



**HAL**  
open science

## Modélisation mésoscopique du béton sous impact

Benjamin Erzar, Pascal Forquin

► **To cite this version:**

Benjamin Erzar, Pascal Forquin. Modélisation mésoscopique du béton sous impact. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592909

**HAL Id: hal-00592909**

**<https://hal.science/hal-00592909>**

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.

# Modélisation mésoscopique du béton sous impact

B. Erzar<sup>1</sup>, P. Forquin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA, DAM GRAMAT, F-46500, Gramat, France, benjamin.erzar@cea.fr

<sup>2</sup> LEM3, Université Paul Verlaine - Metz, France, forquin@univ-metz.fr

---

**Résumé** — Le béton est un matériau difficile à modéliser à cause de sa nature à la fois fragile et hétérogène. La modélisation mésoscopique présentée est un outil utilisé pour affiner l'échelle d'analyse et étudier l'importance de la microstructure sur la réponse mécanique, particulièrement lorsque le chargement appliqué est très rapide. Des essais d'écaillage et d'impact sur la tranche menés au LEM3 ont ainsi été modélisés en utilisant un modèle d'endommagement anisotrope permettant de prévoir la fragmentation du béton sous impact.

**Mots clefs** — Barre de Hopkinson, Traction dynamique, hautes vitesses de déformation.

---

## 1 Introduction

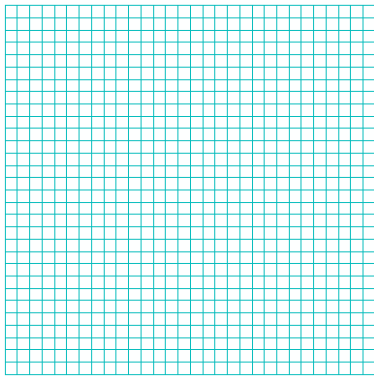
L'accroissement spectaculaire de la puissance de calcul au cours des dernières années permet d'envisager une modélisation de structures ou d'éprouvettes sollicitées sous chargement dynamique prenant en compte certains types d'hétérogénéités présentes au sein du matériau étudié. L'approche mésoscopique mise en œuvre dans ce travail permet de décrire un béton numérique biphasique pour lequel les plus gros granulats et la matrice cimentaire sont différenciés. Ce type d'approche, déjà mise en œuvre dans la littérature [1-2] pour simuler le comportement des bétons, n'a trouvé que quelques applications en dynamique rapide et très souvent en 2D à cause du coût de calcul important [3-4].

Dans ce travail, une technique de création de maillage mésoscopique tridimensionnel mise au point au CEA - Gramat a été utilisée pour approcher la mésostructure réelle d'un béton ordinaire, le béton R30A7. Ce béton a récemment fait l'objet de plusieurs campagnes expérimentales dans le cadre des travaux menés au sein du Pôle de Recherche sur la Vulnérabilité des Infrastructures (PREVI) [5-7].

