



HAL
open science

Couplage de modèles en dynamique rapide Application au couplage SPH-EF pour la simulation d'un impact de projectile sur une dalle en béton armée

Fabien Caleyron, Yann Chuzel-Marmot, Alain Combescure

► To cite this version:

Fabien Caleyron, Yann Chuzel-Marmot, Alain Combescure. Couplage de modèles en dynamique rapide Application au couplage SPH-EF pour la simulation d'un impact de projectile sur une dalle en béton armée. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01422248

HAL Id: hal-01422248

<https://hal.science/hal-01422248>

Submitted on 24 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 de modèles en dynamique rapide

Application au couplage SPH-EF pour la simulation d'un impact de projectile sur une dalle en béton armée

F. Caleyron¹, Y. Chuzel-Marmot¹, A. Combescure¹

¹ Université de Lyon, INSA Lyon, LaMCoS UMR CNRS 5259
18- 20 allée des sciences 69621 Villeurbanne cedex (France)
{fabien.caleyron,yann.chuzel-marmot,alain.combescure}@insa-lyon.fr

Résumé — L'analyse des structures sous sollicitations extrêmes, telles que les crashes et les impacts, impose la modélisation des ruptures et des grandes déformations. L'utilisation de la méthode des éléments finis (EF) dans ce type de problèmes montre ses limites notamment parce qu'elle repose sur un maillage qui supporte mal les distorsions et les déchirures. Afin de palier ces inconvénients, des méthodes dites "sans maillages" ont vu le jour, telle que la méthode Smoothed Particules Hydrodynamics (SPH). Ce papier présente un modèle tirant profit de ces deux approches en couplant SPH et EF

Mots clés — SPH, couplage, Arlequin, béton, impact.

1 Impact de dalle en béton armé

La structure étudiée est une dalle en béton armé appuyée sur deux de ses bords et dont les caractéristiques géométriques sont résumées Figure 1. Elle est impactée en son centre par un missile présenté Figure 2.

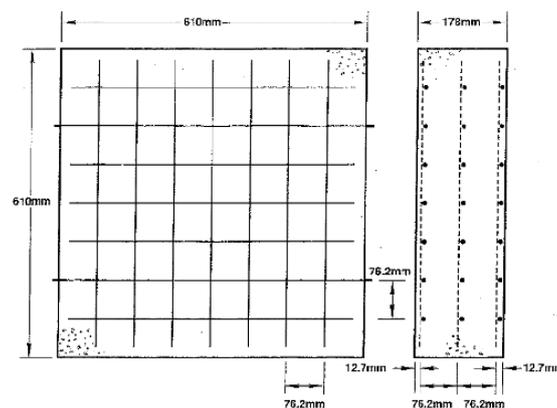


Figure 1 – Caractéristiques géométriques de la dalle en béton armé.

Les caractéristiques des matériaux constituant la dalle et le missile sont les suivantes :

- béton : $E=36\text{GPa}$, $\rho = 2440\text{kg}/\text{m}^3$, $\nu = 0.22$, limite élastique en compression de 48MPa en traction de 4MPa,
- acier des ferrailages : $E=210\text{GPa}$, $\rho = 7800\text{kg}/\text{m}^3$, $\nu = 0.3$, limite élastique de 235MPa,

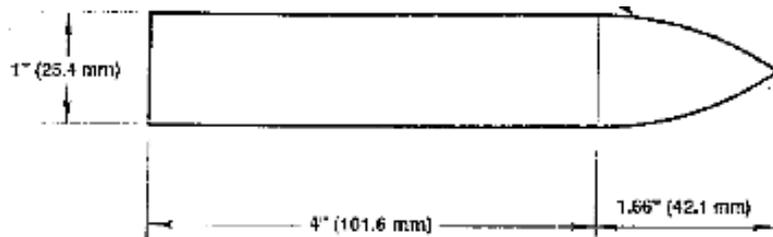


Figure 2 – Caractéristiques géométriques du projectile.

- acier du projectile : $E=200\text{GPa}$, $\rho = 8020\text{kg}/\text{m}^3$, $\nu = 0.3$, limite élastique de 1.72GPa .

