HAL open science

# Comportement triaxial à haute pression du béton : influence de la granulométrie

Fabrice Dupray, Yann Malécot, Eric Buzaud, Laurent Daudeville

**To cite this version:**

Fabrice Dupray, Yann Malécot, Eric Buzaud, Laurent Daudeville. Comportement triaxial à haute pression du béton : influence de la granulométrie. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03365644

**HAL Id: hal-03365644**

**https://hal.science/hal-03365644**

Submitted on 5 Oct 2021

**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.

# Comportement du béton sous fort confinement : expérience et modélisation à l'échelle mésoscopique

**Fabrice Dupray, Yann Malécot, Eric Buzaud[1] & Laurent Daudeville**

*Laboratoire 3S-R*
*Domaine Universitaire BP 53 - 38400 - Grenoble*
*fabrice.dupray@hmg.inpg.fr*

*[1] Centre d'Etudes de Gramat*
*BP 80200 - 46500 - Gramat*

## Résumé :

*Le béton, lorsqu'il est soumis à un impact, subit de fortes contraintes triaxiales. Le comportement en réponse à ce type de sollicitations a été étudié avec une presse capable d'appliquer une contrainte moyenne supérieure à 1 GPa sur des échantillons de béton cylindriques de diamètre 70 mm et d'élancement 2. Dans cet article, une modélisation numérique à l'échelle mésoscopique est réalisée. Le matériau est décrit de façon biphasique, avec une matrice, constitué de la pâte de ciment et des granulats fins, et des granulats approximativement sphériques de taille supérieure à 2 mm, dont les caractéristiques respectives sont appliquées à un maillage d'éléments finis cubiques régulier. Nous présentons ici l'identification du modèle, à partir d'essais sur mortier seul et de la littérature pour les granulats, ainsi que les premières comparaisons entre essais numériques et expérimentaux, dans les cas d'essais de compression simple et d'essais hydrostatiques.*

## Abstract :

*When it is accidentally impacted, concrete receives high triaxial stresses. The behaviour under this kind of solicitation has been studied with a press, which is able to apply a mean pressure greater than 1 GPa, on cylindrical samples, dimensions of which are 7 cm diameter and 14 cm height. A numerical analysis at a mesoscopic scale is performed. The concrete is described as a biphasic material, consisting of a mortar (cement paste and fine aggregates), and of approximately spherical aggregates (the diameter of which is higher than 2 mm), whose characteristics are applied on a regular cubic finite elements mesh. The identification of the model's parameters on mortar samples and the first comparisons between numerical and experimental tests are presented here, for uniaxial compression and hydrostatical compression.*

## Mots-clefs :

**béton numérique ; essais triaxiaux ; modèle d'endommagement**

## 1 Introduction

Le béton est un matériau très commun, utilisé dans de nombreuses applications aussi diverses que les barrages, les ponts, les ouvrages de défense ou les bâtiments, et ces différents usages sont la source d'une grande diversité de compositions : résistance de la pâte, nature et forme des granulats, éventuels ajouts... Le cadre de ce travail concerne les problèmes liés aux impacts, naturels ou anthropiques sur les structures en béton. Si on considère l'impact d'un projectile perpendiculairement à une surface de béton, on va observer trois phénomènes. Le premier est la cratérisation, qui est liée d'un point de vue mécanique entre autres à de la traction simple ; le second est la compression triaxiale, causée par l'inertie de la structure autour du projectile ; enfin on peut observer de l'écaillage, celui-ci est aussi lié principalement à la traction simple (Zukas (1992)). Si des essais de compression simple sont réalisés sur tous les bétons des

constructions importantes, il n'est pas envisageable de caractériser expérimentalement le comportement sous fort confinement de chacun de ces différents bétons. Les variations entre les bétons sont principalement de 2 ordres : le comportement des matériaux, et les hétérogénéités du béton. Un béton numérique doit permettre de faire varier facilement les deux. Le but de cette étude est donc de fournir un cadre permettant à partir d'essais simples de simuler le comportement sous fort confinement de bétons variés. La démarche de cette étude consiste à s'appuyer sur une bonne description du comportement sous fort confinement de la matrice, c'est-à-dire la pâte de ciment et les inclusions granulaires de moins de 2 mm, et sur une bonne représentation de la distribution granulaire des plus gros éléments. La première partie de cet article présente l'identification sur le mortier du modèle Pontiroli-Rouquand-Mazars couplé (Rouquand *et al*. (1996)) à partir d'essais expérimentaux, et la seconde présente la construction du modèle numérique et la comparaison avec les essais expérimentaux sur béton.

