

## Prédiction de la pénétration dans une dalle en béton d'un missile rigide par la méthode aux éléments discrets

Wenjie SHIU\*, Frédéric Victor DONZÉ, Laurent DAUDEVILLE

Université Joseph Fourier, Laboratoire Sols Solides Structures - Risque (3S-R)  
BP53, 38041 GRENOBLE cedex 9, FRANCE

\*Auteur correspondant: [wen-jie.shiu@hmg.inpg.fr](mailto:wen-jie.shiu@hmg.inpg.fr) Tel. +33 (0)4 76 82 70 04  
Fax. +33 (0)4 76 82 70 00

### Résumé :

*Un modèle numérique 3D utilisant la méthode des éléments discrets a été développé pour prédire la profondeur de pénétration d'un missile impactant une dalle en béton armé. Le modèle a été calibré sur un essai d'impact de référence impliquant un missile à nez plat. Une fois le modèle calibré, des simulations numériques ont été réalisées en faisant varier seulement la forme du nez du missile. Les résultats numériques sont comparés avec les résultats expérimentaux réalisés par CEA-EDF et la loi de prédiction de Li. La bonne prédiction de la profondeur de pénétration par le modèle numérique est confirmée par les observations issues des essais expérimentaux.*

### Abstract :

*A three dimensional Discrete Element numerical model is developed to predict the penetration depth caused by a non-deformable missile against a reinforced concrete slab. The initial calibration of the model was done using a flat-nose missile test. Additional simulations were performed with varying the shape of the missile's nose. The present numerical model is compared to the experimental test data provided by the French Atomic Energy Agency (CEA) and the French Electrical power Company (EDF) and the Li's prediction law. The prediction of the penetration depth in terms of the nose shape agrees perfectly with the experimental observations.*

### Mots-clefs :

**méthode aux éléments discrets; pénétration; béton armé; missile**

## 1 Introduction

Les structures en béton sont souvent conçues pour résister à des impacts de fortes énergies, comme par exemple, des agressions sur des bâtiments avec des armes à haute énergie cinétique, des impacts de fragments de lame de turbine sur les structures nucléaires, des impacts de projectiles générés par des vents violents ou tout objet qui tombe accidentellement. Un modèle fiable pour la prédire la réponse de la structure est donc un point crucial pour traiter ce genre de problème.

Ce modèle doit pouvoir prendre en compte quatre phénomènes clefs pour mesurer les effets de l'impact local sur la structure (Degen, 1980; Hughes, 1984) : la profondeur de pénétration, les épaisseurs limites d'écaillage, de perforation et la limite balistique. La profondeur de pénétration est la distance parcourue par un missile dans la dalle sans perforation ni écaillage. Les épaisseurs limites d'écaillage et de perforation sont les épaisseurs minimum

d'une cible pour éviter l'écaillage ou la perforation de la dalle par le missile. La limite balistique est la vitesse minimum pour pouvoir perforer la cible.

La méthode des éléments discrets est une méthode numérique qui utilise une représentation discontinue de la matière, et qui présente l'avantage de décrire de façon aisée la forte dégradation (jusqu'à l'écoulement granulaire) du béton lorsqu'il est soumis à un impact. De plus, cette méthode ne privilégie aucune direction de création ou de propagation des fissures. Enfin, comme le milieu est fortement hétérogène, la description particulière est d'autant plus adaptée.

La formulation du modèle est détaillée dans le chapitre suivant. On notera que la procédure d'identification des paramètres locaux est d'abord réalisée en statique, par des tests de chargement uni-axiaux, de façon similaire à celle utilisée par Hentz (Hentz et al., 2003). Pour le comportement dynamique, le modèle est d'abord calibré sur un essai impliquant le missile à nez plat. Les résultats numériques pour différentes vitesses de missile ont ensuite été comparés avec les résultats expérimentaux en termes de trajectoire (Shiu et al., 2005). Ici, les simulations ont été réalisées pour étudier les effets de la forme du nez du missile.

