



**HAL**  
open science

## Simulation numérique de l'endommagement de dalles en béton armé impactées par un réacteur d'avion idéalisé

Guillaume Hervé, Fabrice Gatuingt

### ► To cite this version:

Guillaume Hervé, Fabrice Gatuingt. Simulation numérique de l'endommagement de dalles en béton armé impactées par un réacteur d'avion idéalisé. 7e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01456762

**HAL Id: hal-01456762**

**<https://hal.science/hal-01456762>**

Submitted on 5 Feb 2017

**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.

---

# Simulation numérique de l'endommagement de dalles en béton armé impactées par un réacteur d'avion idéalisé

**Guillaume Hervé et Fabrice Gatuingt**

*LMT, ENS Cachan  
61, avenue du Président Wilson  
94235 Cachan, France  
gatuingt@lmt.ens-cachan.fr*

---

*R...SUM... Dans ce papier, nous présentons des simulations numériques d'impact de réacteurs d'avions idéalisés sur des structures en béton armé. Cet impact induit des phénomènes d'endommagement locaux de la structure. Ceux-ci peuvent se caractériser par une cratérisation de la dalle béton sous l'impact, un phénomène d'écaillage en face arrière et éventuellement une perforation de celle-ci par le réacteur lui même. Dans un contexte industriel, ce problème est en général traité par des formules empiriques qui ne prennent pas en compte l'interaction entre le projectile et la dalle. Nous montrons ici que des simulations numériques à l'aide d'une loi de comportement de béton adaptée permettent de rendre compte de l'interaction entre le projectile et la structure et ainsi de mieux appréhender les phénomènes locaux.*

*ABSTRACT. In this paper, we present numerical simulations of impact of idealized planes engines on reinforced concrete structures. This impact produce local damage phenomena of the structure. Those can be characterized by a cratering of the concrete slab under the impact, a phenomenon of scabbing on the opposite face and possibly a perforation by the engine. In an industrial context, this problem is in general dealt with empirical formulas which do not take into account the interaction between the projectile and the slab. We show here that numerical simulations using a concrete behavior adapted make it possible to account for the interaction between the projectile and the structure and thus to better apprehend the local phenomena.*

*MOTS-CL...S : loi de comportement de béton, dynamique rapide, impact, calcul de structures*

*KEYWORDS: concrete constitutive model, high-rate dynamique, impact, structural analysis*

---

## 1. Introduction

Lors de l'impact d'un avion sur une structure en béton armé, nous sommes en présence de deux types d'impact. Le premier concerne l'impact du fuselage sur la structure et se traduit principalement par l'application d'un effort réparti sur une surface assez grande en regard de la dimension de la structure. Ceci se traduit par un ébranlement de la structure, et une réponse qui se rapproche plus des phénomènes sismiques. Le second type d'impact concerne les réacteurs qui induisent, eux, des phénomènes d'endommagement locaux de la structure. L'endommagement de la structure peut se caractériser par une cratérisation de la dalle béton sous l'impact, un phénomène d'écaillage en face arrière due à la réflexion des ondes de compression dans l'épaisseur de la dalle et éventuellement une perforation de celle-ci par le réacteur lui même. De manière générale, ces problèmes sont généralement traités en considérant que les réacteurs d'avions sont des projectiles rigides et par application de formule empirique. Or Sugano *et al.* [SUG 93] ont montré qu'il était important de considérer que les réacteurs n'étaient pas des solides rigides mais qu'ils pouvaient avoir une déformation non négligeable sur la réponse de la structure.

L'objet de la présente étude est de réaliser des simulations numériques des essais réalisés par [SUG 93] afin de valider l'intégration numérique ainsi que le modèle de comportement développé par [GAT 02]. Cette loi de comportement s'appuie sur modèle de comportement couplant un modèle de plasticité avec une surface seuil de type Gurson (qui permet de prendre en compte l'évolution de la porosité du matériau) et un modèle d'endommagement scalaire (qui permet de rendre compte des dégradations par traction).

