



**HAL**  
open science

## **Fissuration dynamique des composites à matrice métallique. Application au Zircaloy hydruré**

Frédéric Perales, Yann Monerie, Frédéric Dubois, Laurent Stainier

► **To cite this version:**

Frédéric Perales, Yann Monerie, Frédéric Dubois, Laurent Stainier. Fissuration dynamique des composites à matrice métallique. Application au Zircaloy hydruré. 17ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-00580800

**HAL Id: hal-00580800**

**<https://hal.science/hal-00580800>**

Submitted on 29 Nov 2016

**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.

# Fissuration dynamique des composites à matrice métallique. Application au Zircaloy hydruré.

Frédéric Perales<sup>1</sup>, Yann Monerie<sup>1</sup>, Frédéric Dubois<sup>2</sup> & Laurent Stainier<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)  
DPAM/SEMCA/LEC - BP3 - 13115 St Paul-Lez-Durance cedex  
frederic.perales@irsn.fr

<sup>2</sup> Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC)  
CC048, Place E. Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5

<sup>3</sup> Département AéroSpatiale, Mécanique et Matériaux (ASMA)  
1 ch. des chevreuils, 4000 Liège, Belgique

## Résumé :

*Nous présentons dans ce papier une nouvelle approche pour l'étude de la fissuration dynamique de matériaux hétérogènes. Cette approche est basée sur la notion de Zone Cohésive et sur la méthode Non-Smooth Contact Dynamics. La plateforme numérique associée (conception orientée objet) permet des simulations tridimensionnelles en grandes déformations de la fissuration dynamique de matériaux multiphasiques ou à gradient de propriétés, depuis l'initiation de la fissuration jusqu'à la ruine du matériau. Un exemple de fissuration de composite à matrice métallique de l'industrie nucléaire, le Zircaloy-4 hydruré, est présenté.*

## Abstract :

*This paper deals with a new approach for the simulation of dynamic fracture in heterogenous materials. This approach is based on the coupling between the Cohesive Zone Model concept and the Non-Smooth Contact Dynamics method. The associated software (with Object Oriented Programming) allows to simulate, in 3D and large deformations, the dynamic fracture of both multiphase and functionally graded materials from the onset of fracture to post-fracture behavior. An exemple of the fracture of a metal matrix composite from the nuclear industry, the hydrided Zircaloy-4, is presented.*

## Mots-clefs :

**Fissuration, dynamique non régulière, Matériaux hétérogènes, Simulation numérique, Modèles de Zone Cohésive**

## 1 Introduction

Ce papier traite de la fissuration dynamique de composites à matrice métallique au travers d'une approche micromécanique basée sur les Modèles de Zone Cohésive Frottant (MZCF) développée dans le cadre des recherches de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire relatives à la sûreté des réacteurs à eau sous pression. Les MZCF permettent notamment de décrire la physique de fissuration dans une zone en pointe de fissure et d'envisager des processus de fissuration complexes (incluant le couplage d'un endommagement surfacique et de condition de contact frottant) par la donnée d'une équation constitutive reliant la contrainte appliquée sur les lèvres de la fissure au saut de déplacement. Les conditions de contact et de frottement conduisent à une dynamique non régulière traitée par la méthode Non-Smooth Contact Dynamics (NSCD). Cette méthode, initialement développée par Moreau [1] et Jean [2], est dédiée à la résolution de problèmes relatifs aux systèmes dynamiques en présence de contraintes unilatérales sans l'utilisation de techniques de régularisation ou de pénalisation. Des modifica-

tions mineures de cette méthode permettent une prise en compte de MZCF tridimensionnelles en présence de contact unilatéral [3]. La plateforme développée est composée de trois librairies LMGC90, MATLIB et PELICANS dédiées respectivement aux comportements surfaciques (MZCF), modèles constitutifs volumiques et méthode des Eléments Finis. Un exemple d'application de cette plateforme est illustré par la fissuration dynamique d'un matériau hétérogène à matrice métallique : le Zircaloy-4 hydruré.