## 2 Description du comportement matriciel

### 2.1 Le modèle PRM couplé

Le modèle de Mazars (Mazars (1984)) repose sur la théorie de l'endommagement des milieux continus. Il comporte une unique variable d'endommagement, mais sa description fait intervenir le concept de déformation équivalente, qui permet d'interpréter tout endommagement comme un endommagement de traction. La loi d'endommagement repose elle sur des paramètres dont l'identification à partir d'essais simples n'est pas directe. Un des apports du modèle PRM (Pontiroli (1995)) se situe à ce niveau, puisque la loi d'endommagement est exprimée en fonction de la résistance à la compression, de la résistance à la traction, du module d'Young et du coefficient de Poisson. La contrepartie est que la déformation au pic est imposée : en effet la reproduction de la résistance a été privilégiée lors de la réduction du nombre de paramètres, car elle est mesurable lors d'essais simples. D'autres apports sont à relever ici : l'endommagement est dans ce modèle unilatéral, donc il y a restauration de raideur pendant la phase de compression après une phase de traction endommageante ; L'endommagement s'accompagne d'une déformation irréversible appelée déformation inélastique. Enfin, afin d'éliminer la dépendance des résultats à la finesse du maillage, une méthode de régularisation, celle de Hillerborg, est adoptée (Hillerborg *et al*. (1976)). Le modèle PRM couplé reste entièrement explicite.
Ce modèle a été créé afin de modéliser le comportement sans confinement du béton. Il n'y a donc aucune prise en compte du comportement sous fort confinement du béton. L'introduction de ce comportement sous confinement a été réalisée par le couplage avec un modèle élastoplastique à contrainte effective, le modèle de de Krieg et Swenson (Krieg (1972) et Swenson *et al*. (1983)). Ce modèle simule deux mécanismes : le premier est la fermeture irréversible de la porosité sous l'action d'une forte pression, et cela se traduit par une courbe de comportement volumique. Le second est un mécanisme de glissement irréversible lié aux contraintes de cisaillement. Les deux phénomènes sont découplés, ce qui signifie que la distorsion plastique liée au cisaillement se développe à volume constant.

### 2.2 Identification sur le mortier

Pour identifier les paramètres de ce modèle de comportement sur la matrice, nous avons coulé des échantillons de ce mortier, sans granulats, destinés à être testés en compression simple, en flexion et sous fort confinement, lors d'essais hydrostatiques et triaxiaux. Les essais de compression simple ont été instrumentés avec deux jauges axiales et une jauge circonférentielle, de

façon à identifier le module d'Young, le coefficient de Poisson et la résistance à la compression. Les paramètres choisis sont donc $E = 25.5GPa$, $\nu = 0.16$, $f_c = 59.5MPa$. La comparaison est représentée figure 1.
Des essais confinés ont été effectués sur des échantillons de mortier, afin d'identifier la courbe de comportement volumique associée au modèle PRM couplé. Pour ces essais, la presse Giga du laboratoire 3S-R a été utilisée. Elle permet d'appliquer une pression de confinement de 650 MPa à un échantillon cylindrique de diamètre 7 cm et d'élancement 2. Des essais de compression hydrostatiques et des essais triaxiaux ont été réalisés. Les essais d'identification ainsi que la courbe de comportement volumique choisie sont représentés figure 2. Au-delà de 650 MPa, la courbe d'identification est choisie tangente à la dernière pente connue.