Trois types d'essais ont été simulés à l'aide du code explicite LS-DYNA, dans lequel la loi de comportement avait été préalablement implantée [HER 05]. De même, afin de voir l'influence de la rigidité du réacteur sur la réponse locale de la structure, différents types de projectiles ont également été testés.

Nous montrons ainsi, que la modélisation proposée permet de rendre compte des différents phénomènes locaux qui interviennent lors de l'impact d'un réacteur d'avion sur une structure en béton armé, ceci grâce à la pertinence de la loi de comportement utilisée. Ceci est également dû à l'implantation numérique robuste associée à l'utilisation d'un code de calcul explicite qui permet de gérer efficacement les problèmes de contact en non-linéaire.

## 2. Comportement du béton

Lors d'un impact, les dégradations du béton peuvent être dues à plusieurs phénomènes. Le premier est une réduction de porosité juste sous l'impacteur, puis se forment des déformations de cisaillement importante qui peuvent induire la pénétration de celui-ci et enfin un écaillage en face arrière dû à une rupture en traction. Afin de représenter les deux premiers phénomènes nous utilisons un modèle de viscoplasticité avec une surface seuil de Gurson modifiée par Needleman et Tvergaard [NEE 84]. Pour le troisième phénomène nous utilisons un modèle de visco-endommagement sca-

laire [GAT 02].

Nous obtenons donc une relation entre la contrainte et la déformation élastique suivante :

$$\sigma_{ij} = (1 - D) \left[ K \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij} + 2G \left( \varepsilon_{ij}^e - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij} \right) \right] \quad [1]$$

où  $G$  et  $K$  sont respectivement le module de cisaillement et le module de compressibilité.

Le modèle d'endommagement, issu de [MAZ 86], a été modifié afin de prendre en compte des effets de vitesse :

$$\dot{D} = \left( \frac{\langle F_D \rangle}{m_D} \right)^{n_D} \quad [2]$$

Cet endommagement est piloté par le critère d'endommagement suivant :

$$F_D = \tilde{\varepsilon}^e - \varepsilon_{D0} - \frac{1}{a} \left( \frac{D}{1-D} \right)^{(1/b)} \quad [3]$$

où  $\tilde{\varepsilon}^e = \sqrt{\sum_i (\varepsilon_i^e)^2}$  est la déformation équivalente élastique,  $\varepsilon_{D0}$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $m_D$ ,  $n_D$  sont des paramètres matériau.

Pour le modèle de viscoplasticité nous utilisons un multiplicateur plastique qui prend en compte la porosité du matériau :

$$\dot{\lambda} = \frac{f^*}{(1-f^*)} \left\langle \frac{F_{NT}}{m_{vp}} \right\rangle \quad [4]$$

où  $m_{vp}$  est un paramètre matériau. Les déformations viscoplastique sont obtenues en suivant une approche de Perzyna :

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \dot{\lambda} \frac{\partial F_{NT}}{\partial \sigma_{ij}} \quad [5]$$

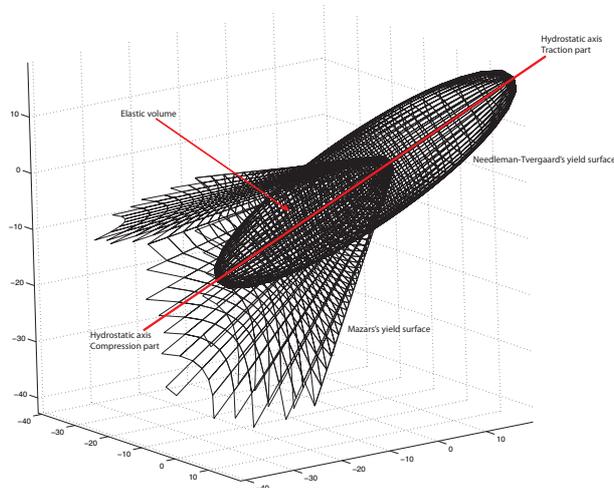
où  $F_{NT}$  est la surface seuil de Gurson modifiée par Needleman et Tvergaard [NEE 84] :

$$F_{NT}(\sigma_{ij}, \sigma_M, f^*) = \frac{3J_2}{\sigma_M^2} + 2q_1 f^* \cosh \left( q_2 \frac{I_1}{2\sigma_M} \right) - (1 + (q_3 f^*)^2) = 0 \quad [6]$$

où  $\sigma_M$  est la contrainte dans le béton sans pore et  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  sont des paramètres scalaires.

