



HAL
open science

Endommagement et ruine des structures renforcées sous impact

Serguei Potapov, Vincent Faucher

► **To cite this version:**

Serguei Potapov, Vincent Faucher. Endommagement et ruine des structures renforcées sous impact. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592854

HAL Id: hal-00592854

<https://hal.science/hal-00592854>

Submitted on 3 May 2011

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 et ruine des structures renforcées sous impact

S. Potapov¹, V. Faucher²

¹LaMSID UMR EDF-CNRS-CEA 2832, EDF R&D, Département AMA, France, sergei.potapov@edf.fr

²LaMSID UMR EDF-CNRS-CEA 2832, CEA, DEN, DM2S, SEMT, DYN, France, vincent.faucher@cea.fr

Résumé — La présente contribution porte sur les méthodes de calcul en dynamique rapide pour les structures sous impact modélisées jusqu'à la ruine. Est en particulier considérée l'approche par éléments discrets pour la modélisation du béton armé. Cette approche a fait l'objet de développements avancés dans le code EUROPLEXUS, au niveau de la représentation de l'endommagement et de l'interaction entre le béton et le ferrailage, des performances de l'algorithme de résolution et de l'interaction avec les éléments finis utilisés classiquement pour discrétiser une partie du modèle.

Les travaux en cours sont illustrés sur des applications industrielles menées avec le logiciel.

Mots clefs — Dynamique rapide explicite, endommagement, ruine, éléments discrets.

1 Éléments discrets pour modéliser le béton armé sous impact

1.1 Introduction

Les éléments discrets (ED) sont une alternative intéressante à la modélisation des structures par éléments finis, particulièrement adaptée lorsque de hauts niveaux d'endommagement interviennent, jusqu'à la ruine complète, reproduisant de manière satisfaisante les phénomènes discontinus apparaissant avec la rupture[1][2].

Parmi les différentes formulations existantes, l'approche mise en place dans le code EUROPLEXUS, co-développé et utilisé par le CEA et EDF dans le domaine du calcul dynamique accidentel [3], est fondée sur des éléments sphériques, rigides et homogènes, dont l'assemblage désordonné polydisperse permet d'assurer l'isotropie initiale du matériau béton et d'éviter le développement des faciès de fissures dans quelques plans de clivage privilégiés. Les éléments discrets interagissent selon deux modes : un mode cohésif, avec un certain rayon d'interaction associé à chaque élément, et un mode de contact, entre des éléments initialement non-liés ou ayant rompu au cours de la déformation.

Le mouvement des éléments discrets en translation et en rotation est régi par le principe fondamental de la dynamique reliant les accélérations aux torseurs des actions mécaniques qui s'appliquent sur chacun des éléments :

$$\begin{cases} \vec{d}_i(t) = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^n \vec{F}_{j \rightarrow i}(\delta_{ij}) \\ \vec{\omega}_i(t) = \frac{1}{J_i} \sum_{j=1}^n \vec{M}_{j \rightarrow i}(\delta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

où m_i et J_i sont respectivement la masse et le moment d'inertie de l'élément i et δ_{ij} le déplacement relatif entre l'élément i et l'un de ces voisins j . La discrétisation en temps de (1) est réalisée par le schéma explicite des différences centrées.

1.2 Modélisation du béton

A la différence des modèles continus qui appliquent les mêmes caractéristiques physiques macroscopiques à tous les éléments du modèle ayant le même matériau, le modèle éléments discrets repose sur des lois d'interaction locales qui sont fonction de la taille des éléments en interaction. Cela conduit à des raideurs locales différentes au niveau des liens inter-éléments. L'interaction entre une paire d'éléments est représentée par une raideur normale K_n et une raideur tangentielle K_s qui sont calculées à partir d'une relation micro-macro en fonction des paramètres macroscopiques E et ν .

Les paramètres locaux des lois d'interaction cohésive entre les éléments discrets sont identifiés pour reproduire au niveau de la structure le comportement linéaire élastique isotrope du béton sain, d'une part, et, d'autre part, son comportement non-linéaire à rupture, en particulier la dissymétrie de comportement traction/compression. Le comportement non-linéaire du béton est défini localement par deux critères de rupture, le premier, de type Mohr-Coulomb, régissant le cisaillement et la dissymétrie de comportement, et, le second, tenant compte des tractions locales :

$$\begin{cases} f_1 = F_s - \tan(\Phi_i)F_n - S_{\text{int}}C_0 \\ f_2 = S_{\text{int}}T - F_n \end{cases}$$