2 Modèle SPH- EF

2.1 Introduction

Le modèle est schématisé Figure 3 et peut être résumé comme suit :

- la dalle est modélisée par le couplage d'une formulation SPH et d'une formulation EF cubiques. L'intérêt de ce couplage ("dalle EF-dalle SPH") et ses modalités sont présentés section 2.2.
- les renforts métalliques sont modélisés par des EF de poutre couplés aux SPH de la dalle. Ce deuxième couplage ("armature EF-dalle SPH") est présenté section 2.3.
- le missile est modélisé par des EF tétraédriques et le contact avec la dalle est géré par la méthode des pinballs [1].

Les lois de comportement introduites sont :

- béton : loi élastique avec endommagement de type Mazars [7][4] avec une résistance de 4MPa en traction et 48MPa en compression. On introduit des effets retards ainsi qu'une dépendance du comportement à la vitesse de déformation.
- acier des ferrailages : loi élasto-plastique parfaite avec $E=2\text{E}11\text{Pa}$, $\rho = 7800\text{kg}/\text{m}^3$, $\nu = 0.3$ et une limite élastique de 235MPa . Ces paramètres correspondent à un acier commun.
- acier du projectile : loi de comportement élasto-plastique parfaite avec $E=2\text{E}11\text{Pa}$, $\rho = 7800\text{kg}/\text{m}^3$, $\nu = 0.3$ et une limite élastique de 1.72GPa .

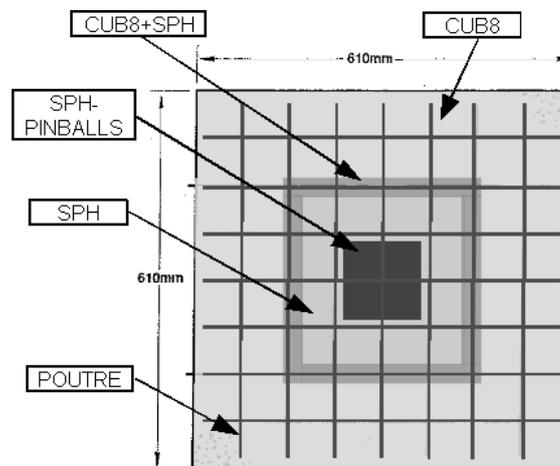


Figure 3 – Schématisation du maillage de la dalle

2.2 Couplage "dalle EF-dalle SPH"

Ce premier couplage, basé sur la méthode Arlequin [2][8][3], permet de lier en une même structure deux domaines Ω_1^0 et Ω_2^0 présentant deux formulations différentes. Les deux formulations sont couplées de manière faible sur un volume commun Ω_g^0 par l'introduction d'une énergie de couplage (1). On introduit ainsi des multiplicateurs de Lagrange, c'est à dire de forces fictives permettant d'imposer des déplacements égaux sur le volume de recouvrement Ω_g^0 . Il s'agit ensuite de répartir l'énergie de la zone de recouvrement (2) entre les deux formulations via des fonctions de pondération α et β formant une partition de l'unité.

$$W^{couplage} = \int_{\Omega_g^0} \underline{\lambda}^T (\underline{v}^{SPH} - \underline{v}^{FE}) dV^0 \quad (1)$$

$$W_g^{def} = \int_{\Omega_g^0} \left[\alpha(\underline{M}) e_1^{def}(\underline{M}) + (1 - \alpha(\underline{M})) e_2^{def}(\underline{M}) \right] dV^0(\underline{M}) \quad (2)$$

$$W_g^{kin} = \int_{\Omega_g^0} \left[\beta(\underline{M}) e_1^{kin}(\underline{M}) + (1 - \beta(\underline{M})) e_2^{kin}(\underline{M}) \right] dV^0(\underline{M})$$