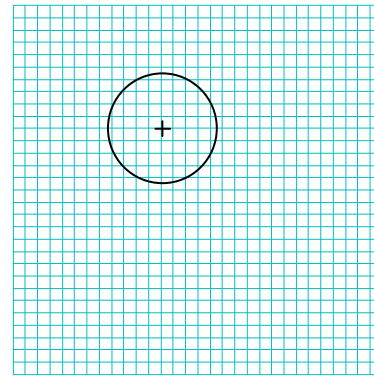
## 2 Modélisation mésoscopique du béton

### 2.1 Algorithme de distribution granulaire

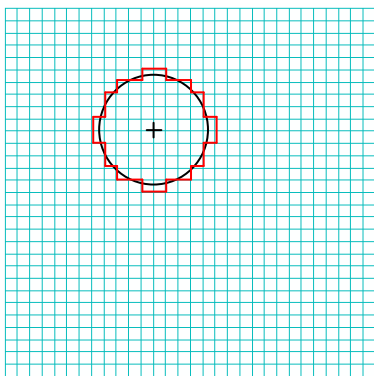
Un maillage biphasique est utilisé pour approcher la mésostructure réelle : les gros granulats de diamètre supérieur à 2 mm (qui représentent environ 40% du volume total) sont représentés par des ensembles d'éléments cubiques composant des sphères, le reste des éléments correspond à la matrice supposée homogène qui représente donc l'assemblage de pâte de ciment, de sable et des petits granulats ainsi que des porosités et microfissures. La distribution des granulats du béton numérique composée de six classes est similaire à celle du béton R30A7. On commence par discrétiser le volume (Étape 1, Fig. 1). Pour chaque classe, on place un à un les granulats. On tire aléatoirement un rayon de granulat  $r_G$  et une position dans le volume (Étape 2, Fig. 1). On vérifie ensuite qu'aucune superposition n'intervient avec un granulat précédemment placé. Si aucun problème d'interpénétration n'est détecté, on assigne alors aux éléments cubiques contenus dans la sphère de rayon  $r_G$  les propriétés des granulats (Étape 3, Fig. 1). Le volume occupé par ce granulat est ajouté à ceux de la même classe déjà placés. Cette opération est répétée jusqu'à ce que toutes les classes définies soient remplies. La Figure 2 présente une comparaison entre la distribution nominale (entrée par l'utilisateur) et la distribution finale du béton numérique.



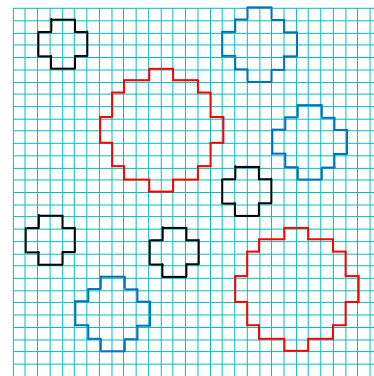
Etape 1. Création du maillage composé d'héxaèdres réguliers



Etape 2. Tirage de la position et du rayon d'un granulat G



Etape 3. Vérification qu'aucune superposition n'existe avec un granulat du maillage et assignation des éléments à la composition du granulat G



Etape 4. On répète la procédure afin de remplir chaque classe de granulats pour composer le béton numérique

FIG. 1 – PROCEDURE DE MAILLAGE MESOSCOPIQUE – ILLUSTRÉE EN 2D

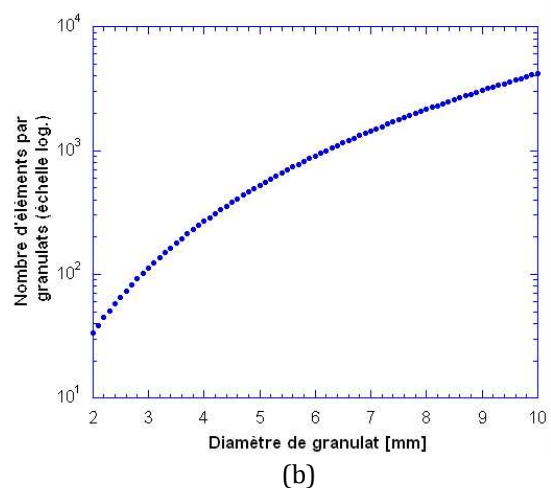
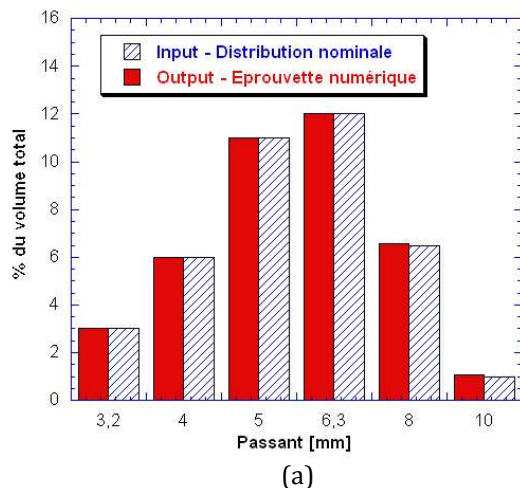


FIG. 2 – (a) HISTOGRAMME CARACTERISTIQUE DE LA DISTRIBUTION DE GRANULATS DU R30A7 COMPAREE AU MAILLAGE MESOSCOPIQUE ET (b) NOMBRE MOYEN D'ÉLÉMENTS DISCRETISANT LES GRANULATS DE CHAQUE CLASSE (TAILLE DE MAILLE : 0,5 MM)