## 2 Modèle de Zone Cohésive Frottant

Le Modèle de Zone Cohésive Frottant utilisé s'inspire de la loi cohésive de Raous, Cangemi, Cocu et Monerie [4][5]. Pour cela, une force de résistance à la séparation normale et tangente, notée  $R^{\text{adh}}$ , est introduite dans le problème de Signorini-Coulomb (Eqs (1)-(2)).

*Contact unilatéral avec adhésion*

$$0 \leq (R_N + R_N^{\text{adh}}) \perp u_N \geq 0 \quad (1)$$

*Frottement de Coulomb avec adhésion*

$$\begin{cases} \| R_T + R_T^{\text{adh}} \| < \mu |R_N + R_N^{\text{adh}}| \Rightarrow \dot{u}_T = 0 \\ \| R_T + R_T^{\text{adh}} \| = \mu |R_N + R_N^{\text{adh}}| \Rightarrow \exists \lambda \geq 0 \text{ tel que } \dot{u}_T = -\lambda (R_T + R_T^{\text{adh}}) \end{cases} \quad (2)$$

où les indices  $N$  et  $T$  désignent les composantes normale et tangentielle de la force totale ( $R = R_N n + R_T$ ), de la force adhésive ( $R^{\text{adh}} = R_N^{\text{adh}} n + R_T^{\text{adh}}$ ) et du saut de déplacement ( $[u] = u_N n + u_T$ ),  $n$  étant la normale unitaire sortante. Le coefficient de frottement de Coulomb est noté  $\mu$ .

Dans la suite, nous utilisons une variante de la loi d'endommagement surfacique de Michel, Suquet et Thébaud [6] (pour la présente écriture voir Monerie et al. [7]) où  $\beta$  est une variable décrivant le degré d'endommagement surfacique ( $\beta = 1$  : la zone cohésive est parfaite,  $0 < \beta < 1$  : la zone cohésive est partiellement endommagée et  $\beta = 0$  : la zone cohésive est rompue). La loi est décrite par les Eqs (3)-(5).

*Force adhésive*

$$\begin{cases} R_N^{\text{adh}} = \beta C_N u_N & \text{si } \beta > 0 \text{ ou } u_N = 0 \\ R_N^{\text{adh}} = -p & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

$$R_T^{\text{adh}} = \beta C_T u_T \quad (4)$$

*Evolution de l'intensité d'adhésion*

$$\begin{cases} \beta = \beta_0 & \text{si } \| [u] \| < \delta_0 \\ \beta = \beta_0 \frac{\delta_c - \| [u] \|}{\delta_c - 2\delta_0 + \| [u] \|} & \text{si } \delta_0 \leq \| [u] \| \leq \delta_c \\ \beta = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5)$$

avec :  $\delta_0 = \sqrt{\frac{w}{(9 - 4 \ln 4) \left( \frac{1}{C_N} + \frac{1}{C_T} \right)}}$ ,  $\delta_c = 3\delta_0$ ,  $C_N$  et  $C_T$  sont des raideurs (en  $MPa/m$ ),  $p$  est la pression interne post décohésion (en  $Pa$ ),  $0 \leq \beta_0 \leq 1$  un niveau d'endommagement surfacique initial et  $w$  une énergie de référence (en  $J/m^2$ ). Dans la suite, les paramètres  $p = 0$  et  $\beta_0 = 1$  sont retenus.

En deux dimensions, pour  $C_N = C_T$ , la Figure 1 représente le comportement normal (avec  $u_T = 0$ ) et tangential (avec  $R_N$  constant et  $u_N = 0$ ).