avec Φ_i l'angle de frottement interne, C_0 la cohésion et T la résistance locale en traction. Lorsque le critère de cisaillement est atteint, l'interaction entre les éléments devient de type glissement sans perte de cohésion, ce qui est décrit par une loi d'écoulement non-associée. Lorsque le critère de traction est atteint, le comportement devient adoucissant (Figure 1) piloté par un paramètre $\zeta > 0$:

$$F_n = \frac{K_n}{\zeta}(D - D_{\text{max}}), \quad \text{avec} \quad D_{\text{max}} = D_{\text{init}} + (1 + \zeta)\frac{S_{\text{int}}T}{K_n}$$

Cela permet de reproduire l'adoucissement macroscopique observé dans les essais. Si ζ tend vers 0, alors le comportement devient parfaitement fragile. Si le système modélisé subit une décharge pendant la phase d'adoucissement, les déformations permanentes apparaissent. Lorsque la distance entre deux éléments D dépasse D_{max} , le lien cohésif entre les éléments en interaction est définitivement rompu. Après la rupture, les liaisons de type contact sont activées. Elles ne supportent aucune force de traction et sont régies par la loi de Coulomb classique caractérisée par l'angle de frottement Φ_c .

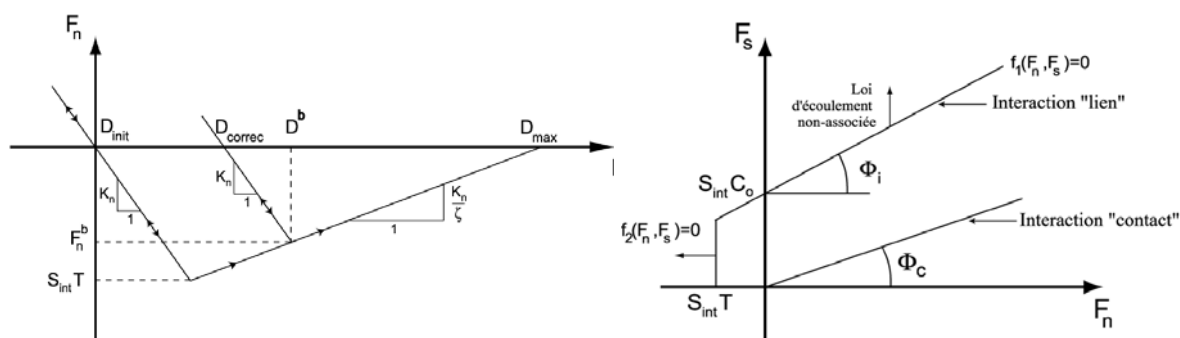


FIG. 1 – Lois d'interaction entre les éléments discrets de béton.

1.3 Modélisation du ferrailage

Le ferrailage est également modélisé à l'aide d'éléments discrets. Chaque barre est représentée par une rangée d'éléments discrets alignés de diamètre constant, égal au diamètre de la barre modélisée. Les éléments discrets de ferrailage sont reliés entre eux par des liaisons élastiques bilinéaires travaillant en traction-compression, en cisaillement et en flexion (Figure 2). La méthode de calcul des raideurs locales à partir de E et ν pour les éléments discrets de ferrailage repose sur les formules

classiques de la résistance des matériaux, ce qui permet de reproduire correctement le comportement classique d'une poutre en traction-compression et en flexion. est différente de celle mise en place pour les éléments discrets du béton. A partir de la limite élastique σ_y , la loi de comportement suit un modèle plastique avec écrouissage classique. La rupture de la liaison en traction intervient dès que l'on atteint la contrainte de rupture σ_r ou l'allongement maximal prescrit : $D_{\max} = D_{\text{init}} + \varepsilon_{\max} D_{\text{init}}$ (avec ε_{\max} la déformation à rupture).

