



**HAL**  
open science

# Endommagement des composites par méthodes non-locales ou champ de phase : méthodes numériques HPC

Johann Rannou, Frederic Laurin, Christophe Bovet, Jeremy Germain, Salim Chaibi

## ► To cite this version:

Johann Rannou, Frederic Laurin, Christophe Bovet, Jeremy Germain, Salim Chaibi. Endommagement des composites par méthodes non-locales ou champ de phase : méthodes numériques HPC. AMAC 2024, Apr 2024, Toulouse, France. hal-04563007

**HAL Id: hal-04563007**

**<https://hal.science/hal-04563007>**

Submitted on 29 Apr 2024

**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.

# Endommagement des composites par méthodes non-locales ou champ de phase : méthodes numériques HPC

## *Non-local damage or phase field models in composites : numerical methods for high performance computing*

Johann Rannou<sup>1</sup>, Frédéric Laurin<sup>1</sup>, Christophe Bove<sup>1</sup>, Jérémy Germain<sup>2</sup> et Salim Chaibi<sup>3</sup>

1 : DMAS  
ONERA, Université Paris-Saclay  
92320, Châtillon, France  
e-mail : johann.rannou@onera.fr

2 : DMAS  
ONERA  
59000, Lille, France

3 : Saint-Gobain Research Provence  
Cavaillon, France

### Résumé

Nous présentons ici des méthodes numériques mises en œuvre pour traiter dans le code Z-set des modèles d'endommagement à gradient (endommagement non-local ou champ de phase). Il s'agit en particulier de montrer comment une résolution en dynamique implicite permettant de gérer les instabilités structurales s'insère dans un schéma de résolution alternée. On verra également les contraintes que cela impose lorsque l'on cherche à exploiter des solveurs à décomposition de domaines dans un cadre HPC. Nous illustrerons cela au travers d'applications à la rupture de structures composites.

### Abstract

We present numerical methods implemented to process gradient damage models (non-local damage or phase field) in the Z-set code. In particular, the aim is to show how an implicit dynamics resolution that allows structural instabilities to be managed fits into a staggered resolution scheme. We will also see the constraints that this imposes when we seek to exploit domain decomposition solvers in an HPC framework. We will illustrate this with applications to the fracture of composite structures.

**Mots Clés :** endommagement à gradient, champ de phase, transition endommagement-rupture

**Keywords :** gradient damage models, phase field fracture, damage-fracture transition

## 1. Introduction

Les pratiques de dimensionnement en bureaux d'études chez les industriels se basent essentiellement sur des critères métiers élaborés par des campagnes d'essais massives et coûteuses. En phase amont, et pour les matériaux composites en particulier, la simulation numérique de la rupture d'éprouvettes de qualification doit permettre de rationaliser et d'appuyer ces campagnes expérimentales. À cette fin, la maîtrise de la transition endommagement-rupture apparaît essentielle, bien que ce ne soit pas un problème encore parfaitement maîtrisé. Une des difficultés majeure réside dans le fait que les lois d'endommagement sont fondamentalement des lois de comportement qui se caractérisent sur des zones homogénéisables pour vérifier les hypothèses d'un volume élémentaire représentatif (VER). La propagation de fissures au contraire relève de l'analyse de structure et introduit des concepts comme le taux de restitution de l'énergie ou les facteurs d'intensité des contraintes. Si une macro-fissure traverse un VER, ce dernier perd ses propriétés de représentativité. La différence de conceptualisation entre endommagement et rupture se traduit également par les quantités utilisées pour évaluer la dissipation d'énergie : une dissipation volumique pour l'endommagement, une dissipation surfacique en mécanique de la rupture. Les modèles d'endommagement "adouçissants" ont vocation à réaliser