Dans les simulations numériques mésoscopiques réalisées dans le cadre de ce travail, les inclusions ont été supposées parfaitement élastiques à cause de leur très haute résistance face à la matrice

cimentaire. Ces granulats sont principalement composés de silicates, leurs propriétés élastiques ont donc été assimilées à celles obtenues par Sellers et Scheele [8] sur du  $\text{SiO}_2$ , c'est-à-dire  $E_G = 70 \text{ GPa}$  et  $\nu_G = 0,2$ . Le comportement de la matrice du béton numérique est identifié par approche inverse à partir des données expérimentales disponibles pour le béton R30A7. Cette matrice représente à la fois la pâte de ciment, les petits granulats et le sable ainsi que les porosités et la microfissuration. Une taille de maille de 0,5 mm a été utilisée pour chacune des simulations afin d'assurer un compromis entre discrétisation du plus petit granulat modélisé (de 2 mm de diamètre) et coût de calcul. Le nombre d'éléments finis par granulat est reporté sur la Figure 2b, on peut y voir que les principales classes granulaires (entre 4 et 8 mm) sont bien discrétisées (268 éléments maillent un granulat de diamètre 4 mm). Nous avons donc entrepris d'identifier les propriétés élastiques de la matrice qui permettent d'obtenir un béton numérique présentant un comportement mécanique similaire à celui du béton réel R30A7.

## 2.2 Identification du comportement mécanique du béton

### 2.2.1 Identification des propriétés élastiques de la matrice numérique

Afin d'identifier le comportement élastique de la phase « matrice », des simulations numériques ont été menées sur Abaqus/explicite. Par un processus itératif mené sur une éprouvette de béton numérique (Figure 3), le module d'Young et le coefficient de Poisson de la matrice ont été déterminés pour que le béton numérique présente un comportement élastique similaire à celui du béton R30A7. Par la suite, ces paramètres ont été validés sur des éprouvettes numériques ayant des volumes plus importants.

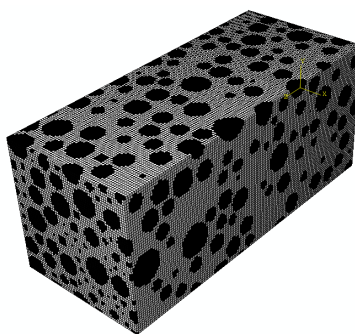


FIG. 3 – EPROUVETTE DE BETON NUMERIQUE UTILISEE POUR IDENTIFIER LE COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA MATRICE (TAILLE DE MAILLE : 0,5 MM)

### 2.2.2 Identification des propriétés de la matrice numérique sous confinement

Le modèle de Krieg-Swenson-Taylor [9-10] permettant de modéliser, d'une part, le phénomène de compaction, et d'autre part, l'augmentation de résistance sous fort confinement des géomatériaux a été identifié par approche inverse à partir de l'éprouvette présentée sur la Figure 3. La figure 4 illustre la corrélation expérience / calcul ainsi obtenue pour un chargement œdométrique dans les cas sec et saturé.

### 2.2.3 Identification du comportement en traction dynamique

Basé sur la description phénoménologique du processus de fragmentation dynamique des matériaux fragiles, le modèle Denoual-Forquin-Hild [11-12] a été utilisé pour modéliser le comportement du béton R30A7 en traction dynamique. La fragmentation de ce béton ayant lieu

principalement dans la matrice, c'est à cette dernière que les paramètres du modèle identifiés pour le béton R30A7 [13] ont été appliqués.