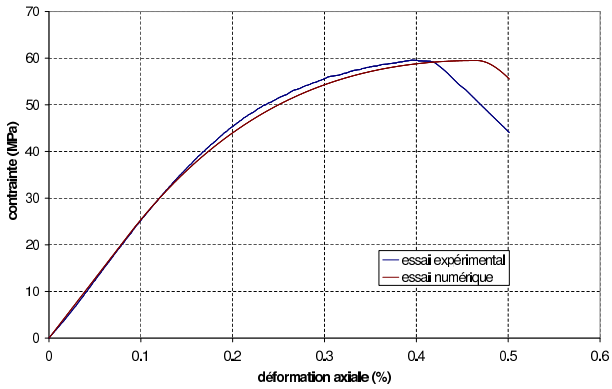


FIG. 1 – Comparaison entre l'essai de compression simple normalisé et le modèle PRM couplé : contrainte axiale en fonction de la déformation axiale.

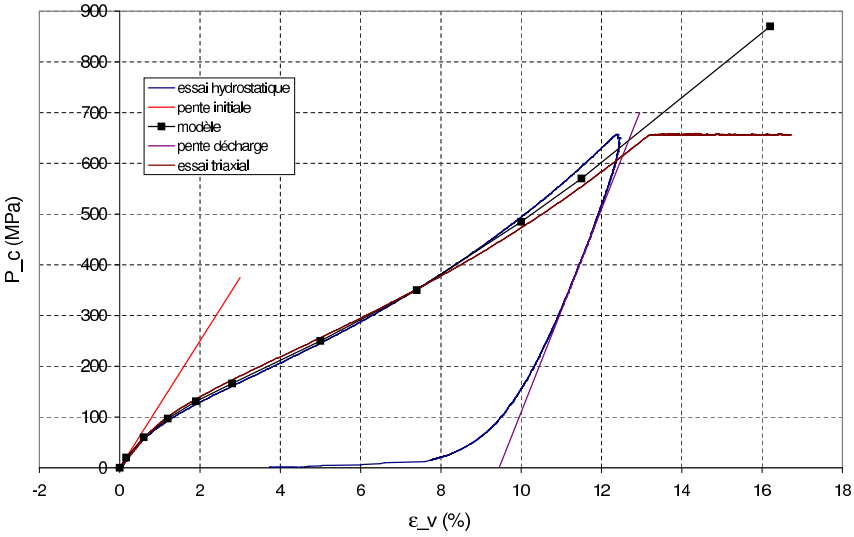


FIG. 2 – Identification de la courbe de comportement volumique du mortier : pression de confinement en fonction de la déformation volumique pour deux essais expérimentaux (hydrostatique et triaxial) ; représentation de la pente élastique initiale (à partir de E et $\nu$ déjà identifiés) et de la pente en décharge.

## 3 Essais sur béton numérique

Le modèle de béton numérique repose sur la création d'un échantillon cylindrique contenant une proportion imposée de granulats pseudo-sphériques. Les éléments finis utilisés sont

cubiques, et les granulats sont des assemblages de cubes approximant une sphère. Les résultats présentés ont été obtenus sur un modèle à 68110 éléments. Le choix effectué ici est d'étudier deux bétons, l'un contenant 25% en volume de granulats de plus de 2mm de diamètre, l'autre 30%. Les résultats seront mis en parallèle avec un béton réel, qui contient lui 40% de granulats. La courbe granulométrique est similaire dans tous les cas, avec des granulats entre 2 et 8 mm de diamètre reproduisant la distribution réelle. Les développements nécessaires à l'obtention d'un béton numérique à 40% de granulats sont en cours.