Dans la formule (2), e_i^{def} (resp. e_i^{kin}) représentent la densité d'énergie (resp. cinétique) du sous-domaine i . Dans la formulation Arlequin, chaque sous-domaine Ω_i^0 respecte donc indépendamment les équations habituelles de la mécanique des milieux continus mais est contraint sur la zone de recouvrement par des efforts de collage que nous appellerons C_i . L'équation d'équilibre du sous-domaine i s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\int_{\Omega_i^0 - \Omega_i^0 g} \rho^0 \underline{v}_i dV^0 + \int_{\Omega_i^0 g} \beta_i \rho^0 \underline{v}_i dV^0 \right] &= \int_{\Omega_i^0 - \Omega_i^0 g} \underline{\nabla}_X \underline{P}_i dV^0 + \int_{\Omega_i^0 g} \alpha_i \underline{\nabla}_X \underline{P}_i dV^0 \\ &+ \int_{\Omega_i^0 - \Omega_i^0 g} \rho^0 \underline{f}_i dV^0 + \int_{\Omega_i^0 g} \beta_i \rho^0 \underline{f}_i dV^0 + \underline{C}_i \end{aligned} \quad (3)$$

où i est l'indice du domaine considéré ($i = 1, 2$), ρ^0 la masse volumique initiale, \underline{v} le champ vitesse, \underline{P} la transposée du premier tenseur des contraintes de Piola-Kirchhoff et \underline{f} les forces volumiques. Le principal avantage de ce couplage réside dans un gain en temps de calcul par rapport à la même structure modélisée totalement en SPH.

2.3 Couplage "armature EF-dalle SPH"

Le deuxième couplage permet de lier, non plus une structure étudiée avec deux formulations, mais deux structures différentes possédant chacune leur propre formulation. Ce couplage a été réalisé en liant les deux structures de manière faible grâce à des multiplicateurs de Lagrange. Dans le cadre de l'application, il s'agit de modéliser la dalle par une formulation SPH et son armature par des EF de poutre. L'avantage n'est plus numérique mais d'ordre physique puisqu'il permet de représenter de manière explicite les renforts d'un matériau composite comme le béton armé. La formulation de couplage est donc similaire au précédant à la différence près que les fonctions de pondération α et β sont désormais nulles puisque l'on a bien deux structures distinctes.

3 Comparaison avec l'expérience

3.1 Résultats expérimentaux

Dans [5], les auteurs fournissent des résultats expérimentaux pour la configuration présentée section 1. Ils étudient notamment la vitesse de sortie du missile et le faciès de l'impact pour

différentes vitesses initiales et différents bétons. Dans notre cas, nous nous intéressons à une dalle en béton de limite en compression de 48MPa et de limite en traction de 4MPa. Les vitesses de sortie du missile sont données Tableau 1. Les vitesses accompagnées d'un asterix (*) correspondent au cas où le projectile impacte les trois niveaux de renforts métalliques tandis que pour les autres vitesses, le projectile n'impacte pas les ferrailles.

Vitesse Initiale (m/s)	360	746*	749	1058
Vitesse Résiduelle (m/s)	67	605*	615	947

Tableau 1 – Vitesse résiduelle du missile en fonction de la vitesse initiale (Résultats expérimentaux) Hanchak et al. [5].

Il est intéressant de noter que d'après le Tableau 1, le fait d'impacter les ferrailles ou non ne diminue pas de manière importante la vitesse de sortie du projectile. Il s'agit d'une observation valable pour des vitesses d'impact élevées, le comportement étant probablement différent pour des vitesses d'impact faibles. Enfin, les auteurs ont observés la formation de cratères sur les faces d'entrée et de sortie de la dalle. Ils représentent environ un tiers de son épaisseur totale, le tiers restant présentant un simple trou circulaire. Le cratère de la face de sortie est généralement plus important que celui de la face d'entrée. Enfin, ils apparaissent surtout pour les impacts à faible vitesse et sont moins importants pour les impacts à très haute vitesse. Ces deux types d'informations, vitesses résiduelles et faciès de l'impact, vont servir de points de comparaison pour juger de la qualité des simulations menées.