cette transition. La différence intrinsèque entre endommagement et rupture conduit cependant aux difficultés de la perte d'ellipticité des équations [1] qui ont été traitées de différentes manières par des techniques de régularisation telles que le viscodommage [2], les méthodes non-locales [3] et non-locales à gradient [4, 5], et plus récemment l'approche *phase field fracture* [6] qui s'appuie sur l'approche variationnelle de la mécanique de la rupture [7]. Ces approches d'endommagement non-locale et de *phase field fracture*, bien qu'ayant été introduites pour des raisons très différentes présentent un formalisme mathématique très semblable et nécessitent toutes d'introduire la notion de longueur interne. C'est cette longueur interne qui réconcilie les notions de densité d'énergie dissipée volumique ou surfacique. Il a été mis en évidence dans des travaux récents sur des matériaux composites tissés [8] que cette même longueur interne joue un rôle dans l'analyse des règles de similitude telles que décrites par Bažant [9].

Cependant, la mise en œuvre numérique des modèles à gradient et *phase-field* demeure difficile car elle nécessite de résoudre simultanément l'équation d'équilibre et une équation de Helmholtz qui contient le paramètre de longueur et dont l'inconnue est l'endommagement. Dans certaines circonstances, la longueur interne est relativement faible et conduit à des maillages comportant un très grand nombre d'éléments conduisant à des coûts de calcul très importants. Un autre élément qui peut augmenter considérablement le coût du calcul est le caractère potentiellement instable du problème de rupture. Différentes approches sont alors possibles, la plus rapide à mettre en œuvre consiste à introduire une forme de viscosité "numérique" dans le modèle, mais l'identification des paramètres peut-être délicate et très dépendante du taux de chargement global de la structure. Une autre approche consiste à exploiter un solveur à longueur d'arc, mais l'introduction de viscosité dans les modèles de comportement s'en retrouve prohibée. Une dernière approche, qui est retenue dans ce travail, consiste à traiter le problème en dynamique en bénéficiant du rôle stabilisant de l'inertie. Ceci se fait cependant au détriment du coût de calcul.

Nous proposons dans cet exposé de présenter la technique de résolution de modèles à gradient développée dans le code Z-set codéveloppé par l'École des Mines de Paris et l'ONERA [10]. Nous insisterons sur le caractère relativement peu intrusif de la mise en œuvre dans un cadre de résolution en dynamique implicite grâce à l'interface Python de Z-set. Nous détaillerons également l'exploitation de ce solveur dans un cadre de parallélisation massive par décomposition de domaines qui permet de palier la difficulté du coût de calcul *a priori* important. Nous donnerons par ailleurs un certain nombre d'exemples de simulation de dégradation de structures composites réalisées dans ce contexte.

## 2. Solveur alterné, dynamique implicite et parallélisation

Le solveur se base sur le schéma alterné tel qu'initialement proposé en *phase-field fracture* par Bourdin *et al.* [11]. Il consiste à résoudre alternativement l'équation d'équilibre à endommagement fixé (terme  $\phi$ ), puis à résoudre l'équation "non-locale" ou *phase field*, généralement linéaire, à champ de densité d'énergie élastique fixée (terme  $\Psi_0^+$ ) jusqu'à atteindre un critère de stagnation (voir Figure 1). Le problème d'équilibre peut être linéaire ou non-linéaire, auquel cas une résolution classique par un schéma de Newton-Raphson est réalisée. On verra dans les applications qu'il est ainsi possible d'introduire des ingrédients non-linéaires tels que des modèles de zone cohésive pour modéliser le délaminage en plus de l'endommagement volumique dans le pli.