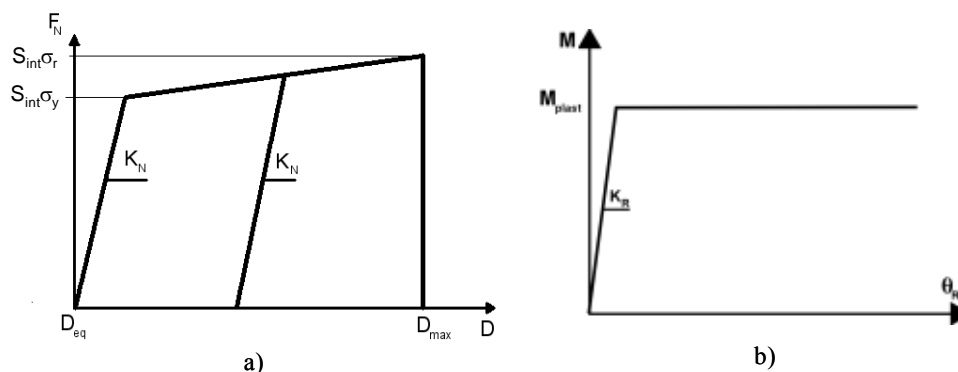


FIG. 2 – Lois d'interaction entre les éléments discrets de ferrailage : a) en traction, b) en flexion.

1.4 Liaison acier-béton

Dans le modèle ED présenté ici, la loi d'interaction entre le béton et le ferrailage reprend les idées proposées dans le cadre éléments finis [4]. Ainsi, la loi tangentielle (Figure 3, à gauche) reproduit d'abord l'adhérence parfaite entre les deux matériaux avec une raideur élastique K_s suivi d'un état de glissement, puis d'endommagement et, en dernier lieu, un pseudo-contact frottant avec un effort résiduel. Pour calibrer les paramètres de cette loi, on utilise les essais d'arrachement d'une armature ancrée dans du béton, fournissant la relation entre la force d'arrachement et le déplacement relatif.

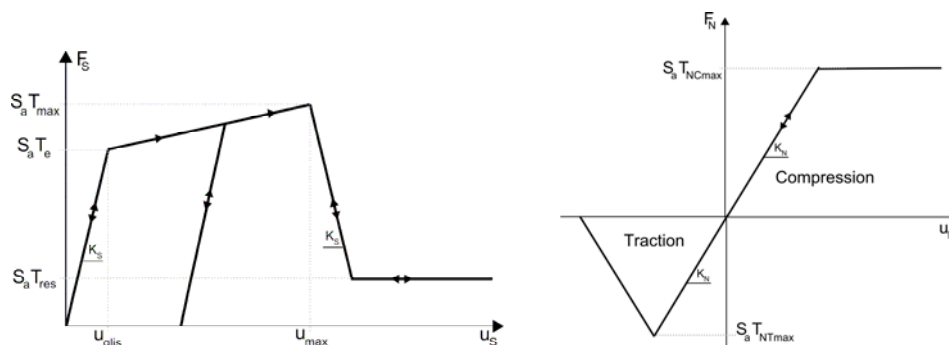


FIG. 3 – Lois d'interaction acier-béton tangentielle (à gauche) et normale (à droite).

La loi régissant la liaison acier-béton dans la direction perpendiculaire à l'armature est plus simple : elle décrit une relation élastique fragile en traction et un comportement élastique-parfaitement plastique en compression. Les paramètres de cette loi sont fixés actuellement de manière forfaitaire car on ne dispose pas d'essai permettant de les calibrer.

Il faut noter que la liaison acier-béton mise en œuvre dans EUROPLEXUS tient compte de la direction de l'armature car les efforts normaux et tangentiels entre un élément d'acier et un élément de béton sont projetés dans le repère lié à l'armature (Figure 4).

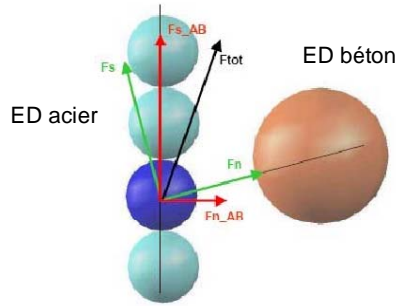


FIG. 4 – Projection des efforts.

1.5 Contact et couplage éléments discrets – éléments finis

Lorsqu'on cherche à simuler le comportement de structures de grande taille sous impact endommageant et l'on se fixe comme objectif d'obtenir des résultats non seulement qualitatifs mais aussi quantitatifs, il n'est pas envisageable de recourir exclusivement à la méthode des éléments discrets car elle conduirait à des modèles numériques dont la taille aurait dépassé largement les capacités de stockage et de résolution des ordinateurs actuels. La réduction du coût de calcul passe, d'une part, par la mise en oeuvre des techniques de résolution parallèle sur des architectures modernes multi-cœurs et hybrides, l'objet de la section 2, et, d'autre part, par une mise en place des modélisations mixtes faisant intervenir dans un même modèle numérique plusieurs formulations dûment interconnectées. Ainsi, pour optimiser la modélisation du problème d'impact de projectile déformable sur structures de taille industrielle, un algorithme de couplage entre éléments discrets et éléments finis 3D et coque a été mis en place dans EUROPLEXUS [1] permettant, dans le cadre d'une seule simulation, d'étudier à l'aide des éléments discrets le comportement très non-linéaire de la zone endommagée par l'impact, tout en calculant le comportement vibratoire globalement linéaire du reste de la structure à l'aide des éléments finis classiques.

