la méthode LATIN avec décomposition de domaine. Elle vise à étendre au cas de sous-structures non-linéaires les développements déjà effectués en dynamique pour des non-linéarités concentrées aux interfaces.

### Abstract :

In a previous work by LMT Cachan in collaboration with CE Gramat, a modeling of a 3D C/C composite at the mesoscale (scale of the matrix blocks, yarns sections, interfaces) has been proposed and identified. The 3D computation of the behaviour at such a scale leads to computations of huge size. This work deals with a domain decomposition strategy in order to

(i) decrease the cost of an analysis and make it parallel

(ii) treat the interface specifically

We use the the LATIN method in its decomposition domain form. The goal is to extend to nonlinear substructures the method developed for dynamics in the case of nonlinearities concentrated at the interface.

### Mots-clefs :

**Choc; Composite; Sous-structuration**

### 1 Introduction

Ce travail est motivé par la simulation du comportement sous choc d'un composite 3D C/C. Il fait suite à un premier travail mené conjointement par le CE Gramat et le LMT Cachan, où une mésomodélisation du comportement du matériau avait été proposée et mise en oeuvre au moyen de simulations 1D 1/2 simplifiées (Allix *et al.* (1997), Héreil *et al.* (1997), Allix *et al.* (2001), Allix & Sen Gupta (2001)). Les difficultés liées à la simulation de la réponse de structures en 3D C/C sont liées à deux aspects principaux. Le premier est que le comportement des différents mésoconstituants (blocs de matrice, section de torons, interfaces) est fortement non-linéaire (plasticité, endommagement, compaction). Le second est que la modélisation à l'échelle méso en 3D impose de respecter par éléments finis la géométrie des mésoconstituants. cela conduit, même pour des structures simples, à des problèmes à très grands nombres de ddls (10.000 ddls

par  $mm^3$ ). Une voie naturelle pour traiter ces problèmes est d'utiliser une sous-structuration associée aux mésoconstituants permettant ainsi d'utiliser des ordinateurs à architecture parallèle. À Cachan, une approche de type sous-structuration applicable pour des comportements non-linéaires a été proposée par Ladevèze dans Ladevèze & Lorong (1992), Boucard *et al.* (1997) et Champaney *et al.* (1997) et mise en application en dynamique dans Lemoussu *et al.* (2000). Dans le cadre de la dynamique, la démarche a été appliquée dans le cas où les non-linéarités (contact, frottement...) pouvaient être modélisées au niveau des interfaces, le comportement des sous-structures étant alors linéaire. Cette démarche présente un grand intérêt pour le traitement de comportements non-linéaires d'interface et donc pour les composites. Un logiciel prototype CoFASt a été développé sur ce principe.

Dans ce travail, le logiciel est utilisé dans le paragraphe 3 pour estimer l'influence des frottements aux interfaces torons-matrice. Cependant, pour les matériaux et les essais considérés, les non-linéarités de volume sont également très importantes et ne peuvent être traitées dans ce cadre. Aussi, une extension simple de cette démarche aux sous-structures non-linéaires est proposée et testée sur un cas simple. L'objectif de cette extension est de modifier au minimum les étapes les plus coûteuses, c'est à dire l'étape d'équilibrage dynamique des sous-structures.

Dans une première partie, nous présenterons la méthode utilisée pour introduire le comportement non-linéaire des sous-structures, puis les résultats de premiers calculs 3D simulant un essai d'impact plaque/plaque sur une éprouvette de 3D C/C et enfin une première application de la méthode à l'endommagement.

## 2 La méthode Latin pour la sous-structuration

### 2.1 Séparation des difficultés

La première étape de la méthode consiste à définir deux entités différentes : les sous-structures et les interfaces. Sur la figure 1a, deux sous-structures ont été représentées ( $\Omega_E$  et  $\Omega_{E'}$ ) et une interface a été définie ( $\gamma_{EE'}$ ). Ces deux entités échangent des quantités définies sur l'interface : des forces et des vitesses, comme on peut le voir sur la figure 1b. Pour obtenir les vitesses et les forces issues de la sous-structure, un opérateur de projection sur le bord  $\gamma_{EE'}$ , noté  $\pi$ , est utilisé.

