



**HAL**  
open science

# Couplage Eléments Finis/Eléments Discrets : application à la simulation d'impact localisé sur un ouvrage en béton armé

Jessica Rousseau, Philippe Maurice Marin, Laurent Daudeville, Sergueï  
Potapov

## ► To cite this version:

Jessica Rousseau, Philippe Maurice Marin, Laurent Daudeville, Sergueï Potapov. Couplage Eléments Finis/Eléments Discrets : application à la simulation d'impact localisé sur un ouvrage en béton armé. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01413699

**HAL Id: hal-01413699**

**<https://hal.science/hal-01413699v1>**

Submitted on 10 Dec 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Couplage Eléments Finis/Eléments Discrets : application à la simulation d'impact localisé sur un ouvrage en béton armé

J. Rousseau<sup>1</sup>, P. Marin<sup>1</sup>, L. Daudeville<sup>1</sup>, S. Potapov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire 3S-R (CNRS/UJF/INPG),  
DU BP53, 38041 Grenoble Cedex 9, France  
jessica.rousseau@hmg.inpg.fr  
philippe.marin2@hmg.inpg.fr  
laurent.daudeville@ujf.fr

<sup>2</sup>LaMSID (EDF/CNRS),  
1 av. du Général de Gaulle 92141 Clamart, France  
serguei.potapov@edf.fr

---

**Résumé** – La modélisation des structures par éléments discrets est bien adaptée aux problèmes dynamiques mettant en jeu de la fragmentation mais elle est difficile à mettre en œuvre sur des structures de grande taille. Couplées à une méthode aux éléments finis, cette méthode devient performante pour simuler le comportement des ouvrages en béton armé soumis à des impacts autant à l'échelle locale de l'impact qu'au niveau global de la structure.

**Mots clés** – impact, éléments discrets, couplage éléments finis/éléments discrets

---

## 1 Introduction

L'étude présentée concerne la modélisation de l'impact d'un projectile sur un ouvrage en béton armé. Pour simuler la réponse fortement non-linéaire de la structure avec une ruine locale éventuelle au niveau de l'impact nous utilisons la méthode aux éléments discrets qui a su prouver son efficacité dans des problèmes nécessitant la représentation de discontinuités [5]. Toutefois cette approche est difficile à mettre en œuvre à l'échelle de la structure. Afin d'être en mesure de décrire à la fois la pénétration du projectile et la réponse globale de l'ouvrage, une approche multi-domaines est proposée. La zone proche de l'impact est modélisée par Eléments Discrets (ED) tandis que des Eléments Finis (EF) sont utilisés pour le reste de l'ouvrage, puisque suffisamment loin de la zone impactée la structure garde un comportement élastique.

Dans un premier temps, on s'intéressera à l'identification des paramètres d'un modèle ED pour la description du comportement du béton armé.

La deuxième partie concerne le couplage éléments discrets/éléments finis et plus particulièrement le couplage avec des éléments de type coque. Une application 3D de la simulation de l'impact d'une dalle en béton est proposée.

## 2 Modèle Eléments Discrets

### 2.1 Généralités

Dans le modèle aux éléments discrets utilisé [5] et [6], les éléments sont des sphères rigides de tailles variables réunies en un assemblage désordonné. Les éléments peuvent interagir à distance par l'intermédiaire d'un rayon d'interaction. Les interactions entre les sphères sont

définies par une raideur normale  $K_n$  et une raideur tangentielle  $K_s$ . Ces valeurs doivent représenter au mieux le comportement élastique du béton. Il s'agit d'identifier les relations les reliant aux paramètres macroscopiques  $E$  et  $\nu$ .

Le comportement non-linéaire du béton est ensuite défini localement par deux critères de rupture:

$$\begin{cases} f_1(F_n, F_s) = F_s - \tan(\Phi_i)F_n - S_{int}C_o & \text{(Critère de glissement)} \\ f_2(F_n, F_s) = S_{int}T - F_n & \text{(Critère de rupture en traction)} \end{cases} \quad (1)$$

et les relations de comportement :

$$\begin{cases} \text{si } f_2(F_s, F_n) \leq 0 & \text{la liaison est cohésive et élastique} \\ \text{si } f_1(F_s, F_n) \geq 0 \text{ et } f_2(F_s, F_n) < 0 & F_s = \tan(\Phi_i)F_n - S_{int}C_o \\ \text{si } f_2(F_s, F_n) < 0 & \text{la liaison est rompue } (F_s = F_n = 0) \end{cases} \quad (2)$$

avec  $C_o$  la cohésion,  $\Phi_i$  l'angle de frottement interne et  $T$  la résistance locale à la traction.  $F_n$  et  $F_s$  sont les efforts d'interaction normaux et tangentiels. Notons qu'un adoucissement  $\zeta$  est introduit en traction permettant de faire tendre progressivement la force normale vers 0.