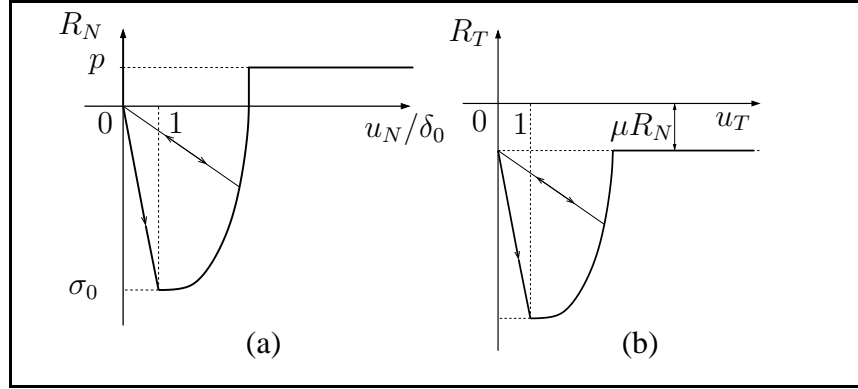


FIG. 1 – Loi cohésive en 2D : (a) comportement normal ( $u_T = 0$ ) (b) comportement tangent ( $R_N$  constant et  $u_N = 0$ ).

### 3 Non-Smooth Contact Dynamics

Le problème dynamique est composé des équations (1) et (2) et de la discrétisation spatiale de l'équation de la dynamique :

$$M\ddot{q} = F(q, \dot{q}, t) + r \quad (6)$$

où  $q$ ,  $\dot{q}$  et  $\ddot{q}$  sont respectivement les vecteurs déplacement, vitesse et accélération discrets,  $M$  est la matrice de masse,  $F(q, \dot{q}, t)$  représente les forces intérieures et extérieures et  $r$  les forces de contact. Cette équation est traitée dans le cadre de la méthode NSCD (Jean [2]) et du cadre fonctionnel proposé par Moreau [1].

#### Discrétisation en temps

La non régularité du problème impose l'utilisation d'un formalisme adapté pour résoudre l'équation (6) et le choix d'un intégrateur temporel pour écrire l'évolution des variables cinématiques. Le schéma d'intégration retenu est une  $\theta$ -méthode :

$$\begin{cases} M_{i+1}(\dot{q}_{i+1} - \dot{q}_i) = h[(1 - \theta)F_i + \theta F_{i+1}] + hr_{i+1} \\ q_{i+1} = q_i + h[(1 - \theta)\dot{q}_i + \theta\dot{q}_{i+1}] \end{cases} \quad (7)$$

où les indices  $i$  et  $(i + 1)$  désignent respectivement les quantités au temps  $t_i$  et  $t_{i+1}$ ,  $h$  est la longueur de l'intervalle  $]t_i, t_{i+1}]$  et  $hr_{i+1}$  est la valeur moyenne de l'impulsion.

Les inconnues du problèmes sont les valeurs discrètes de la vitesse  $\dot{q}_{i+1}$  et de l'impulsion  $hr_{i+1}$ . Le système non-linéaire (7) est résolu par une méthode de Newton-Raphson :

$$\begin{cases} \dot{q}_{i+1}^{k+1} = \dot{q}_{i+1}^k + \Delta\dot{q}_{\text{lib}} + hw^k r_{i+1}^{k+1} \\ \Delta\dot{q}_{\text{lib}} = w_{i+1}^k \{-M_{i+1}^k(\dot{q}_{i+1}^k - \dot{q}_i) + h[(1 - \theta)F_i + \theta F_{i+1}^k] + hr_{i+1}^k\} \end{cases} \quad (8)$$

où  $k$  est le numéro d'itération et  $w_{i+1}^k$  est l'inverse de la matrice des itérations.