### 3.1 Essais de compression simple

Les essais numériques de compression simple sont menés sans déplacements latéraux aux appuis, et le chargement est appliqué en déplacement. Les résultats sont présentés figure 3. On observe que le module d'Young du mortier est en fait très proche de celui du béton, ce qui ne peut pas être représenté par cette modélisation. En effet les granulats utilisés réellement et modélisés numériquement sont de la quartzite, dont le comportement élastique a été étudié par Camborde (Camborde (1999)), avec un module d'Young de 70 GPa. Leur inclusion va donc nécessairement raidir le matériau, ce qui n'est pas observé dans la réalité. Contrairement aux travaux de Wriggers (Wriggers *et al.* (2006)), le comportement du mortier est identifié séparément sur des essais expérimentaux, mais la même conclusion sur la modélisation de l'interface mortier - granulat s'impose : il sera utile de modéliser ou de prendre en compte l'auréole de transition. Il est par contre remarquable que la résistance à la compression soit significativement réduite par rapport au mortier, et ramenée à des valeurs proches de celles obtenues sur le béton réel. L'observation de la répartition de l'endommagement (figure 4) permet un début d'explication : en effet on constate une localisation de l'endommagement en forme de croix dans le plan, qui peut correspondre au cône observé usuellement. Un autre point remarquable est que la résistance minimale à la compression est obtenue sur le béton numérique à 25% de granulats : le mortier seul et le béton à 30% de granulats ont tous deux une résistance à la compression supérieure.

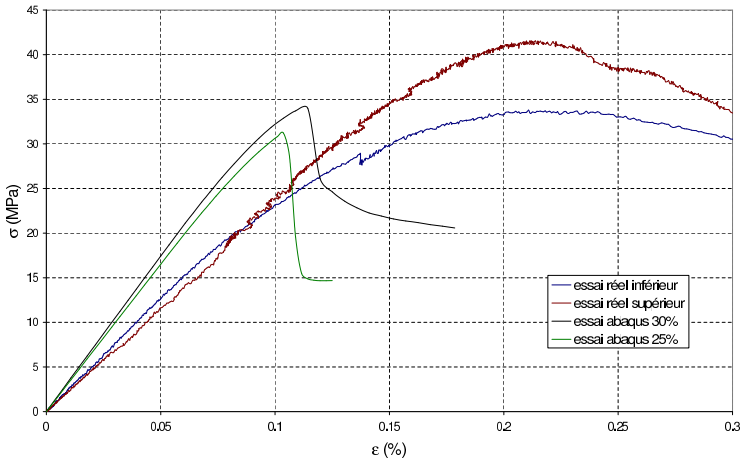


FIG. 3 – Comparaison entre les essais de compression simple expérimentaux et numériques : contrainte axiale en fonction de la déformation axiale.

### 3.2 Essais hydrostatiques

Pour les essais numériques hydrostatiques, la pression de confinement est appliquée sur chacune des faces extérieures de l'échantillon. Les déplacements au niveau des surfaces d'appui

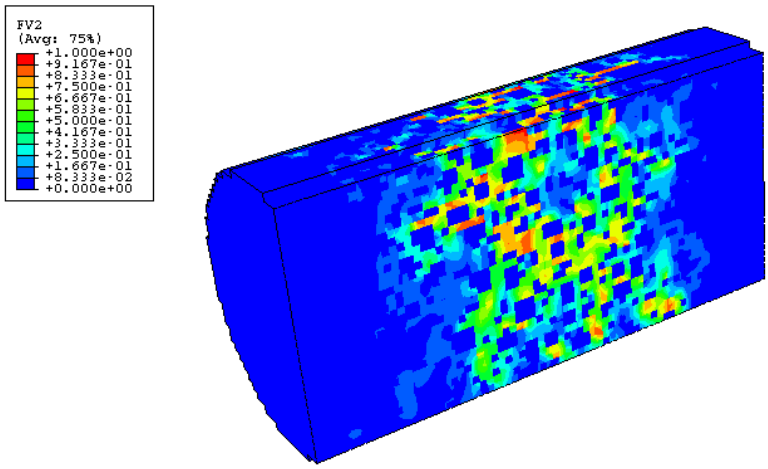


FIG. 4 – Endommagement dans l'échantillon de béton numérique 30% lors d'un essai de compression simple.

sont libres. La comparaison avec les essais expérimentaux, menés par Gabet (Gabet (2006)), se base sur la courbe de comportement volumique, figure 5. On retrouve bien l'augmentation de raideur attendue par rapport au mortier seul, causée par la présence de granulats très raides. L'introduction d'une loi de comportement volumique à haute pression plus fine pour les granulats permettra de mieux modéliser le comportement dans les hautes pressions, en réduisant la raideur des granulats. L'endommagement est très faible sous ce type de chargement, et est localisé dans les ponts inter-granulaires.