## 2 LE MODELE AUX ELEMENTS DISCRETS

Le code PFC 3D (Particle Flow Code in Three Dimension, Itasca, 2003) a été utilisé pour simuler les essais d'impacts réalisés par le CEA/EDF.

Dans le code PFC3D, les éléments discrets sont de géométrie sphérique et une loi d'interaction de type force-déplacement est appliquée sur chaque élément. Les équations de mouvement sont :

$$F_i = K_i U_i \quad (1.a)$$

$$F_i = m (\ddot{x}_i - g_i) \quad (\text{translation motion}) \quad (1.b)$$

$$M_i = I \dot{\omega}_i \quad (\text{rotation motion}) \quad (1.c)$$

Où  $F_i$  est la force d'interaction,  $K_i$  la raideur associée à chaque élément,  $U_i$  l'interpénétration entre deux éléments en interaction,  $m$  la mass,  $\ddot{x}$  et  $\dot{\omega}$  les accélérations en translation et en rotation,  $g$  la gravité,  $M_i$  le moment résultant appliqué à chaque élément et  $I$  est le moment d'inertie. Pendant la simulation, la force d'interaction est d'abord calculée (l'équation (1.a)), et la nouvelle position de l'élément est ensuite mise à jour par l'équation (1.b) et (1.c). Des informations plus détaillées sont disponibles dans le manuel de PFC3D.

Pour simuler un matériau cohésif, un type de lien « parallel-bond » est disponible dans PFC3D qui permet de transférer une force d'interaction incluant le moment. La force appliquée par ce type de lien est calculée par la théorie des poutres. La dissipation d'énergie est prise en compte dans le modèle numérique. L'énergie induite entre deux éléments en interaction est dissipée par une friction Coulombienne et un amortissement non-visqueux.

### 2.1 Configuration numérique

**La cible en béton armé:** Les barres de renfort sont montrées à la figure 1. Chaque barre est composée d'une ligne d'éléments discrets. Les éléments de béton sont générés de façon désordonnée autour des barres de renfort en appliquant une contrainte isotrope sur l'échantillon. Les « parallel-bonds » sont ici pris en compte.

La procédure suivante a été adoptée pour générer la cible :

1. Générer six murs (une boîte) qui correspondent aux dimensions de la cible, i.e.  $1.46\text{m} * 1.46\text{m} * 0.208\text{m}$  (sauf pour deux essais, pour lesquels les dimensions sont :  $1.46\text{m} * 1.46\text{m} * 0.416\text{m}$ ).
2. Générer les éléments de renfort et fixer leurs positions en rotation et en translation.
3. Générer les éléments de béton de façon désordonnée. Pendant cette étape, seul le déplacement des éléments de béton est autorisé. Le calcul se termine lorsque le critère de stabilité est atteint.
4. Création des « parallel-bonds » entre les éléments en interaction et suppression des deux murs : face avant et face arrière.
5. Enfin, autorisation du déplacement les éléments de renfort.

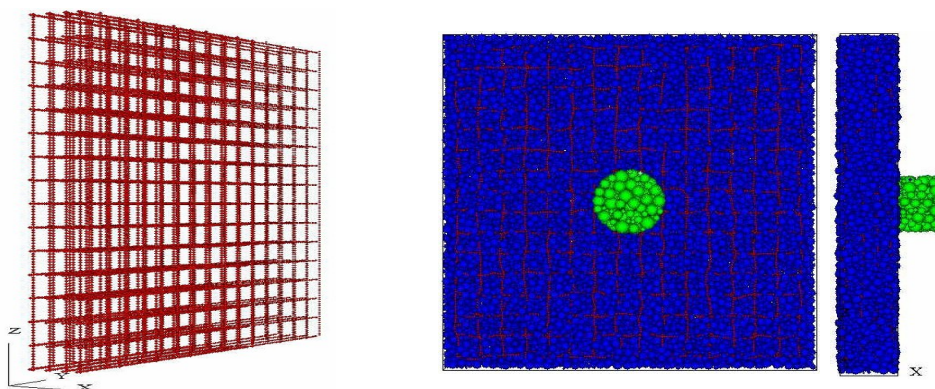


Figure 1. A gauche, les quatre couches de renfort représentées par 17408 éléments. A droite, la configuration initiale de la dalle et le missile.