Pour modéliser le projectile déformable se présentant souvent sous forme d'un tube métallique à paroi mince, nous faisons appel à la méthode des éléments finis massifs ou coques avec des lois de comportement adéquates. Le contact entre le projectile traité en éléments finis et la structure représentée avec des éléments discrets est modélisé à l'aide des algorithmes de contact disponibles dans EUROPLEXUS. Pour la détection du contact, on applique la méthode Pinball [5] qui repose sur l'utilisation des sphères inscrites dans les éléments finis se trouvant sur la surface potentielle du contact (Figure 5).

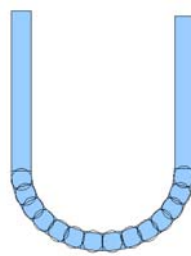


FIG. 5 – Méthode Pinball appliquée sur le nez arrondi d'un projectile creux.

Les éléments discrets utilisés étant des sphères, la méthode Pinball leur est naturellement appliquée. Les relations de contact sont ensuite traitées à l'aide de la méthode des multiplicateurs de Lagrange utilisée par défaut dans EUROPLEXUS.

1.6 Support géométrique

Pour mettre en oeuvre une modélisation ED, il est nécessaire de générer un support géométrique qui est différent des maillages classiques éléments finis. Pour le faire, nous utilisons la méthode géométrique proposée dans [6]. Cette méthode permet de remplir un volume quelconque discrétisé en

tétraèdres par des sphères de diamètres variables (Figure 6).

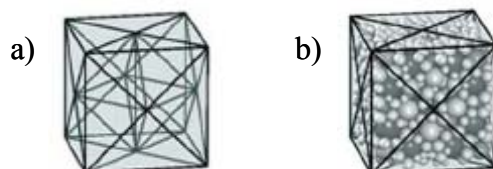


FIG. 6 – Maillage tétraédrique initial (a), échantillon ED final (b).

Pour les structures en béton armé, l’algorithme de placement des sphères doit tenir compte de la présence des armatures. Un outil métier SpherePadder (version C++ de la procédure proposée dans [6]) permet de transformer les maillages tétraédrique du béton et filaire du ferrailage en un empilement des éléments discrets contenant les éléments discrets de béton et de ferrailage (Figure 7).

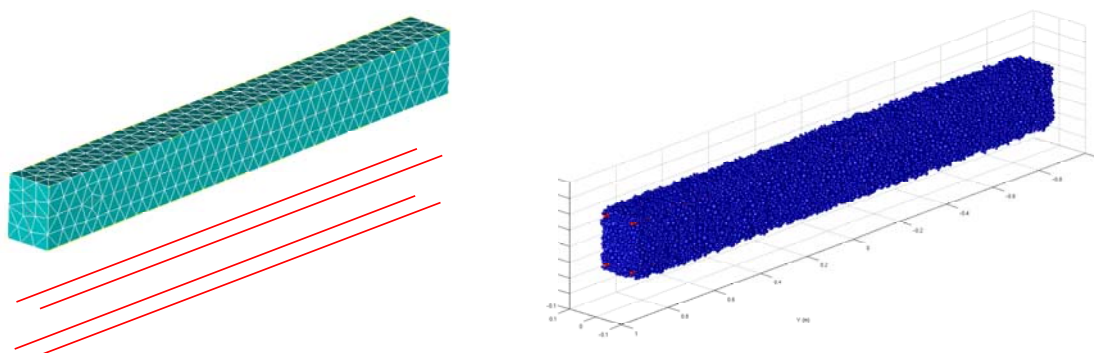


FIG. 7 – Maillages initiaux « béton » et « acier » pour une poutre en béton armé (à gauche), modèle ED de poutre (à droite).

2 Résolution parallèle hybride

La modélisation par éléments discrets produit fréquemment des modèles volumineux, pour obtenir une description fine des phénomènes non-linéaires localisés à l’intérieur et au voisinage d’une zone d’impact. Il est donc nécessaire de l’associer avec une résolution parallèle efficace pour ne pas pénaliser son utilisation.