La figure 1 montre le découplage des deux surfaces seuil utilisées. Ainsi lors d'un chargement majoritairement de traction seuil la surface seuil de Mazars sera activée. A l'inverse pour un chargement de type pression hydrostatique, seule la surface seuil de Needleman et Tvergaard sera utilisée.

Les applications visées par l'utilisation de cette loi nous ont conduit à l'implanter dans un code de calcul aux éléments finis explicite LS-DYNA. Pour les détails de l'implantation numérique se référer à [HER 05].



**Figure 1.** Surface seuil de Needleman-Tvergaard et de Mazars dans l'espace des contraintes

### 3. Simulation des essais du Laboratoire Sandia

Afin de tester la robustesse de l'implantation numérique et de vérifier la pertinence des équations constitutives du modèle de comportement, nous avons réalisé des simulations numériques d'essais d'impact réalisés au Sandia Laboratory par Sugano *et al.* [SUG 93].

Afin de suivre le programme d'essai, nous avons simulé l'impact d'un moteur d'avion idéalisé de plusieurs tailles. Nous nous sommes particulièrement attaché à simuler des projectiles LED, MED et SER qui correspondent respectivement à Large size Equivalent et Deformable, Medium size Equivalent et Deformable et enfin Small size Equivalent Rigid. Les détails des projectiles sont présentés à la figure 2.

Ces projectiles impactent trois dalles différentes dépendant du type de ceux-ci. Les dalles utilisées pour nos simulations sont de deux types : petite ( $1,5m \times 1,5m$ ) ou grande ( $7m \times 7m$ ) Vu le nombre important de test réalisés, nous avons choisi de simuler uniquement ceux présentés à la table 1. Dans nos simulations, les projectiles sont modélisés par des éléments de coque de Belytschko-Lin-Tsay sauf pour le projectile SED qui est maillé en éléments 3D. Les dalles sont maillées en utilisant des éléments sous-intégrés 3D, les armatures sont représentées par des éléments barres. Dans chaque cas, le pourcentage d'armature par rapport au volume de béton est de 0.4% dans chaque direction.

Toutes les simulations ont été interrompues lorsque la vitesse du projectile arrêtait de décroître, ce qui signifiait soit qu'il était planté dans la dalle, soit que celle-ci était complètement endommagée et n'opposait plus de résistance à la perforation. Un exemple de l'état d'endommagement des dalles est donné à la figure 3 pour l'essai

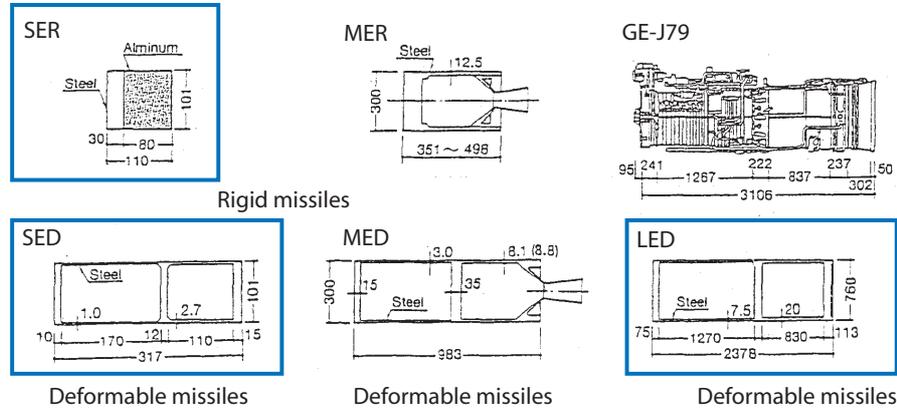


Figure 2. Les six projectiles utilisés lors des essais

Tableau 1. Caractéristiques des tests simulés

No.	Projectile	Vitesse (m/s)	Épaisseur dalle (m)	% armature	Type dalle
S10	SER	141	0.15	0.4	Petite
S28	SED	196	0.06	0.4	Petite
L5	LED	214	1.60	0.4	Grande