A ces liaisons cohésives initiales, des liaisons de type contact peuvent se rajouter durant la simulation, y compris entre des ED dont la liaison cohésive initiale a été rompue. Pour une liaison de type contact frottant, une loi de type (1) est utilisée avec  $C_o=T=0$  et un angle de friction  $\Phi_c$ .

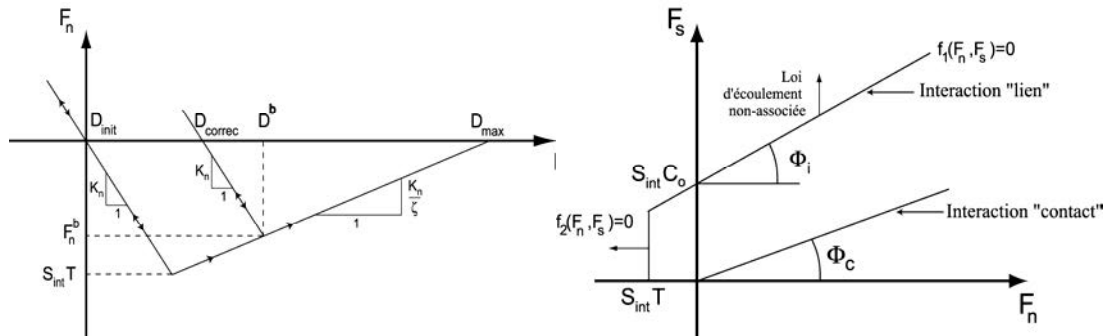


Figure 1 - Lois d'interaction entre ED

Les raideurs  $K_s$  et  $K_n$  des interactions entre éléments discrets sont calculées à partir d'une relation « micro-macro » (3) fonction des paramètres macroscopiques  $E$  et  $\nu$ .  $S_{int}$  est la surface moyenne des deux éléments et  $D_{init}$  la distance initiale entre les deux éléments.

$$\begin{cases} K_n = E \frac{S_{int}}{D_{init}^{a,b}} \frac{1 + \alpha}{\beta(1 + \nu) + \gamma(1 - \alpha\nu)} \\ K_s = K_n \frac{1 - \alpha\nu}{1 + \nu} \end{cases} \quad (3)$$

Le détail de l'identification des valeurs de  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  et tous les tests de reproductibilités peuvent être trouvés dans [6].

## 2.2 Identification

Pour modéliser correctement le comportement non-linéaire du béton, il faut identifier les paramètres locaux  $T$ ,  $C_o$ ,  $\Phi_i$ ,  $\Phi_c$  et  $\zeta$  à partir des valeurs macroscopiques de  $\sigma_c$ ,  $\sigma_t$  et  $G_f$ . La procédure d'identification (Figure 2) repose sur une série de tests de traction simple dans un premier temps et de compression simple dans un second temps.

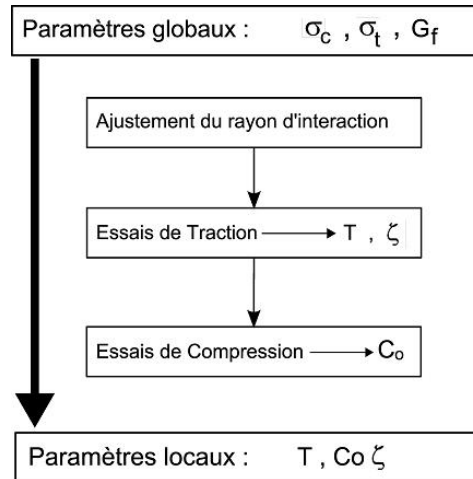


Figure 2 – Procédure d'identification

En appliquant cette procédure, les paramètres locaux correspondant à un béton ordinaire testé en laboratoire 3S-R [5] ont été déterminés. Les résultats des essais de traction et compression sont présentés sur les Figures 3 et 4.