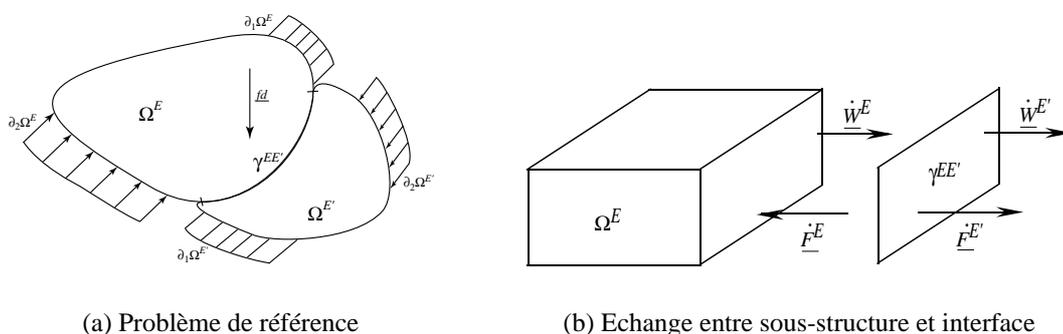


FIG. 1 – Référence et échange entre sous-structure et interface

Deux espaces de solutions sont définis :

- Le premier, noté  $Ad$ , est constitué des champs  $s = (V(M,t), \sigma(M,t))$  définis sur  $(\Omega_E \times$

- $[0, T]$ ) qui vérifient :
- l'équilibre de  $\Omega_E$  avec  $F_E$  et éventuellement  $f_d$ ;
  - les équations de liaison avec  $\dot{W}_E$ ;
  - les conditions initiales;
  - Le deuxième, noté  $\Gamma$ , est constitué des champs  $\hat{s} = (\hat{s}^1, \hat{s}^2)$  avec  $\hat{s}^1 = (\hat{W}_E(M, t), \hat{F}_E(M, t), \hat{W}_{E'}(M, t), \hat{F}_{E'}(M, t))$  définis sur  $\Gamma_{EE'} \times [0, T]$  et  $\hat{s}^2 = (\hat{V}(M, t), \hat{\sigma}(M, t))$  définis sur  $\Omega_E \times [0, T]$  tels que :
    - $\hat{s}^1$  vérifie la relation de comportement de l'interface  $\Gamma_{EE'}$ .
    - $\hat{s}^2$  vérifie la relation de comportement de  $\Omega_E$ ;

## 2.2 Algorithme itératif de résolution

La méthode consiste ensuite à chercher alternativement une solution dans  $Ad$  et dans  $\Gamma$ . On distingue donc deux étapes dans ce processus :

### – L'étape globale

À l'étape globale, une solution  $\hat{s}_{n-1/2}$  de  $\Gamma$  est connue. On cherche  $s_n$  dans  $Ad$  tel que  $(\pi s_n - \hat{s}_{n-1/2}^1, s_n - \hat{s}_{n-1/2}^2)$  soit dans un certain espace  $E^-$ . Ceci se traduit par :

$$F_n^E - \hat{F}_{n-1/2}^E = h^- \left( \dot{W}_n^E - \hat{W}_{n-1/2}^E \right) \quad (1)$$

$$\sigma_n^E - \hat{\sigma}_{n-1/2}^E = H^- \left( \varepsilon_n^E - \hat{\varepsilon}_{n-1/2}^E \right) \quad (2)$$

où  $h^-$  est un scalaire constant, paramètre de la méthode. Les différentes versions de la LATIN se distinguent dans la façon de passer de  $Ad$  à  $\Gamma$  et réciproquement : c'est ce que l'on appelle les directions de recherche. La version choisie ici est une extension simple de la version proposée dans Lemoussu *et al.* (2000). Elle consiste à utiliser comme direction de recherche  $H^-$ , dans les sous-structures, l'opérateur de Hooke initial. Associés à un schéma en temps de type Newmark ou HHT, les opérateurs de rigidité des sous-structures sont alors constants et peuvent être décomposés une seule fois à l'initialisation du calcul. Dans cette étape, on résout un problème global mais linéaire sur chaque sous-structure. L'influence des non-linéarités de structures est intégrée sous la forme de forces volumiques résiduelles qui sont nulles si le comportement volumique est respecté par  $s_{n-1}$ .