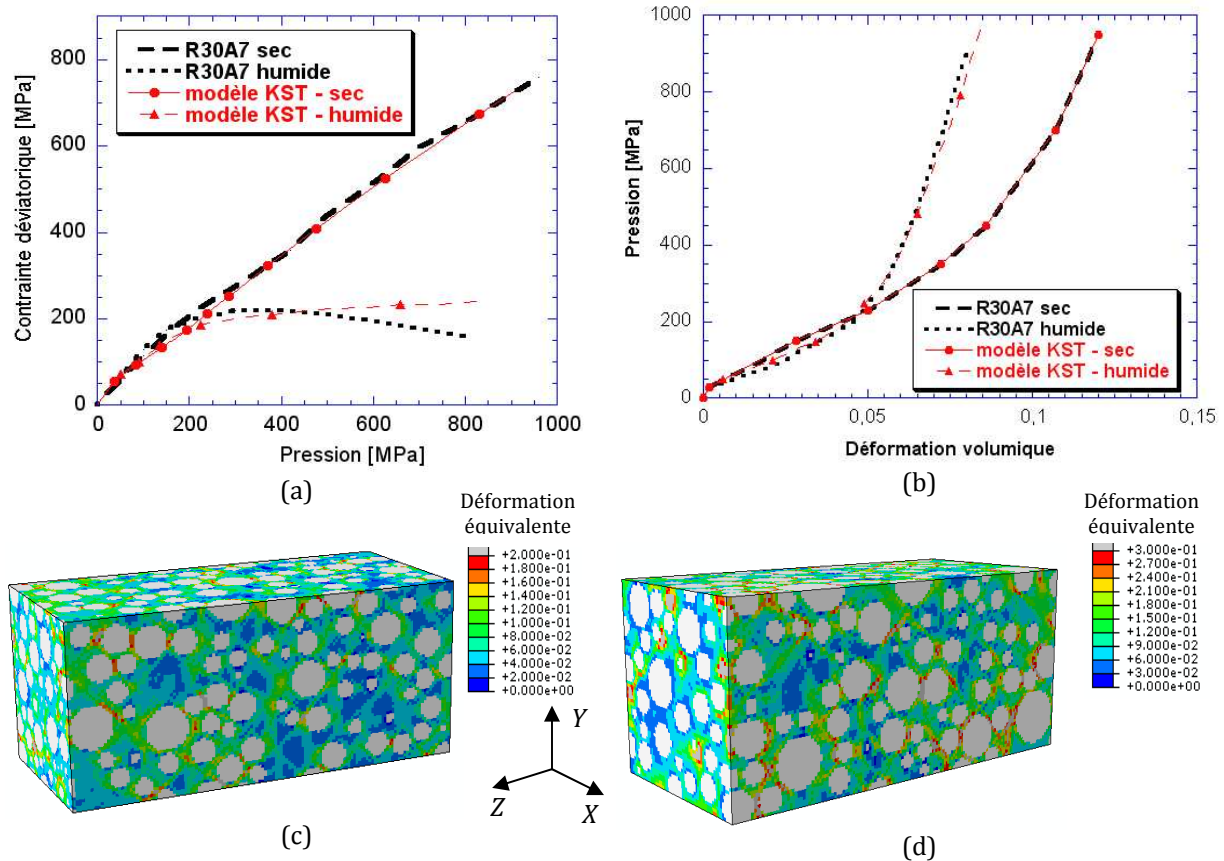


FIG. 4 – MODELE KST COMPARE AUX RESULTATS D'ESSAIS QUASI-OEDOMETRIQUE OBTENUS SUR LE R30A7 [5]: (a) COMPORTEMENT DEVIATORIQUE ET (b) LOI DE COMPACTION ; EPROUVETTES DE BETON NUMERIQUE (c) HUMIDE ET (d) SECHE SUBISSANT UN ESSAI OEDOMETRIQUE (CHARGE SUIVANT -Z, LE DEPLACEMENT DES FACES EXTERIEURES EST BLOQUE SUIVANT LEUR NORMALE)

### 3 Simulation numérique d'essais dynamiques sur béton

#### 3.1 Traction dynamique par écaillage

L'essai d'écaillage permet de caractériser le béton en traction dynamique à de hautes vitesses de chargement [13-15]. Cet essai transitoire repose sur le chargement axial d'une éprouvette cylindrique par un pulse de compression (par l'intermédiaire de l'impact d'un projectile sur une barre d'Hopkinson ou directement par un impacteur). Cette onde se propage et se réfléchit sur la face libre opposée en une onde de traction menant à la fragmentation de l'éprouvette. Ce type d'essai a été mené au LEM3 sur le béton R30A7 [13]. Le maillage de l'éprouvette de diamètre 46 mm et de 140 mm de longueur est composé de 1 867 040 éléments cubiques. Les pulses de chargement reconstitués sont présentés sur la Figure 5, ils ont été appliqués à l'une des faces extrêmes du cylindre numérique.

Les endommagements prévus par le modèle peuvent être comparés aux éprouvettes infiltrées post-mortem (Figure 6). On distingue plusieurs fissures sur une zone centrale de longueur tout à fait similaire à la zone endommagée sur les éprouvettes expérimentales.