#### NSCD et MZCF

En liant la vitesse globale  $\dot{q}$  et l'impulsion  $hr$  à leurs valeurs locales  $U$  et  $R$  à l'aide d'une application linéaire, et en utilisant un changement de variable introduit par Monerie et Acary [3], le système tridimensionnel pour chaque contact  $\alpha$  s'écrit :

$$\begin{cases} U^\alpha - U_{\text{loclib}}^\alpha + W^{\alpha\alpha}h(R + R^{\text{adh}})^\alpha = 0 \\ R_N^\alpha - \text{proj}_{\mathbb{R}^+}(R_N^\alpha - \rho U_N^\alpha) = 0 \\ R_T^\alpha - \text{proj}_{D(\mu|R_N^\alpha|)}(R_T^\alpha - \rho U_T^\alpha) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

où  $\rho > 0$  et  $D(\mu|R_N^\alpha|)$  est le disque de centre 0 et de rayon  $\mu|R_N^\alpha|$  et  $U_{loclib}^\alpha$  est la vitesse au contact  $\alpha$  sans réaction adhésive. Le système (9) peut être réécrit sous la forme d'une fonctionnelle  $\phi$  :

$$\phi(U^\alpha, R^\alpha) = 0 \quad (10)$$

L'équation (10) est résolue par la méthode de Newton généralisé de Alart et Curnier [8].

#### 4 Plateforme numérique

L'outil numérique développé s'appuie sur une conception orientée objet et est obtenu par le couplage encapsulé de trois bibliothèques LMGC90 > PELICANS > MATLIB :

- **LMGC90** est une bibliothèque dédiée aux problèmes de comportements surfaciques. Elle est basée sur la méthode NSCD et développée, en Fortran90, par Dubois et Jean [9].
- **MATLIB** est une bibliothèque C++ de modèles constitutifs développée par Stainier [10]. Cette bibliothèque est basée sur un formalisme variationnel de la viscoplasticité incrémentale adaptée à une structure orientée objet [11] ;
- **PELICANS** est une bibliothèque C++ Eléments Finis développée à l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire [12].

L'idée est d'implémenter un modèle de zone cohésive entre chaque maille.

Le logiciel permet de simuler, en 3D et en grandes déformations, l'initiation (sans critère *ad hoc*) et la propagation de fissures dans des matériaux hétérogènes.

#### 5 Fissuration dynamique dans un volume élémentaire de Zircloy-4 hydruré

Après plusieurs cycles en réacteur, sous les effets de l'irradiation et de l'hydruration, la gaine des combustibles nucléaires correspond à un biphasé constitué d'une matrice métallique de Zircaloy contenant des inclusions d'hydrures dont la teneur varie graduellement dans l'espace.

L'exemple qui suit consiste à étudier l'influence de l'adhérence entre les deux phases sur la fissuration de la structure. Pour cela, nous considérons un volume élémentaire de Zircaloy-4 hydruré représentant une partie d'une gaine de combustible. Les inclusions d'hydrures sont rectangulaires, orientées horizontalement et distribuées aléatoirement (fraction volumique de 20%). La matrice élastoplastique ( $E = 98 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.325$ , limite élastique =  $850 \text{ MPa}$ , plasticité  $J_2$ ) avec écrouissage isotrope linéaire (module  $200 \text{ MPa}$ ) et les hydrures de type Néo Hookéens ( $E = 135 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.32$ ). Nous considérons deux types d'interface matrice-hydrure : une interface forte ( $w^i/w^h \simeq 10^5$ ) et une interface faible ( $w^i/w^h \simeq 10^{-4}$ ).  $w^i$  et  $w^h$  désignent respectivement l'énergie de décohésion de l'interface matrice-hydrure et matrice-matrice. Les données interfaciales sont résumées dans le Tableau 1. Nous supposons qu'il y a peu de frottement  $\mu = 0.05$ . Nous imposons les vitesses sur les faces horizontales :  $V = 2 \text{ m/s}$  et  $V = -2 \text{ m/s}$  respectivement sur les faces horizontales droite et gauche.