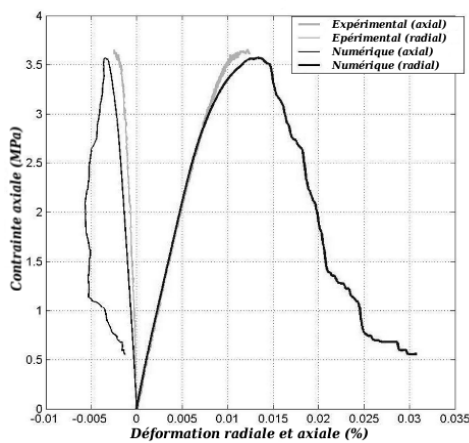


Figure 3 – Essai de traction

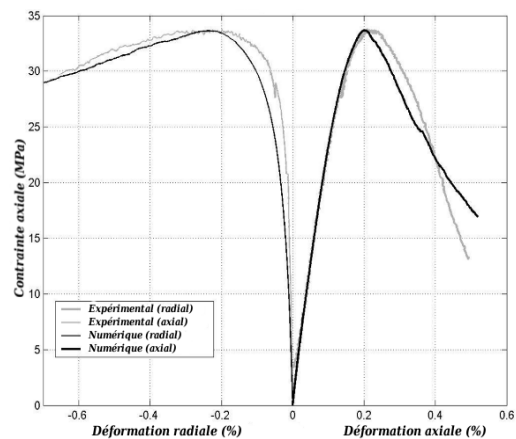


Figure 4 – Essai de compression

### 3 Couplage entre ED et EF

#### 3.1 Méthode de couplage

La structure est divisée en deux sous-domaines, EF et ED, et une zone de transition dans laquelle il y a recouvrement des deux domaines. La solution est obtenue en minimisant le Hamiltonien ([2] et [8]) avec introduction des relations cinématiques entre les degrés de liberté EF et ED sur la zone de recouvrement par multiplicateurs de Lagrange. Dans la zone de recouvrement, le Hamiltonien (4) est calculé comme combinaison linéaire de la partie continue et de la partie discrète en utilisant un paramètre de pondération linéaire  $\alpha$  sur la zone de recouvrement. La méthode de base est détaillée dans [3].

$$H = \alpha H_{EF} + (1 - \alpha) H_{ED} \text{ avec } H = E_{cin} + E_p \quad (4)$$

Pour assurer la continuité cinématique dans les différents sous-domaines, il est nécessaire de relier les degrés de liberté par des relations spatiales. Dans la zone de recouvrement  $r$ , les

degrés de libertés ED ( $d_r$ ) sont donc reliés de manière forte aux degrés de liberté EF ( $u_r$ ) (5).

$$\vec{d}_r = \bar{k} \vec{u}_r \quad (5)$$

### 3.2 Cas des coques

Dans le cas des coques, on s'appuie sur la méthode de couplage présentée précédemment. Le problème se pose pour repérer les éléments discrets par rapport aux éléments coques. Comment repérer un élément discret situé à une frontière ? Sur la Figure 5, on observe un exemple de projection des éléments discrets sur des éléments coques selon leurs normales. Les deux éléments discrets qui se trouvent entre les deux éléments coques posent problème. Un de ces éléments est en dehors de la zone définie par les normales, il ne peut être projeté sur aucun des deux éléments coques. Au contraire, le second élément appartient aux deux éléments fins.

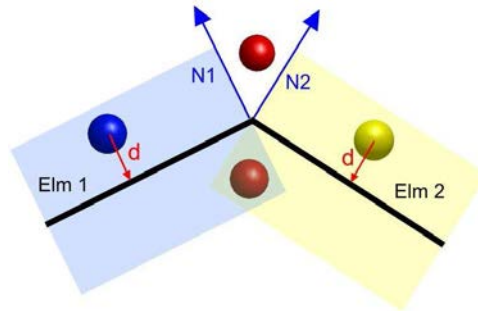


Figure 5 – Problème de repérage de Eléments Discrets

La solution pour palier à ce problème est de calculer une normale moyenne  $n$  pour chaque nœud et ainsi définir des éléments cubes fictifs à l'aide de 8 nœuds fictifs (Figure 6) et de l'épaisseur  $h$ .

$$\vec{x}_{fictif} = \vec{x}_{reel} \pm \frac{h}{2} \vec{n} \quad (6)$$

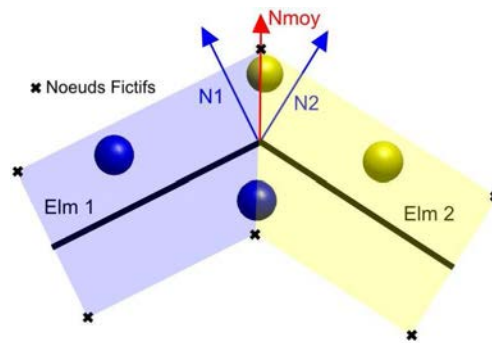


Figure 6 – Définition des noeuds fictifs

La procédure de couplage décrite précédemment pour les cubes est utilisée pour le couplage avec les coques en utilisant les nœuds fictifs définis ci-dessus.