Cette procédure nous permet d'éviter une force d'interaction résiduelle indésirable pendant la génération de l'échantillon. Les éléments représentant le béton sont au nombre de 19403, avec des rayons qui varient entre 0.5 et 2 cm.

**Le missile:** la géométrie est la plus proche possible que celle des essais expérimentaux. La commande "clump" (clusters d'éléments discrets) est utilisée pour simuler le missile indéformable. Le diamètre et la masse du missile sont les mêmes que ceux des essais expérimentaux. Le missile est positionné initialement juste en face avant de la cible (Fig.1).

### 3 Simulation des essais impacts

#### 3.1 Essais CEA-EDF

Les données des essais expérimentaux sont ceux des essais CEA-EDF (Berriaud et al. 1978). Dans les années 1970, le CEA et EDF ont fait une série d'essais d'impacts à l'aide d'un canon de marine. L'épaisseur de la cible a été conçue de façon à représenter celle d'une centrale nucléaire. Les propriétés du béton sont gardées constantes. Les autres paramètres comme la vitesse d'impact (25 - 450 m/s), la masse du missile (20 - 300 kg), le rapport entre le diamètre du missile et l'épaisseur de la dalle (0.24 – 2.9), et la géométrie du nez du missile ont été étudiés.

#### 3.2 Effet de la forme de nez du missile

La forme du nez du missile joue un rôle important lorsqu'un missile est lancé contre une dalle en béton armé. Avant que la simulation numérique soit disponible, plusieurs lois empiriques avaient déjà été développées pour prévoir la pénétration et la perforation d'un

missile lors d'un impact. La plupart de ces lois empiriques reposent sur une méthode de régression numérique basée sur les données expérimentales. Dans ces lois, la forme du nez du missile est souvent prise en compte par un coefficient qui représente l'angulation de la tête du missile. Néanmoins, ces caractérisations géométriques se sont révélées insuffisantes pour bien représenter l'effet de la forme du nez du missile. Une amélioration est apparue en 2002, quand Q.M. Li (Li, 2002) a proposé une fonction représentant la forme de nez pour interpréter analytiquement la force de contact entre le missile et la cible pendant l'impact.

Dans notre étude, une comparaison est faite entre le modèle MED et la loi de Prédiction de Li en termes de capacité de pénétration. Les comparaisons sont limitées au nez conique dont la longueur est variable. L'essai d'impact de référence avec le nez plat possède une masse de 227 kg, une vitesse d'impact de 90 m/s et un diamètre de 0.305 m. A partir de ce cas de référence, trois missiles « numériques » coniques ont été générés avec différentes longueurs de tête (0.1 m, 0.2 m, 0.25 m) tout en conservant, la même masse, le même diamètre et la même vitesse d'impact.

	épaisseur de la cible (m)	forme du nez	vitesse d'impact (m/s)	profondeur de penetration (cm)
Tests expérimentaux	0.4	conique	88	23
	0.4	conique	82	20
	0.4	plat	90	17~20
Tests numériques	0.4	plat	90	17
	0.4	conique 0.1	90	14.3
	0.4	conique 0.2	90	23
	0.4	conique 0.25	90	27
	0.8	plat	90	7.3
	0.8	conique 0.1	90	14.2
	0.8	conique 0.2	90	19.9
	0.8	conique 0.25	90	25