La figure 2 illustre le caractère instable de la rupture. Un solveur à longueur d'arc permettrait de capturer la solution quasi-statique présentant un snap-back (réponse orange). En raison du comportement viscoélastique des composites carbone/epoxy et pour les raisons évoquées plus haut, nous résolvons ici le problème en dynamique implicite. Une adaptation du pas de temps automatique permet d'atteindre l'échelle à laquelle la pente *a priori* verticale de la réponse force-déplacement qui poserait problème

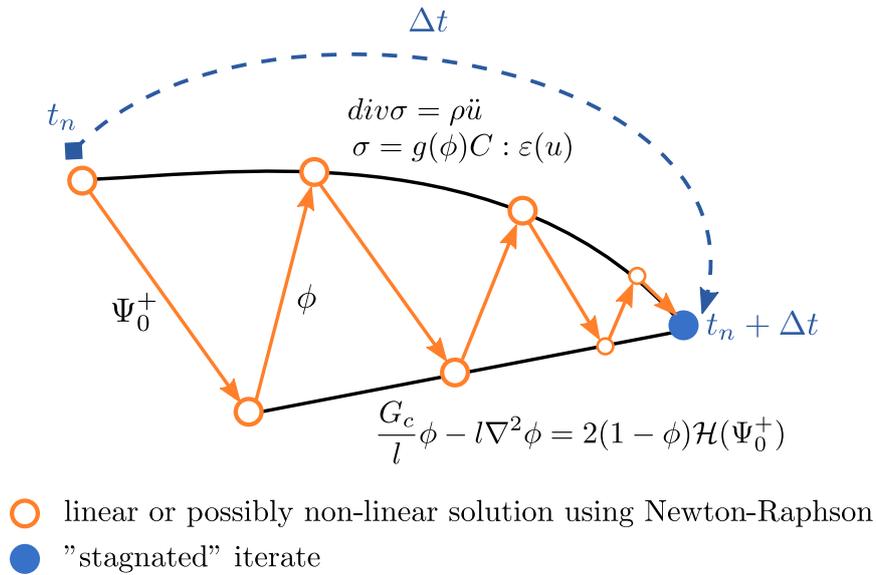


FIG. 1. Itérations successive du schéma alterné au cours d'un incrément de chargement [12].

à un solveur statique retrouve une valeur finie.

On résout l'ensemble avec une technique de parallélisation massive par décomposition de domaines (DD). Nous discuterons des conséquences de la transition "quasi-statique" – "dynamique rapide" sur le choix des types de solveurs DD.

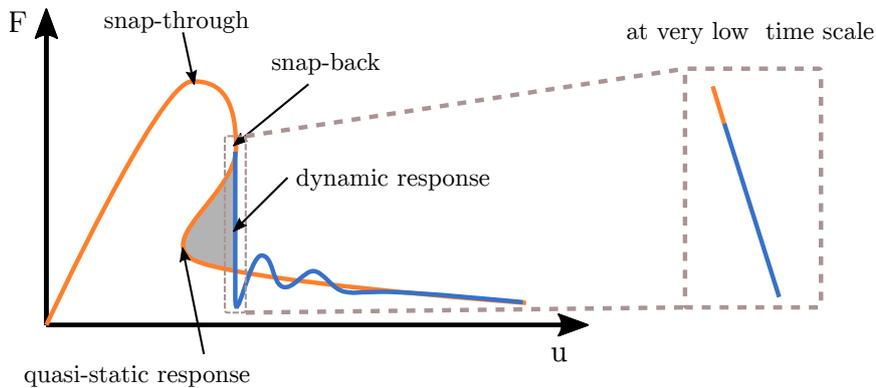


FIG. 2. Instabilité dynamique et rôle de l'inertie.[12]

### 3. Quelques applications

Nous montrerons quelques applications à la transition endommagement/rupture à différentes échelles. Par exemple, la Figure 3 illustre la simulation de la rupture d'une plaque trouée stratifiée de plis UD. On utilise conjointement i) un modèle de zone cohésive pour simuler le délaminage, ii) un modèle d'endommagement saturant (non-adoucissant) pour simuler l'évolution et l'effet de la fissuration transverse et iii) un modèle *phase field fracture* pour représenter la rupture fibre.

On insistera sur le modèle à proprement parlé, mais aussi sur les aspects numériques et les paramètres influents sur le coût de calcul : convergence du solveur alterné, paramétrage du raffinement en temps automatique, choix du solveur de décomposition de domaine adapté.