	Matrice-Matrice	Matrice-Hydrure (forte)	Matrice-Hydrure (faible)	Hydrure-Hydrure
$c_N = c_T$	$10^{13}$	$1.5 \times 10^{13}$	$1.5 \times 10^{13}$	$1.5 \times 10^{13}$
$w \text{ (J/m}^2\text{)}$	$8.1 \times 10^4$	$5.52 \times 10^9$	5.52	$5.046 \times 10^4$

TAB. 1 – Paramètres utilisés dans le MZCF.

### Interface forte

Lorsque la résistance interfaciale entre la matrice et les hydrures est forte, la fissure se propage dans les hydrures, ces derniers jouant ainsi un rôle fragilisant (voir figure 2).

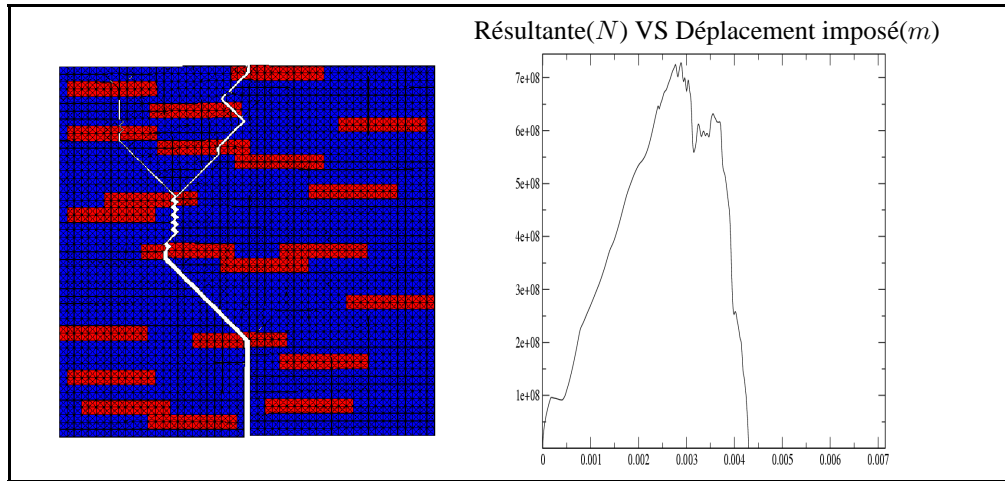


FIG. 2 – Interface matrice inclusion “forte”.

### Interface faible

Lorsque la résistance interfaciale entre la matrice et les hydrures est faible, la fissure contourne les hydrures (voir figure 3) induisant une multifissuration du matériau. Dans ce cas, le déplacement à rupture est plus élevé que dans le cas d’une liaison interfaciale forte (voir la courbe résultante/déplacement dans les figures 2 et 3).

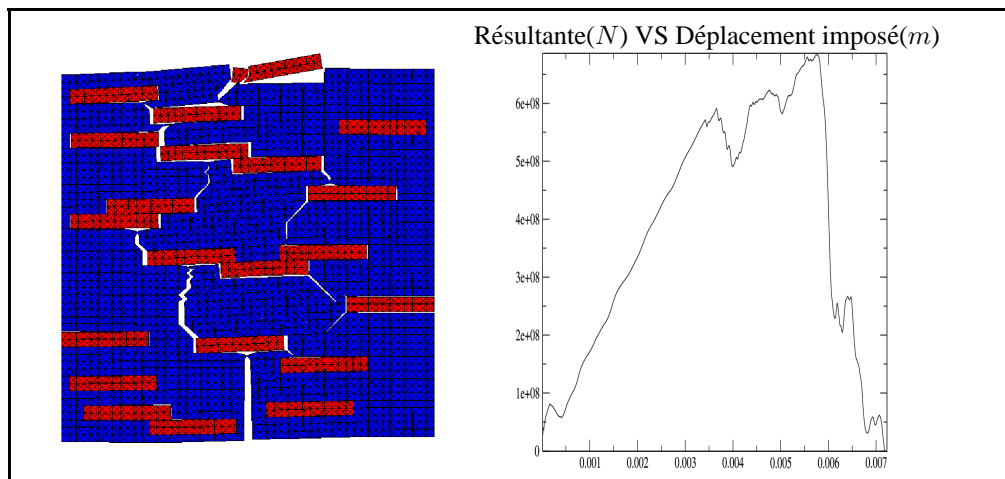


FIG. 3 – Interface matrice inclusion “faible”.