3.2 Résultats numériques

Nous présentons les résultats pour une vitesse d'impact de 750m/s pour laquelle différents cas ont été étudiés selon la présence ou non de ferrailles et l'impact ou non du missile sur l'armature. Les Figures 4, 5 et 6 montrent l'état de la dalle et de l'impacteur respectivement en l'absence de ferrailles puis en présence de ferrailles avec et sans impact sur ceux-ci. Dans le cas où le projectile impacte les renforts métalliques, le contact est de nouveau géré par la méthode des pinballs [1]. Le critère introduit pour gérer la rupture des ferrailles est un critère en déformation : une fois la déformation plastique équivalente à rupture $\epsilon_p = 0.15$ atteinte, les EF de poutre sont considérés comme rompus et ne participent plus à la simulation.

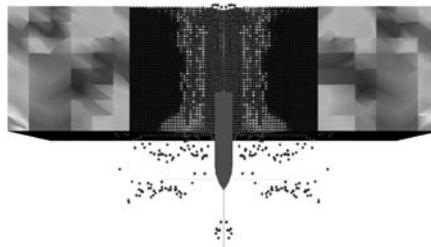


Figure 4 – Endommagement (zone SPH) et contraintes de Von-Mises (zone EF) de la dalle en béton sans ferrailles ($V_i=750\text{m/s}$) à $t=420\ \mu\text{s}$.

Les vitesses résiduelles de l'impacteur correspondant à chacun des trois cas étudiés (avec ferrailles, avec ferrailles et sans impact sur ceux-ci, avec ferrailles et impact sur ceux-ci) sont présentées dans le Tableau 2.

Les vitesses trouvées sont dans les trois cas proches de celles obtenues expérimentalement dans [5]. Sur la Figure 4, on observe la formation d'un cratère sur la face de sortie du missile, ce qui correspond qualitativement à ce qui est présenté dans [5]. Le deuxième calcul présenté Figure

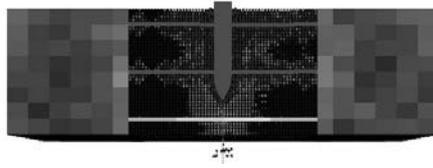


Figure 5 – Endommagement (zone SPH) et contraintes de Von-Mises (zone EF) de la dalle en béton avec ferrailages ($V_i=750\text{m/s}$) à $t=200\ \mu\text{s}$.



Figure 6 – Contraintes de Von-Mises de la dalle en béton avec ferrailages et impact sur les trois niveaux de renforts métalliques ($V_i=750\text{m/s}$) à $t=250\ \mu\text{s}$.

Cas étudié	Vitesse Résiduelle (m/s)
Sans ferrailages	585
Sans impact sur les ferrailages	550
Avec impact sur les ferrailages	500

Tableau 2 – Influence des ferrailages du béton armé sur la vitesse résiduelle de l'impacteur.

5, fournit une vitesse de sortie du projectile très proche de la première mais tout de même légèrement inférieure. Cela confirme le rôle joué pour les renforts métalliques qui viennent augmenter la résistance de la dalle à la perforation. On observe en effet qu'en présence de ferrailages le béton présente un endommagement réparti dans une zone plus large autour du point d'impact : les effets de l'impact sont mieux répartis sur la dalle qui résiste donc un peu mieux à la perforation du projectile. Le cas d'un projectile percutant les ferrailages est présenté Figure 6. La vitesse résiduelle obtenue est inférieure à celle de $V_r=605\text{m/s}$ présentée dans le Tableau [1], montrant une influence plus importante que prévue des ferrailages impactés par le projectile. Il faut cependant noter que les conditions de l'expérience présentées dans [5] ne sont pas parfaites contrairement à la simulation que l'on mène. En réalité, le missile percute les ferrailages avec un léger angle et pas exactement au centre des barres métalliques : ces conditions nous sont inconnues mais ont une grande influence sur la vitesse de sortie du projectile comme on a pu le comprendre en tentant de reproduire l'expérience. Dans le calcul présenté Figure 6, le missile impacte le premier niveau de ferrailages en un point légèrement décalé du centre des barres métalliques, ce qui explique la déviation observée ensuite dans sa trajectoire. Cependant, le même calcul en impactant les ferrailages avec un léger angle ou une distance plus ou moins grande du centre des barres métalliques donneraient des vitesses différentes tout en restant dans l'ordre de grandeur obtenu.