### – L'étape locale

À l'étape locale, une solution  $s_n$  de  $Ad$  est connue. On cherche  $\hat{s}_{n+1/2} = (\hat{s}_{n+1/2}^1, \hat{s}_{n+1/2}^2)$  dans  $\Gamma$  tel que  $(\hat{s}_{n+1/2}^1 - \pi s_n, \hat{s}_{n+1/2}^2 - s_n)$  soit dans un espace prédéfini  $E^+$ . Ceci se traduit par :

$$F_n^E - \hat{F}_{n+1/2}^E = h^+ \left( \dot{W}_n^E - \hat{W}_{n+1/2}^E \right) \quad (3)$$

$$\sigma_n^E - \hat{\sigma}_{n+1/2}^E = H^+ \left( \varepsilon_n^E - \hat{\varepsilon}_{n+1/2}^E \right) \quad (4)$$

où  $h^+$  est un scalaire constant, paramètre de la méthode.  $H^+$  a été choisie de telle sorte que  $\hat{\varepsilon}_{n+1/2}^E = \varepsilon_n^E$

### 3 Premiers calculs avec le logiciel CoFAST

Pour tester la viabilité de la méthode développée dans CoFAST pour le cas d'impact plaque / plaque sur 3D C/C, une simulation d'un essai d'impact normal a été effectuée pour des sous-structures linéaires. L'influence du frottement au niveau des interfaces toron/matrice est testée en appliquant à ces interfaces des comportements de type contact, contact avec frottement, élastique et interface parfaite. Dans le maillage de la figure 2, sont représentés de droite à gauche, l'impacteur, l'éprouvette constituée de deux torons et deux blocs de matrice équivalente, le buffer et la fenêtre. Les conditions latérales sont des conditions de symétrie pour représenter la périodicité du matériau dans les deux directions orthogonales à l'impact. À  $t = 0$ , l'impacteur entre en contact avec l'éprouvette avec une vitesse initiale  $V_0$ .

Expérimentalement, les mesures concernent les vitesses en face arrière du buffer, le signal étant très largement filtré par le comportement élasto-plastique de ce dernier. Il est donc essentiel de prendre en compte le comportement non-linéaire des sous-structures non seulement en raison du matériau 3D C/C mais également de la métrologie utilisée pour les essais.

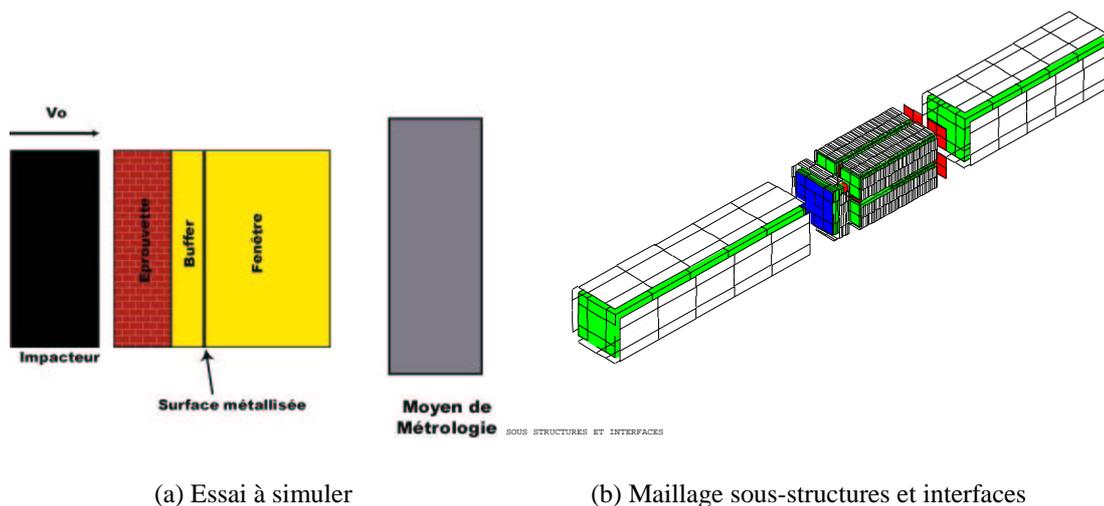


FIG. 2 – Essai et modélisation éléments finis

Comme on peut le voir dans la figure 3, dans le cas d'une interface parfaite, le signal en face arrière atteint plus tôt son niveau maximal puisque la matrice est entraînée par les torons. En fonction du niveau de cisaillement aux interfaces, le signal provenant des torons se distingue plus ou moins de celui provenant de la matrice.