Table 1. Résultats des essais expérimentaux et numériques

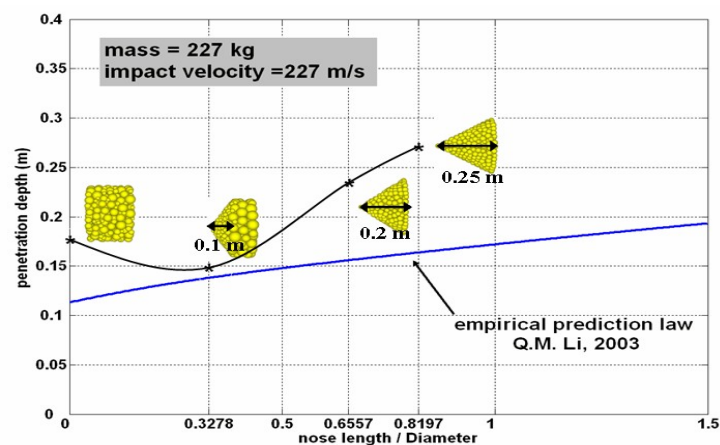


Figure 2. Profondeur de la pénétration en fonction de la forme de nez du missile

Le tableau 1 montre les profondeurs de pénétration obtenues par le modèle numérique et les tests réalisés par le CEA-EDF. Les tests expérimentaux étant assez peu nombreux pour les têtes coniques, les résultats numériques sont comparés avec la loi de prédiction de Q.M. Li. Les résultats sont montrés sur les figures 2 et 3. La loi de Prédiction de Li (Li et Tong, 2003) montre que plus le missile est pointu, plus il peut pénétrer profondément. Le fait est bien expliqué si on se place sous l'angle de la consommation d'énergie : quand les deux missiles consomment la même quantité de l'énergie, celui qui est plus pointu peut pénétrer d'avantage. Cependant, le résultat numérique montre que, pour une cible dont l'épaisseur est de 40 cm, le missile avec un nez plat d'un diamètre de 30 cm, pénètre plus qu'un missile conique de longueur de 10 cm. Ce phénomène peut s'expliquer par la propagation des ondes de pression (Magnier et Donzé, 1998).

Lorsqu'un missile vient impacter la cible, une partie de l'énergie d'impact est convertie en ondes de pression. Si la cible a une épaisseur comparable au diamètre du missile, cette conversion d'énergie est plus importante dans le cas d'un missile à nez plat que dans celui d'un missile à nez conique. En effet, en raison de l'importance de la traction liée à la réflexion des ondes en face arrière, la profondeur de l'écaillage rejoint la zone de pénétration du missile à nez plat (Figure 4). Dans ce cas de configuration, apparaît un paramètre important qui est le rapport entre le diamètre du missile et l'épaisseur de la cible. Si l'on génère une autre cible avec une épaisseur plus importante, cet effet de « détente » des ondes réfléchies tend à disparaître.

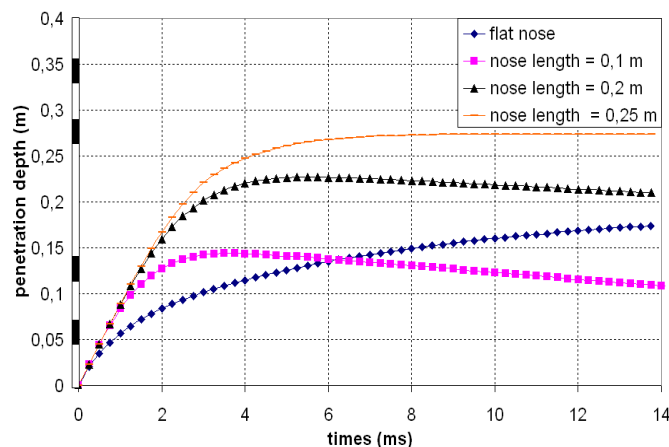


Figure 3. Trajectoire du missile (résultats numériques)