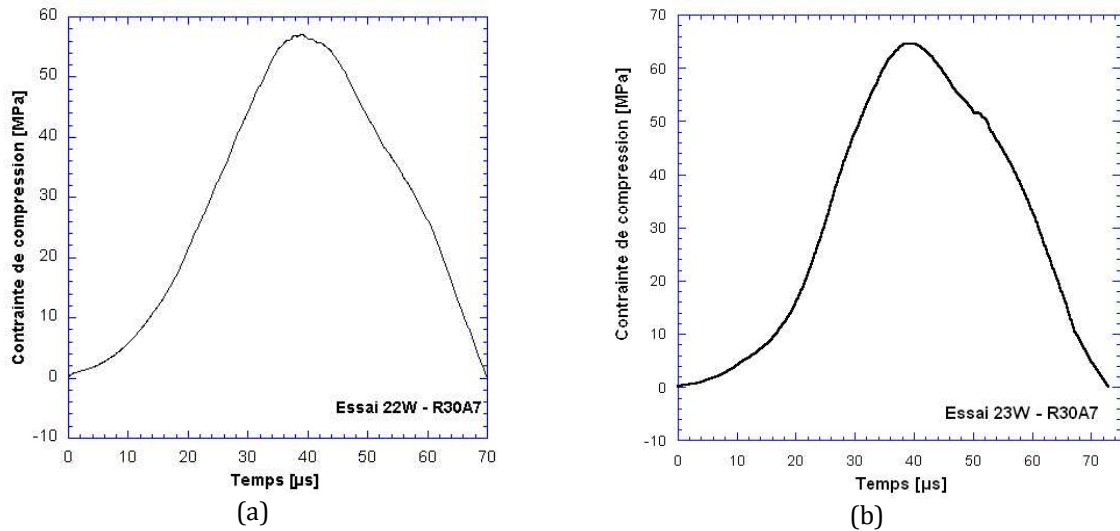


FIG. 5 – PULSES DE CHARGEMENT UTILISES LORS DES SIMULATIONS DES ESSAIS (a) 22W ET (b) 23W SUR BETON R30A7 HUMIDE

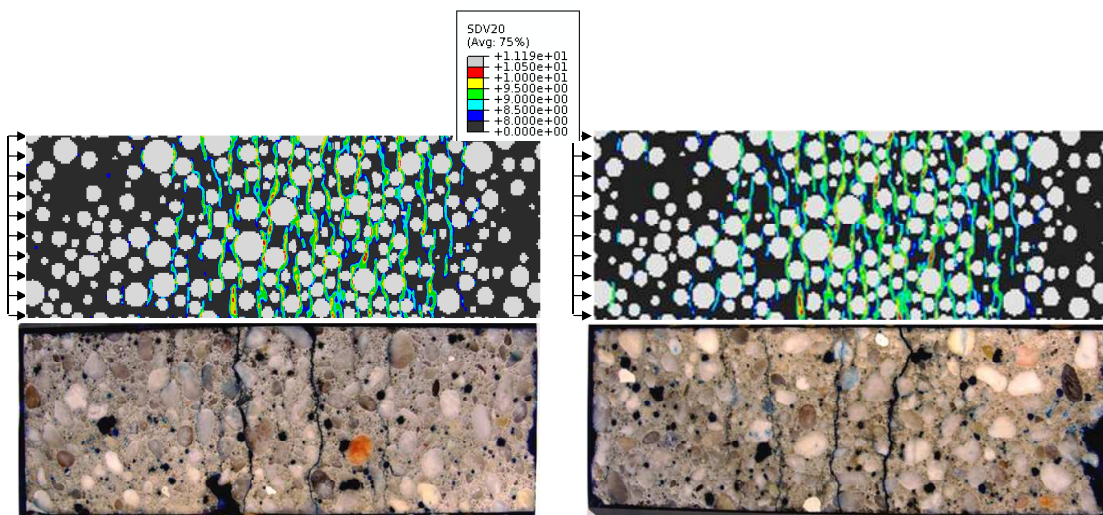


FIG. 6 – COMPARAISON DES FACIES POST MORTEM EXPERIMENTAUX ET DES PREVISIONS NUMERIQUES DE L'ENDOMMAGEMENT, ESSAIS 23W ET 22W (RESPECTIVEMENT A GAUCHE ET A DROITE) SUR BETON R30A7 HUMIDE

Les prévisions numériques de la vitesse en face arrière sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. De plus, la présence des granulats permet d'affiner la modélisation du comportement en traction dynamique du béton puisqu'ils apportent une cohésion supplémentaire par rapport à une approche purement macroscopique.