L'étude de ces trois cas permet de quantifier l'influence des renforts en acier dans la résistance de la dalle à l'impact. Il apparaît ainsi que les ferrailages n'augmentent que très légèrement la résistance de la dalle à la perforation lorsqu'ils ne sont pas percutés par le projectile. En revanche, ils jouent un rôle plus important lorsqu'ils sont percutés par le projectile mais ce rôle dépend largement de la manière dont le projectile impacte les barres métalliques. Ces conclusions recourent celles obtenues par Huang et al. dans [6]. Les cas correspondants à d'autres vitesses d'impact ne sont pas présentés ici mais il apparaît que le modèle utilisé fournit de très bonnes prédictions

pour les vitesses d'impacts élevées. Pour les vitesses d'impact faibles (de l'ordre de 300m/s), les vitesses résiduelles obtenues sont légèrement supérieures à celles observées expérimentalement montrant les limites de la loi d'endommagement utilisée et la nécessité d'un recalage de ses paramètres.

4 Conclusions

Une méthode simple permettant le couplage de modèles par multiplicateurs de Lagrange a été présentée et adaptée au collage d'un domaine décrit par une formulation continue d'EF de poutre avec un domaine décrit par une formulation discrète SPH. Ce couplage "armature EF- dalle SPH" offre au modèle un avantage d'ordre physique puisqu'il permet de représenter de manière explicite les renforts d'un matériau composite comme le béton armé. Il s'agit d'une nouvelle application des couplages de modèles. En effet, ceux-ci sont plus souvent utilisés pour obtenir des avantages numériques, notamment des réductions de temps de calculs. C'est l'objectif du deuxième couplage "dalle EF- dalle SPH" utilisé dans le modèle présenté Figure 3 et décrit dans [2][8][3]. Le modèle ainsi obtenu permet des calculs prédictifs sur les perforations de structures en béton armé et permet notamment l'analyse de l'efficacité des renforts métalliques. Des améliorations peuvent encore être apportées, notamment la prise en compte du frottements à l'interface entre le béton et l'acier des ferrillages et le recalage des paramètres de la loi d'endommagement utilisée pour le béton dans le cas des vitesses d'impact faibles.

Références

- [1] T. Belytschko, M. Neal. Contact-impact by the pinball algorithm with penalty and lagrangian-methods. *International Journal of Impact in Engeenering*, vol. 31, p.547-572, 1991.
- [2] H. Bendhia. Problèmes mécaniques multi-échelles : la méthode Arlequin. *C. R. de l'Académie des Sciences*, Série IIB, vol. 326, p. 899-904, 1998.
- [3] Y. Chuzel-Marmot, A. Combescure, R. Ortiz. Explicit dynamics 'SPH-Finite Element' coupling using the Arlequin method. Simulation of projectile's impacts on concrete slabs. *Revue Européenne de Mécanique Numérique*, N°5-7, Vol.17. p. 737 - 748, 2008.
- [4] Y. Chuzel-Marmot. Caractérisation expérimentale et simulation numérique d'impact de glace à haute vitesse. *Thèse de doctorat*, Ecole Doctorale MEGA de Lyon, 2008.
- [5] S. J. Hanchak, M. J. Forrestal, E. R. Young, J. Q. Ehrgott. Perforation concrete slabs 48MPa 7ksi 140MPa 20ksi unconfined compressive strengths. *International Journal of Impact in Engeenering*, vol. 12, p. 1-7, 1992.
- [6] F. Huang et al. A numerical simulation on the perforation of reinforced concrete targets. *International Journal of Impact in Engeenering*, 2005.
- [7] J. Mazars, A. Millard. A numerical simulation on the perforation of reinforced concrete targets. *Comportement dynamique des bétons et génie parasismique*, Paris : Lavoisier, 2004.
- [8] G. Rateau. Méthode Arlequin pour les problèmes mécaniques multi-échelles. Application à des problèmes de jonction et de fissuration de structures élancées. *Thèse de doctorat*, Ecole Centrale de Paris, 2003.