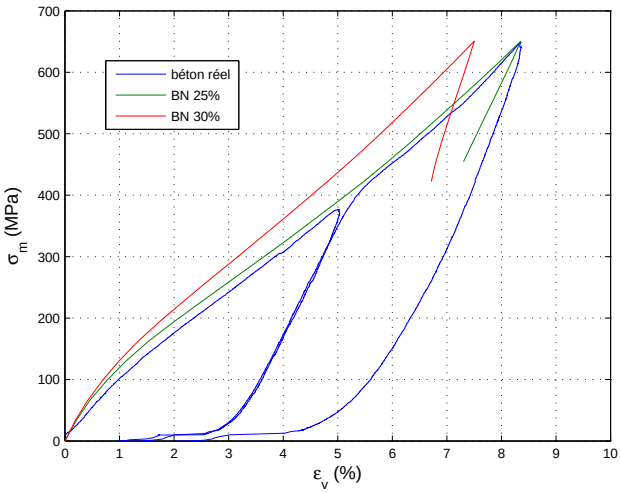


FIG. 5 – Comparaison entre les essais hydrostatiques expérimentaux et numériques. Contrainte moyenne en fonction de la déformation volumique, pour le béton réel et deux béton numériques à 25% et 30% de granulats

## 4 Conclusions

Ces travaux préliminaires démontrent l'interêt du projet, en particulier dans les hautes pressions, où il semble que l'influence de l'auréole de transition soit négligeable. Aucun paramètre

entré dans ce modèle n'a été identifié directement sur le béton, seulement sur ses composants, et c'est là la force du béton numérique. Les résultats des simulations numériques sur deux compositions de béton sont comparés à un béton réel. L'influence de la quantité de granulats est mise en évidence, en particulier en compression simple, et celle-ci n'est pas monotone en ce qui concerne la résistance. Le comportement lors d'un essai hydrostatique à 650 MPa est testé, et l'influence de la quantité de granulats est là aussi visible.
L'augmentation de la quantité de granulats et la variation de la courbe granulométrique seront des champs d'étude. Le couplage de la loi de comportement à haute pression avec les phénomènes d'endommagement localisé liés à la présence des granulats sera étudié par des essais triaxiaux.

## Remerciements

Cette recherche a été menée avec le soutien financier du Centre d'Etudes Techniques de Gramat (CEG, DGA).

## Références

Camborde F. 1999 Modélisation du comportement dynamique du béton - Application aux problèmes d'impacts et d'explosions *Thèse de doctorat, Ecole Centrale Nantes*

Gabet T. 2006 Ultimate Strength of Plain Concrete Under Extreme Combined Stresses : Triaxial and proportional Stress Paths *J. Physique IV France* **134** 635-640

Hillerborg A., Modeer M., Petersson P.E. 1976 Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements *Cement and Concrete Research* **6**-6 773-782

Krieg R.D. 1972 A simple constitutive description for soils and crushable foams *Sandia National Laboratories, SC-DR-72-0883, Albuquerque*

Mazars J. 1984 Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure *Thèse d'état, Université Paris VI*

Pontiroli C. 1995 Comportement au souffle de sturctures en béton armé, analyse expérimentale et modélisation *Thèse de doctorat, ENS Cachan, CEG*

Rouquand A., Pontiroli C., Canton E. 1996 An explicit damage model for dynamic concrete behaviour. Numerical simulations and comparisons with experimental results on reinforced concrete plates under blast loading *International conference on structures under shock and impact, Udine , Italie* **4** 331-340

Swenson D.V., Taylor L.M. 1983 A finite element model for the analysis of tailored pulse simulation of boreholes *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* **7**-4 469-484

Wriggers P., Moftah S.O. 2006 Mesoscale models for concrete : Homogenisation and damage behaviour *Finite Elements in Analysis and Design* **42**-7 623-636

Zukas J.A. 1992 Penetration and perforation of solids *Impact Dynamics (ed. Krieger)*