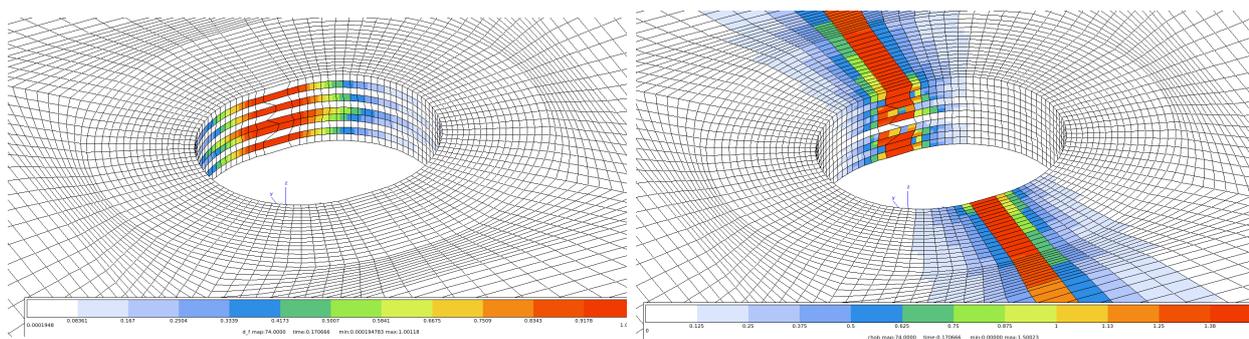


FIG. 3. Traction sur une plaque trouée d'UD  $[0/-45/0/45/0/90/45/0/-45/0]_s$ . Endommagement matriciel (saturant) à gauche et rupture fibre (phase field) à droite [13].

## Références

- [1] Jean-François Deü. *Rupture des composites stratifiés sous chargement dynamique : apport des méso-modèles avec endommagement retardé*. PhD thesis, ENS Cachan / LMT, 1997.
- [2] O. Allix and J-F Deü. Delayed-damage modelling for fracture prediction of laminated composites under dynamic loading. *Engineering Transactions/Rozprawy Inzynierskie*, 45(1) :29–46, 1997.
- [3] G. Pijaudier-Cabot and Z. Bažant. Nonlocal damage theory. *Journal of Engineering Mechanics*, 113 :1512–1533, 1987.
- [4] R. Peerlings, R. De Borst, W. Brekelmans, J. De Vree, and I. Spee. Some observations on localisation in non-local and gradient damage model. *International Journal of Mechanics and Solids*, 1996.
- [5] Eric Lorentz and S Andrieux. Analysis of non-local models through energetic formulations. *International Journal of Solids and Structures*, 40(12) :2905–2936, 2003.
- [6] C Miehe, F Welschinger, and M Hofacker. Thermodynamically consistent phase-field models of fracture : Variational principles and multi-field fe implementations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 83(10) :1273–1311, 2010.
- [7] Gilles A Francfort and J-J Marigo. Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46(8) :1319–1342, 1998.
- [8] Victor Médeau. *Rupture des composites tissés 3D : de la caractérisation expérimentale à la simulation robuste des effets d'échelle*. PhD thesis, 2019.
- [9] Zdenek P Bažant. Scaling laws in mechanics of failure. *Journal of Engineering Mechanics*, 119(9) :1828–1844, 1993.
- [10] Z-set, material and structure analysis suite, <http://www.zset-software.com>.
- [11] B. Bourdin, G.A. Francfort, and J-J. Marigo. Numerical experiments in revisited brittle fracture. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(4) :797 – 826, 2000.
- [12] Johann Rannou and Christophe Bovet. Domain decomposition methods and acceleration techniques for the phase field fracture staggered solver. working paper or preprint, January 2023.
- [13] Jérémy Germain. *Évaluation des capacités prédictives et de la robustesse de modèles à bases physiques pour la prévision de la tenue des structures composites présentant des singularités géométriques*. PhD thesis, 2020.