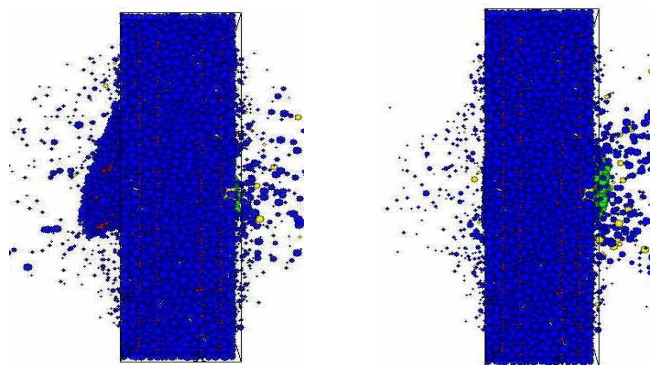


Figure 4. Images capturées à la fin de la simulation. A gauche, un missile à nez plat (l'écaillage est important), à droite un missile avec une longueur de nez de 10 cm (pas d'écaillage).

#### 4. Conclusion

L'avantage de l'utilisation la MED est d'une part, la prise en compte de la nature hétérogène du béton et d'autre part, de pouvoir simuler la sollicitation du milieu à l'échelle de la structure. De plus, le modèle éléments discrets peut prendre en compte la réponse complète de la structure jusqu'à sa ruine. La loi de comportement locale est simple à formuler et reste proche d'une formulation macroscopique. L'identification des paramètres est d'abord issue d'une technique de calibration quasi-statique, puis une calibration dynamique est réalisée sur un cas de référence.

Les résultats numériques issus de la modélisation des essais d'impact du CEA-EDF montrent que le modèle aux éléments discrets est capable de reproduire quantitativement la réponse de la cible en termes de pénétration, d'écaillage de perforation.

De plus, à travers les études sur l'influence de la forme du nez du missile, le modèle montre l'importance de cette géométrie pour la perforation des cibles dont l'épaisseur est du même ordre de grandeur que le diamètre du missile. Dans cette configuration là, le modèle numérique semble plus performant que les lois de prédiction classiques. Notons que si l'épaisseur de la cible augmente, les résultats numériques montrent une profondeur de pénétration comparable à celle prévue par les lois de prédiction semi-empiriques classiques.

#### Références

- Berriaud, C., Sokolovsky, A., Gueraud, R., Dulac, J. and Labrot, R. 1978. Local behavior of reinforced concrete walls under missile impact, *Nuclear engineering and Design*, 45(2), 457-469.
- Degen, P.P., 1980. Perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles, *ASCE Journal of the Structural Division*, 106(7), 1623-1642.
- Hentz, S., Daudeville, L. and Donzé, F.V. 2003. Identification and validation of a discrete element model for concrete, *Journal of Engineering Mechanics*. 130(6), 709-719.
- Hughes, G. 1984. Hard missile impact on reinforced concrete. *Nuclear engineering and Design*. 77(1), 23-35.
- Li, Q.M. and Tong, D.J. 2003. Perforation thickness and ballistic limit of concrete target subjected to rigid projectile impact, *Journal of Engineering Mechanics*. 129(9), 1083-1091.
- Li, Q.M., Reid, S.R., Wen, H.M. and Telford, A.R. 2006. Local impact effects of hard missiles on concrete targets, *International Journal of Impact Engineering*, 32(1-4), 224-284.
- Magnier, S.A. and Donzé, F.V. 1998. Numerical simulations of impacts using a discrete element method, *Mechanics of cohesive-frictional materials*, 3(3), 257-276.
- PFC<sup>3D</sup> (Particle Flow Code in 3 Dimensions), Version 3.0. 2003. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota.
- Shiu, W, F.V. Donzé and L. Daudeville, 2005, Missile impact on a concrete slab: a 3D discrete element study, Annual report "Discrete Element Group for Hazard Mitigation", [http://geo.hmg.inpg.fr/frederic/Discrete\\_Element\\_Group\\_FVD.html](http://geo.hmg.inpg.fr/frederic/Discrete_Element_Group_FVD.html)