### 3.2 Fragmentation par impact sur la tranche

L'essai d'impact sur la tranche consiste à projeter un projectile cylindrique sur la tranche d'un carreau de béton [13,15]. Cet essai permet d'étudier la fragmentation du béton puisque l'onde de compression incidente générée par l'impact du projectile entraîne un déplacement radial de la matière et des contraintes de traction ortho-radiales (Fig. 7).

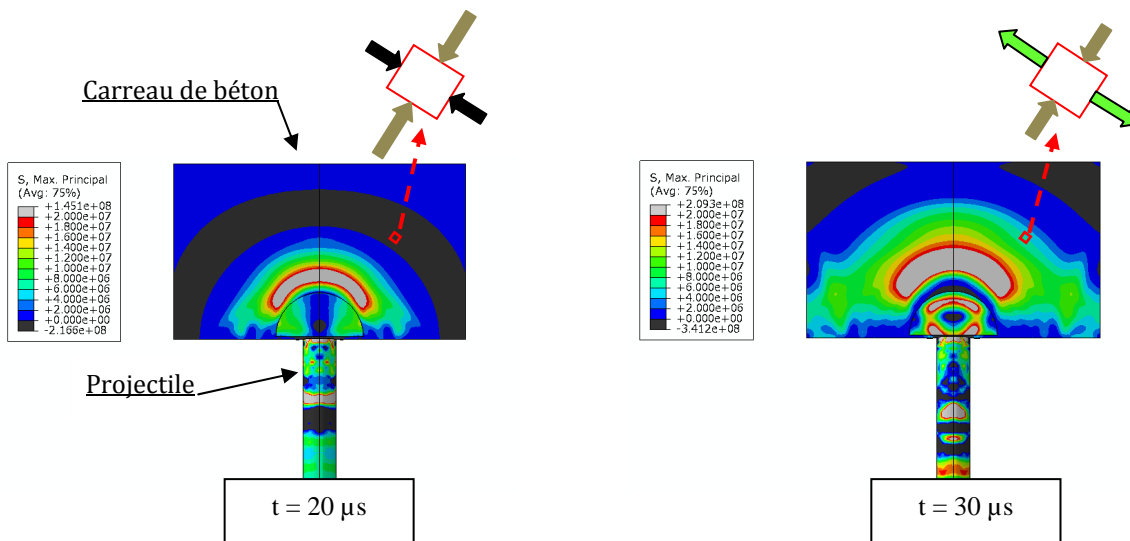


FIG. 7 – CONTRAINTE PRINCIPALE A 20 ET 30  $\mu$ S APRES L'IMPACT DU PROJECTILE – COMPRESSION RADIALE ET ORTHO-RADIALE PUIS TRACTION ORTHO-RADIALE

La méthode mésoscopique a été appliquée afin de simuler les essais d'impact sur la tranche menés sur le béton R30A7 menés au LEM3. Les faciès d'endommagement sont présentés sur la Fig. 8.