## 6 Conclusions

Ce papier a présenté une méthode pour l’analyse de la fissuration dynamique de matériaux hétérogènes en utilisant les Modèles de Zone Cohésive Frottant (MZCF). Ces modèles permettent de simuler l’initiation de fissure jusqu’à la ruine du matériau. L’évolution dynamique en présence de contraintes unilatérales a été traitée grâce à la méthode Non-Smooth Contact Dynamics (NSCD). Un logiciel, obtenu par le couplage de trois bibliothèques, a été développé. Un exemple d’application du logiciel a permis de mettre en évidence, au travers de simulations

numériques de la fissuration dynamique d'un volume élémentaire de Zircaloy-4 hydruré, l'importance de l'adhérence entre chaque phase d'un matériau composite.

## Références

- [1] J.-J. Moreau. Unilateral contact and dry friction in finite freedom dynamics. In J.-J. Moreau and P.D. Panagiotopoulos, editors, *Non Smooth Mechanics and Applications*, volume 302 of *CISM - Courses and Lectures*, pages 1–82, Vienna, 1988. Springer.
- [2] M. Jean. The non-smooth contact dynamics method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 177 :235–257, 1999.
- [3] Y. Monerie and V. Acary. Formulation dynamique d'un modèle de zone cohésive tridimensionnel couplant endommagement et frottement. *Revue Européenne des Elements Finis*, 10 :489–503, 2001.
- [4] M. Raous, L. Cangémi, and M. Cocu. A consistent model coupling adhesion, friction and unilateral contact. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 177(3–4) :383–399, 1999.
- [5] M. Raous and Y. Monerie. Unilateral contact, friction and adhesion : 3D crack in composite material. In J.A.C Martins and Monteiro Marques M.D.P, editors, *3d Contact Mechanics International Symposium*, Collection Solid Mechanics and its Applications, pages 333–346. Kluwer, Peniche (Portugal), 17-21 june 2002.
- [6] J.-C. Michel, P. Suquet, and F. Thébaud. Une modélisation du rôle des interfaces dans le comportement des composites à matrice métallique. *Revue Européenne des Elements Finis*, 3, 1994.
- [7] Y. Monerie, M. Raous, F.H. Leroy, O. Sudre, F. Feyel, and J.L. Chaboche. Comparaison de lois d'interface fibre/matrice sur la base d'un modèle uniaxial d'expérience de micro-indentation. In J. Lamon and D. Baptiste, editors, *Comptes Rendus des Onzièmes Journées Nationales sur les Composites*, volume II, pages 565–574, Arcachon, 18-20 Novembre 1998. AMAC.
- [8] P. Alart and A. Curnier. A generalized newton method for contact problems with friction. *Journal de Mécanique Théorique et Appliquée*, 7 :67–82, 1988.
- [9] F. Dubois and M. Jean. Une plateforme de développement dédiée à la modélisation des problèmes d'interaction. In *Actes du sixième colloque national en calcul de structures - CSMA-AFM-LMS*, volume 1, pages 111–118, Giens, 2003.
- [10] L. Stainier, F. Dubois, and R. Peyroux. MatLib, une bibliothèque portable de modèles constitutifs pour la mécanique non-linéaire des solides : concepts et implémentation. In *6ème Colloque National en Calcul des Structures*, 2003.
- [11] M. Ortiz and L. Stainier. The variational formulation of viscoplastic constitutive updates. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 171 :419–444, 1999.
- [12] B. Piar, L. Chailan, and D. Vola. Scientific software architectures designed to survive change. In *Trend in Physical and Numerical of Multiphase Industrial Flows*. Cargèse., 2003.