Dans EUROPLEXUS, cette approche sert de modèle pour la mise en œuvre d’un parallélisme hybride, dans le cadre du projet ANR REPDYN [7] : d’une part, la résolution est accélérée par une décomposition de domaine et un parallélisme à mémoire distribuée MPI entre les nœuds d’un *cluster* de calcul, d’autre part, une accélération locale sur GPU, initiée au cours du projet ANR VULCAIN [8], est en cours de finalisation par le laboratoire INRIA/LIG.

Le traitement parallèle MPI repose sur une décomposition de domaine classique, avec un recouvrement partiel des domaines pour permettre l’écriture des liens entre éléments discrets attribués à des domaines différents. L’accélération sur GPU est proposé par l’intermédiaire d’un appel à la librairie SOFA [9], développée au LIG.

En termes de parallélisme hybride, l’objectif final est orienté vers les *clusters* de nœuds composés de processeurs multi-cœurs en mémoire partagée, éventuellement équipés d’un ou plusieurs GPU(s), comme le montre la figure 8.

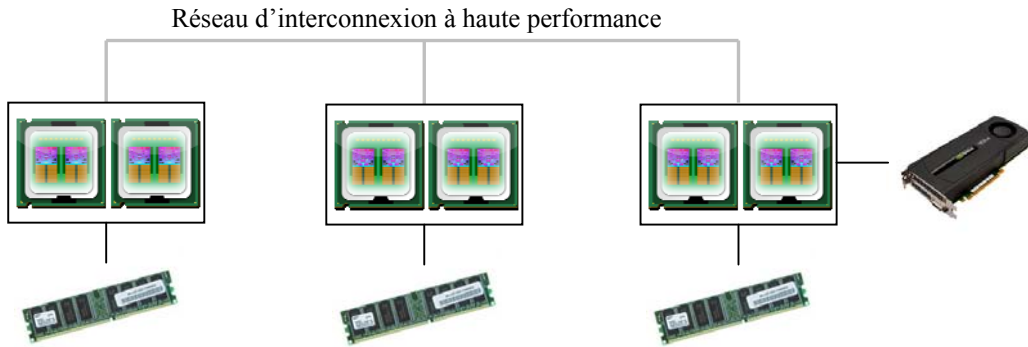


FIG. 8 – Architecture pour parallélisme hybride.

La disponibilité des ressources GPU sur les nœuds sur la figure 8 est volontairement hétérogène, tous les sous-domaines d'un modèle n'ayant vocation à être accélérés sur GPU, notamment pour un modèle couplant éléments finis et éléments discrets.

La disponibilité simultanée d'un code distribué MPI, d'un code CPU parallèle à mémoire partagée (SMP) en cours de développement et d'un code GPU font de l'approche par éléments discrets dans EUROPLEXUS un modèle pour un parallélisme hybride d'une grande généralité.

Cette variété d'implémentation, avec notamment la double implémentation SMP/GPU en local sur un nœud pose la question de l'équilibrage de la charge sur les ressources disponibles. La pondération de la décomposition de domaine et sa réactualisation éventuelle en cours de calcul prend en charge la répartition sur les nœuds du *cluster*. L'équilibrage au sein d'un nœud est envisagé dynamiquement à l'aide de la librairie KAAPI [10][11], mettant en œuvre des méthodes de partitionnement de graphes et de *work stealing* entre les *threads*, et gérant également leur affinité pour les ressources CPU ou GPU, en fonction des implémentations disponibles.

3 Illustrations

Les simulations réalisées montrent que l'utilisation des modèles mixtes contenant des éléments discrets et des éléments finis classiques permet de simuler efficacement le comportement de la structure en béton armé pour différents types de chargement. Elles ont été réalisées avec le solveur distribué MPI du programme.