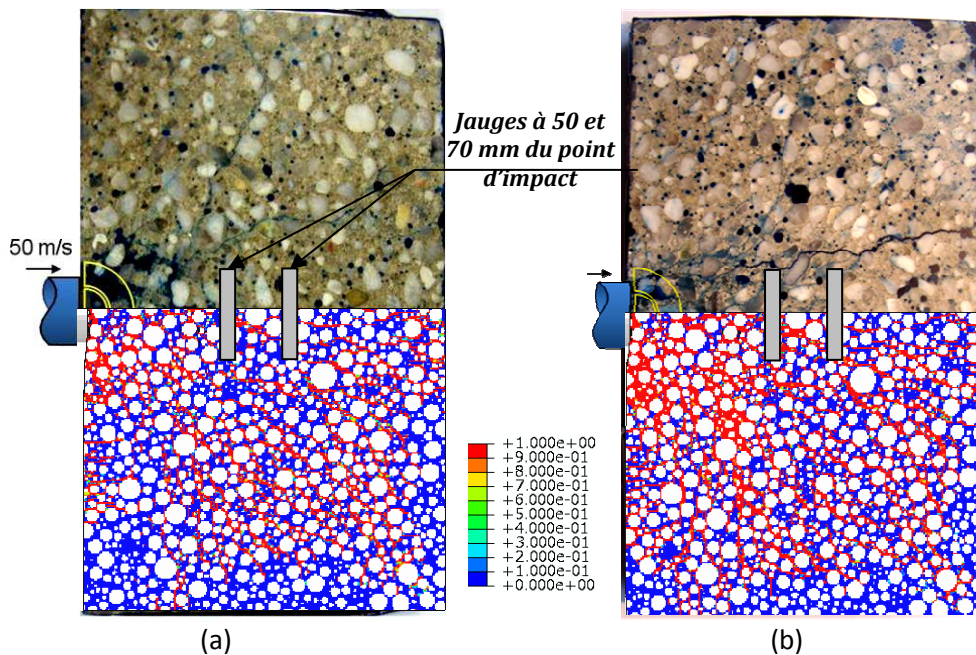


FIG. 8 – COMPARAISON DES PREVISIONS NUMERIQUES DE L'ENDOMMAGEMENT AVEC LES FACIES POST MORTEM POUR LES ESSAIS REALISES SUR (a) LE R30A7 HUMIDE ET (b) LE R30A7 SEC (T = 50  $\mu$ S APRES IMPACT)

On remarque que le modèle prévoit bien un endommagement plus important dans le cas du béton sec, cette différence étant liée à l'écart de résistance entre béton sec et humide en traction dynamique. De plus, on notera que la densité de fissuration à l'échelle macroscopique est bien reproduite par la simulation numérique. De même, les déformations relevées par simulation numérique sont en très bon accord avec les signaux expérimentaux de jauges de déformation de 30 mm de longueur placées sur le carreau de béton orthogonalement à l'axe d'impact (Fig. 9).

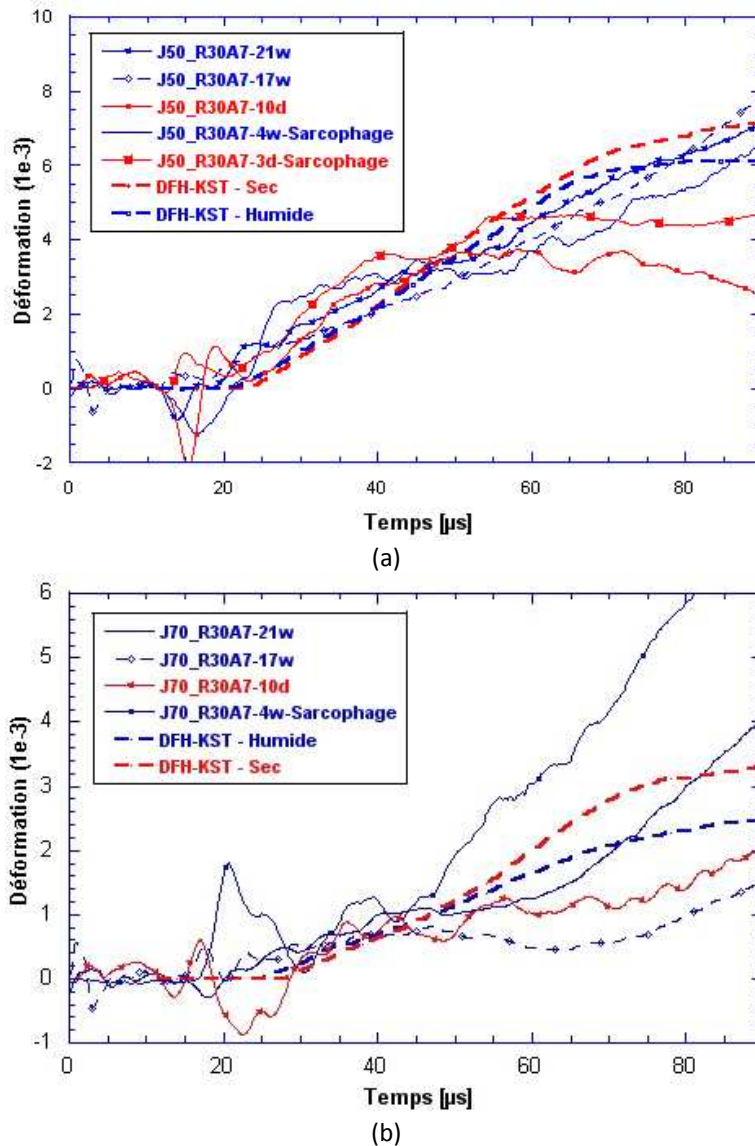


FIG. 9 – COMPARAISON DES PREVISIONS NUMERIQUES AUX SIGNAUX OBTENUS EXPERIMENTALEMENT SUR LE BETON R30A7 : (a) JAUGE SITUEE A 50 MM DU POINT D'IMPACT, (b) A 70 MM DE L'IMPACT