Finalement, les conditions cinématiques sont appliquées sur les déplacements des nœuds fictifs. Il est donc nécessaire de transformer ces déplacements de translation (3 ddls) en déplacement de coques (6 ddls). Sous l'hypothèse du segment transverse perpendiculaire et rigide ([1] et [7]), on transforme les déplacements des noeuds fictifs  $u_{fictif}$  en déplacements ureel et en rotations des nœuds réels  $\theta$  de la coque (7).

$$\vec{u}_{fictif} = u_{reel} + z\theta \text{ avec } z = \pm \frac{h}{2} \quad (7)$$

## 4 Impact sur dalle en béton

La méthode de couplage est mise en œuvre sur une dalle en béton impactée par un bloc rocheux. Les résultats, en termes de déplacement et d'endommagement, sont comparés avec ceux obtenus pour un modèle uniquement discret.

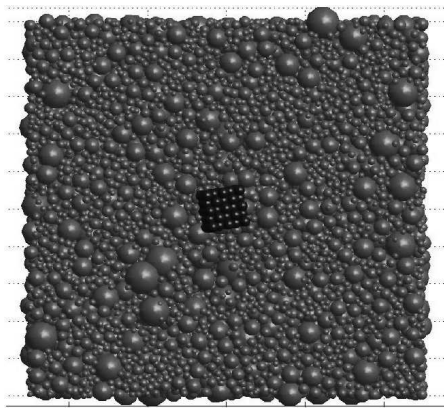


Figure 5 – Zoom sur la partie discrète de la discrétisation

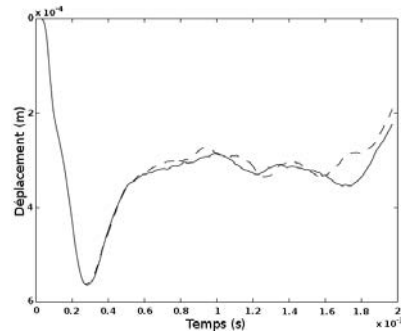


Figure 6 – Réponse en déplacement entre le modèle discret (trait plein) et le couplé (pointillés)

La Figure 6 compare le déplacement d'un élément discret du modèle de référence ED avec celui d'un nœud EF du modèle couplé voisin de cet élément discret. De même, en terme d'endommagement, les réponses sont également similaires.

Pour cette application, le gain en temps de calcul pour le modèle mixte est d'un facteur 10. Ce gain permet de réaliser des simulations jusqu'alors impossibles par éléments discrets seuls. En fonction de l'étude, suivant le rapport entre la taille de la structure et celle de la zone ED conservée, ce gain peut être encore plus avantageux.

## 5 Conclusions

L'identification des paramètres du modèle discret donne des résultats satisfaisants, notamment pour le comportement élastique. Les tests effectués sur le comportement en compression simple et traction simple indiquent une reproductibilité correcte des résultats. Le modèle discret est prédictif et la procédure d'identification est clairement définie.

La méthode de couplage proposée a été adaptée au couplage avec les éléments de type coques largement plus utilisés pour la simulation de structures.

Les résultats obtenus pour la simulation d'un impact sur dalle en béton montrent la faisabilité de l'approche couplée présentée. La simulation à l'échelle d'un ouvrage complet est réalisable.

## Références

- [1] J-L. Batoz, G. Dhatt. Volume 3: Coques. *Modélisation des structures par éléments finis*, Hermes éditions, 1992.
- [2] H. BenDhia. Problèmes mécaniques multi-échelles : la Méthode Arlequin, *C. R. Acad. Sci. Paris, Série II b*, **T. 326**, 899-904, 1998.
- [3] E. Frangin, P. Marin, L. Daudeville. On the use of combined finite/discrete element method

for impacted concrete structures, *J. Phys. IV*, **134**, 461–466, 2006.

- [4] T. Gabet, Y. Malecot, L. Daudeville. Triaxial behaviour of concrete under high stresses: Influence of the loading path on compaction and limit states, *Cement Concrete Res.*, **38**(3), 403-412, 2008.
- [5] S. Hentz, L. Daudeville, F. V. Donze. Identification and Validation of a Discrete Element Model for Concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, **130**, 709-719, 2004.
- [6] J. Rousseau, E. Frangin, P. Marin and L. Daudeville. Damage prediction in the vicinity of an impact on a concrete structure: a combined FEM/DEM approach. *Computers and Concrete*, **5**(4), 343- 358, 2008.
- [7] E. Reissner. Linear and nonlinear theory of shells. *Thin Shell Structures*, Fung and Sechler Eds., Prentice Hall, 29-44, 1974.
- [8] S. Xiao, T. Belytschko. A bridging domain method for coupling continua with molecular dynamics, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **193**, 1645-1669, 2004.