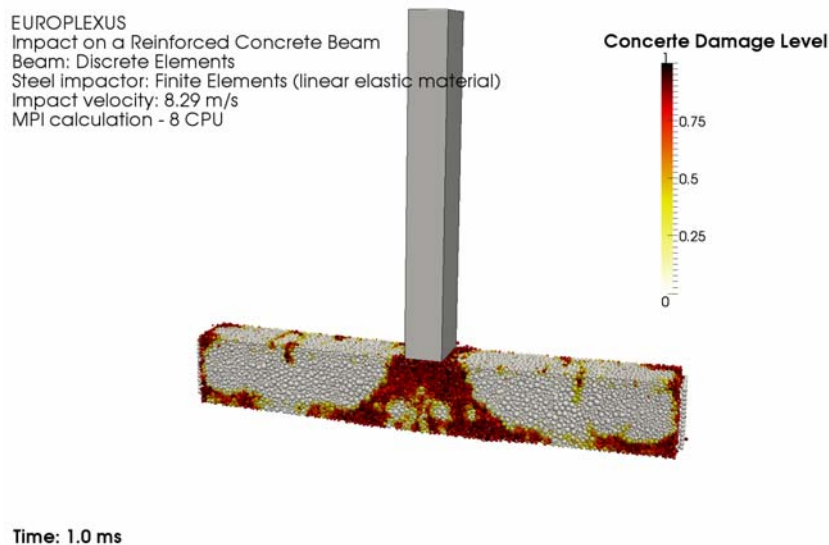


FIG. 9 – Impact d'un projectile rigide sur une poutre en béton armée.

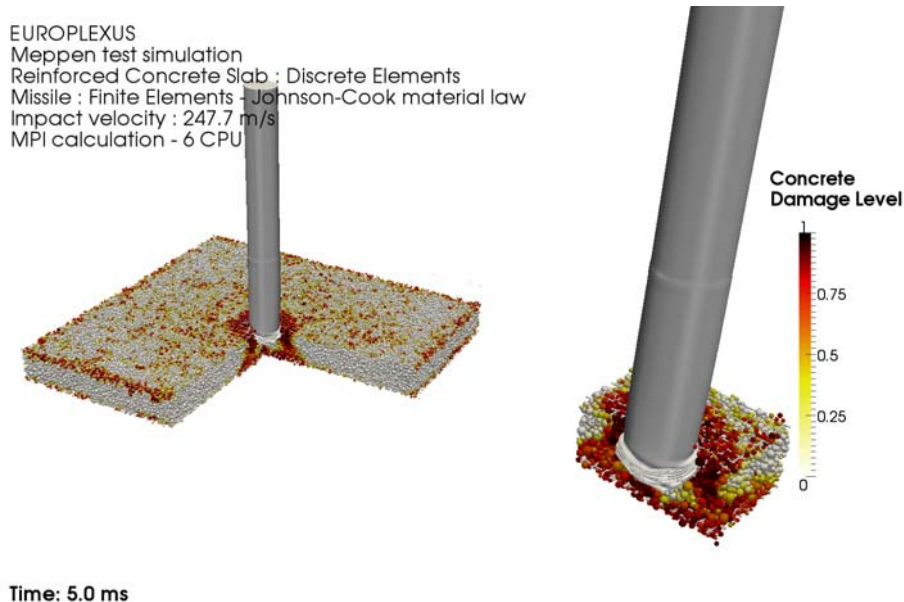


FIG. 10 – Simulation d'un essai Meppen (impact d'un missile déformable sur une dalle en béton armé).

Références

- [1] J. Rousseau. *Modélisation numérique du comportement dynamique des structures sous impact sévère avec un couplage éléments discrets / éléments finis*, thèse de doctorat Université Joseph Fournier (Grenoble), 2009.
- [2] J. Rousseau, P. Marin, L. Daudeville, S. Potapov. *A discrete element/shell finite element coupling for simulating impacts on reinforced concrete structures*, European Journal of Computational Mechanics, Vol. 19/1-2-3 – 2010, pp.153-164
- [3] EUROPLEXUS: a computer program for the finite element simulation of fluid–structure systems under transient dynamic loading. <http://europlexus.jrc.ec.europa.eu>, (User's Manual).
- [4] N. Domingez, *Etude de la liaison Acier-Béton : De la modélisation du phénomène à la formulation d'un élément enrichi 'béton armé'*. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2005.
- [5] F. Casadei, *A general impact-contact algorithm based on hierarchic pinballs for the Europlexus software system*. European Commission, Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint Research Centre, 2003.
- [6] J-F. Jerier, V. Richefeu, D. Imbault, F.-V. Donzé, *Packing spherical discrete elements for large scale simulations*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 199 (2010) 1668–1676.
- [7] <http://www.repdyn.fr>
- [8] <http://vulcain.ujf-grenoble.fr/>
- [9] <http://www.sofa-framework.org>
- [10] T. Gautier, X. Besseron & L. Pigeon. *KAAPI: a thread scheduling runtime system for data flow computations on cluster of multi-processors*. In Parallel Symbolic Computation'07 (PASCO'07), number 15-23, London, Ontario, Canada, 2007.
- [11] <http://kaapi.gforge.inria.fr/>