### 4 Un premier exemple avec des sous-structures non-linéaires

Pour tester la faisabilité de la méthode et les problèmes posés par le comportement non-linéaire des sous-structures, le cas d'une barre en traction/compression endommageable, décomposée en deux sous-structures, a été traité. Cette barre est encastree à une extrémité et soumise à un effort dépendant du temps à l'autre extrémité (ici, un triangle), comme le montre la figure 4. Chaque structure est maillée avec 20 éléments. Dans ce cas, la loi de comportement

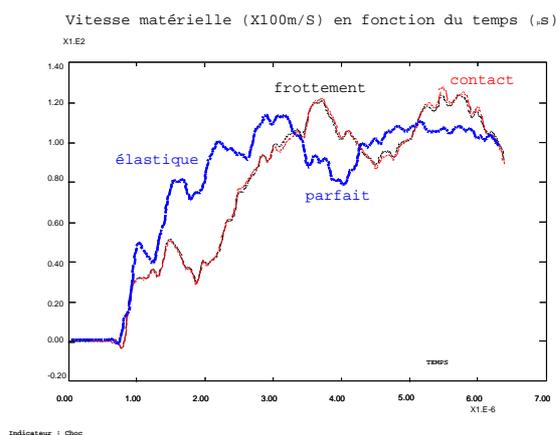


FIG. 3 – Résultats de calculs

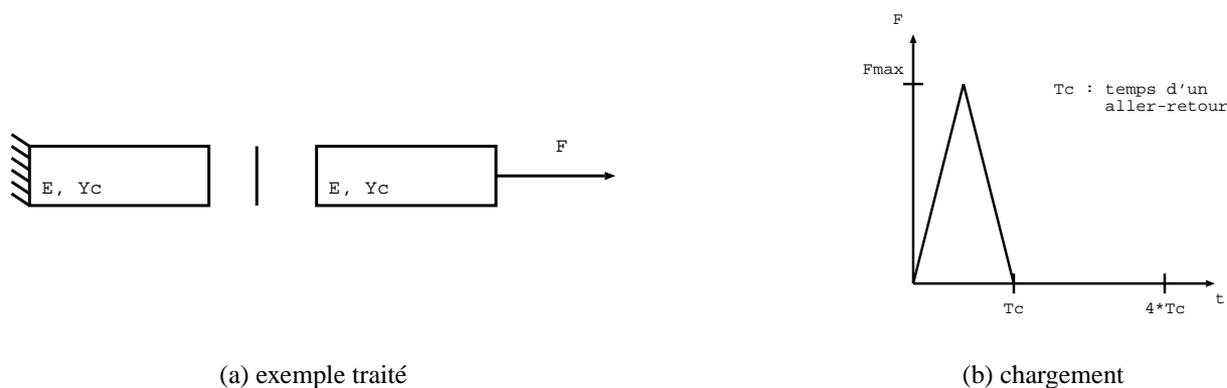
est définie par :

$$\rho\Psi = \frac{1}{2} \left[ \frac{\langle \sigma \rangle_-^2}{E} - \frac{\sigma \rangle_+^2}{E(1-d)} \right] \quad (5)$$

$$d = \left( \frac{Y}{Y_c} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$Y = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial \rho\Psi}{\partial d} \right]_{\sigma} d\Omega \quad (7)$$

Dans le cas présenté, la méthode a été initialisée par la solution obtenue avec le comportement des sous-structures élastiques. Les résultats sont montrés dans la figure 5. Le nombre d'itérations nécessaires à la convergence est de 120 (en prenant en compte le calcul nécessaire à l'initialisation).