## 4 Conclusions

Les moyens de calculs modernes permettent d'affiner l'échelle d'étude et de modélisation des matériaux. L'approche mésoscopique a pour but de rendre compte de phénomènes locaux induits par la présence d'hétérogénéités dans la microstructure de béton. En différenciant les plus gros granulats et la matrice, plusieurs simulations ont été menées. Tout d'abord des calculs ont permis d'identifier les caractéristiques mécaniques des phases numériques afin d'obtenir un comportement similaire à celui du béton R30A7 réel. Par la suite, des éprouvettes de béton numérique ont été utilisées pour simuler des essais dynamiques instrumentés menés au LEM3. Les prévisions numériques en termes d'étendue et d'orientation de l'endommagement sont satisfaisantes. De plus, la comparaison quantitative des déformations numériques et expérimentales à 50 et 70 mm montre un très bon accord. Enfin la modélisation rend compte de la différence de densité de fissuration observée entre béton sec et béton humide sous impact.



## Références

- [1] H. Sadouki, F.H. Wittmann. *On the analysis of the failure process in composite materials by numerical simulation*, Mat. Sc. Eng., 104 : 9 – 20, 1988.
- [2] R.R. Pedersen, A. Simone, M. Stroeven, L.J. Sluys. *Mesosopic modelling of concrete under impact*, Proceedings de FraMCoS-6, Italie, 571 – 578, 2007.
- [3] X.Q. Zhou, H. Hao. *Mesoscale modelling of concrete tensile failure mechanism at high strain rates*, Computers and Structures, 86 : 163 – 169, 2008.
- [4] P.L. Hereil, E. Buzaud. *An analysis of the propagation of front shock in concrete*, J. Phys. IV, 134 : 133 – 138, 2006.
- [5] T. Gabet, Y. Malécot, L. Daudeville, *Triaxial behaviour of concrete under high stresses: influence of the loading path on compaction and limit states*, Cement and Concrete Research. 38(3): 403 – 412, 2008.
- [6] X.H. Vu, Y. Malécot, L. Daudeville, E. Buzaud. *Experimental analysis of concrete behavior under high confinement: effect of the saturation ratio*, Int. J. of Solids and Structures. 46(5): 1105 – 1120, 2009.
- [7] F. Dupray, Y. Malécot, L. Daudeville, E. Buzaud. *A mesoscopic model for the behaviour of concrete under high confinement*, Int. J. for Num. and Anal. Meth. in Geomech. 33 : 1407 – 1423, 2009.
- [8] E. Sellers, F. Scheele. *Prediction of anisotropic damage in experiments simulating mining watersrand quartzite blocks*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 33 : 659 – 670, 1996.
- [9] R.D. Krieg. *A simple constitutive description for soils and crushable foams*, Report SC-DR-7260883, Sandia National Laboratory, 1978.
- [10] D.V. Swenson, L.M. Taylor. *A finite element model for the analysis of tailored pulse stimulation of boreholes*, Int. J. Num. Analyt. Meth. Geomech. 7 : 469 – 484, 1983.
- [11] C. Denoual, F. Hild. *A damage model for the dynamic fragmentation of brittle solids*, Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 183 : 247 – 258, 2000.
- [12] P. Forquin, F. Hild. *A probabilistic damage model of the dynamic fragmentation process in brittle materials*, Advances in Applied Mechanics, 44 : 1 – 72. Academic Press, San Diego, CA, 2010.
- [13] B. Erzar, P. Forquin. *Experiments and mesoscopic modelling of dynamic testing of concrete*, submitted to Mechanics of Materials, 2011.
- [14] B. Erzar, P. Forquin. *Dynamic tensile experiments for concrete by spalling technique*, Experimental Mechanics, 50 : 941 – 955, 2010.
- [15] P. Forquin, B. Erzar. *Dynamic fragmentation process in concrete under impact and spalling tests*, International Journal of Fracture, 163 : 193 – 215, 2010.