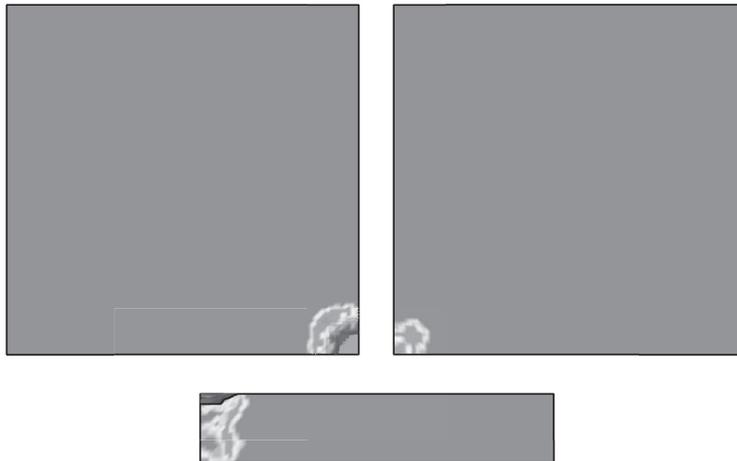
S10. Les résultats qualitatifs des simulations (identiques aux essais) sont donné au tableau 2

Tableau 2. Résultats qualitatifs des simulations

No.	Perforation	Ecaillage	Pénétration
S10	Non	Oui	Oui
S28	Oui	Oui	Oui
L5	Non	Ques fissures	Oui

#### 4. Conclusions

Nous avons rappelé ici un modèle de comportement capable de représenter les différents mécanismes de dégradation du béton rencontrés lors d'un impact sur une dalle. Deux surfaces seuils sont utilisées pour une représentation pertinente de ces mécanismes. Plusieurs simulations numériques ont été présentées et montrent que des simulations numériques "réalistes" à l'aide d'une loi de comportement de béton adaptée permet de rendre compte de l'interaction entre le projectile et la structure et ainsi



**Figure 3.** Endommagement de la dalle pour le test S10 – Vues de dessus, dessous, coté

de mieux appréhender les phénomènes locaux. Ces simulations ont également prouvé la robustesse de l'implantation numérique lors de simulations complexes.

#### 4.1. Bibliographie

- [GAT 02] GATUINGT F, PIJAUDIER-CABOT G., ' Coupled damage and plasticity modelling in transient dynamic analysis of concrete <sup>a</sup>, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomec.*, vol. 26, 2002, p. 1–24.
- [HER 05] HERVÉ G., GATUINGT F., IBRAHIMBEGOVIC A., ' On numerical implementation of a coupled rate dependent damage-plasticity constitutive model for concrete in application to high-rate dynamics <sup>a</sup>, *Engineering Computations*, à paraître, 2005.
- [NEE 84] NEEDLEMAN A., TVERGAARD V., ' An analysis of ductile rupture in notched bars <sup>a</sup>, *Journal of Physics and mechanics of Solids*, vol. 32, 1984, p. 461–490.
- [MAZ 86] MAZARS J., ' A description of micro and macroscale damage of concrete structures <sup>a</sup>, *Journal Engineering Fracture of Mechanics*, vol. 25, 1986, p. 729–737.
- [SUG 93] SUGANO T., TSUBOTA H., KASAI Y., KOSHIKA N., OHNUMA H., VON RIENSEMANN W.A., BICKEL D.C., PARKS M.B., ' Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles – Part 1. Test program, method and results – Part 2. Evaluation of test results <sup>a</sup>, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 140, 1993, p. 387–423.