(a) exemple traité

(b) chargement

FIG. 4 – Exemple numérique traité par la méthode

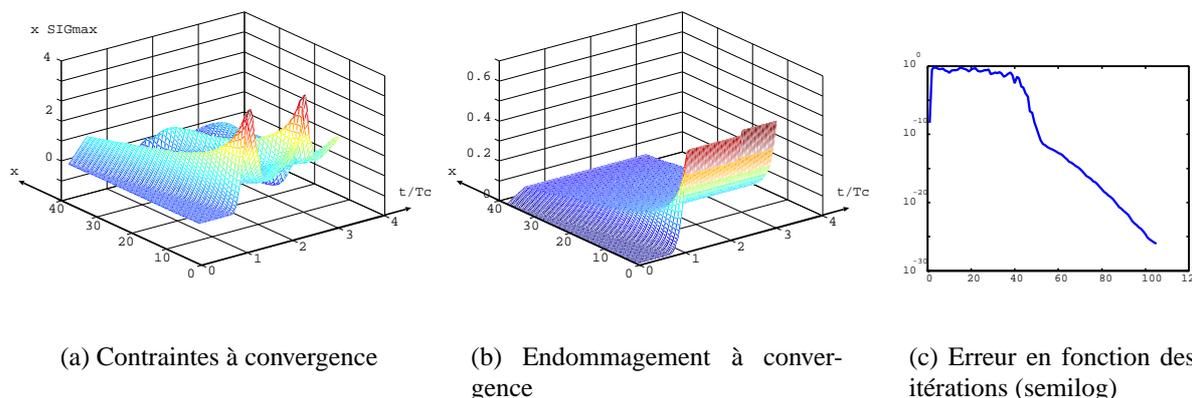


FIG. 5 – Résultats et courbe d'erreur

## 5 Conclusions

Le problème abordé dans ce premier travail est le développement d'une méthodologie de calcul adapté à une description à une échelle méso d'un 3D C/C en dynamique. La solution étudiée est basée sur une sous-structuration physique à l'échelle méso intégrant le comportement non-linéaire des sous-structures et des interfaces. D'un point de vue numérique, on cherche à améliorer la vitesse de convergence de la méthode proposée dans le cas de l'endommagement. Par la suite, une extension du cas 1D au 3D devra être menée.

## Références

- O. Allix, J. Sen Gupta 2001 Composite Damage Mesomodel for impact problems : Application to 3D C/C Material, *keynotes of ECCM-2001, Cracovia, Poland (2001)*.
- O. Allix, M. Dommanget, M. Gratton, P.L. Héreil 2001 A multi-scale approach for the response of a 3D Carbon/Carbon Composite under shock loading, *Composite Science and Technology*, **61**, 409–415.
- O. Allix, P.L. Héreil, M. Gratton 1997 Comportement dynamique d'un composite 3D C/C: méso-modélisation et prévision de la rupture sous choc. *3e Colloque National en Calcul des Structures*, Giens (France), Presses Académiques de l'Ouest.
- P.-A. Boucard, L. Champaney, P. Ladevèze and H. Lemoussu 1997 Une approche pour le calcul de choc avec contact unilatéral *13e Congrès Français de Mécanique Poitiers (France)*, AUM.
- L. Champaney, J.-Y. Cognard, D. Dureisseix and P. Ladevèze 1997 Large scale applications on parallel computers of a mixed domain decomposition method *Computational Mechanics* **19(4)**, 253–263.
- J.P. Dumont, P. Ladevèze, M. Poss, Y. Rémond 1987 Damage mechanics for 3D composites, *Int. J. Composites II*, **8**, 119–141.
- P.L. Héreil, O. Allix, M. Gratton 1997 Shock behavior of 3D carbon/carbon composite, *J. de Physique IV, Colloque C3*, **7**, 529–534.
- P. Ladevèze 1992 A damage computational method for composite structures, *Computers and Structures* **44**, 79–87.
- P. Ladevèze, Ph. Lorong 1992 A large time increment approach with domain decomposition technique for mechanical non linear problems *Computing Methods in Applied Sciences and Engineering INRIA* 569–578.
- P. Ladevèze, H. Lemoussu, P.A. Boucard 2000 A modular approach to 3D impact computation with frictional contact, *Computers & Structures* **78**, 45–52.