
Comportement du béton sous fort confinement

Caractérisation expérimentale et modélisation

Thomas Gabet* — **Laurent Daudeville*** — **Yann Malécot*** — **Eric Buzaud****

**Laboratoire 3S-R – UMR 5521 (UJF/INPG/CNRS)
BP 53
F-38041 Grenoble cedex 9*

***Centre d'Etudes de Gramat – DGA
F-46500 Gramat
Laurent.daudeville@ujf-grenoble.fr*

RÉSUMÉ. Cette étude concerne le comportement d'un béton ordinaire considéré sec sous fortes étreintes triaxiales. Dans un premier temps sont présentés des résultats d'expérimentations menées avec une presse triaxiale de grande capacité (confinement jusqu'à 1 GPa). Ces résultats d'essais permettent de mettre en évidence les états limites du matériau ainsi que les phénomènes de compaction du béton poreux. Ensuite, les paramètres caractéristiques d'un modèle de comportement du béton dédié aux chargements dynamiques sévères sont identifiés. Une discussion est menée sur les capacités du modèle à décrire les essais et sur ses limitations.

ABSTRACT. This study concerns the constitutive behaviour of an ordinary and dry concrete under high confinement. In a first step, results of tests performed with a high capacity triaxial press (confining pressure up to 1 GPa) are presented. The limit states of the material as well as the compaction phenomena of the porous concrete are clearly shown by the test results. Then, the characteristic parameters of a constitutive model devoted to severe dynamical loading are identified. The tests are simulated by means of the model, the comparison of the test and numerical results are discussed.

MOTS-CLÉS : béton, comportement triaxial, fort confinement, compaction, modélisation.

KEYWORDS: concrete, triaxial behaviour, high confinement, compaction, modelling.

1. Introduction

La connaissance du comportement du béton en compression simple suffit généralement pour la modélisation du comportement d'ouvrages en béton et pour la prédiction de leurs états mécaniques ultimes sous chargement usuel (charges permanentes, charges d'exploitation, séismes...). Lorsqu'un ouvrage en béton est soumis à un impact sévère de projectile pouvant conduire à de la pénétration, un état de contraintes tridimensionnelles, caractérisé par des pressions moyennes élevées dues aux forces d'inertie, apparaît dans le matériau autour du projectile. Prédire de façon précise la réponse de structures en béton armé ou précontraint sous sollicitation dynamique sévère d'origine naturelle ou anthropique (impacts balistiques, chutes d'avions, chutes de blocs rocheux...) nécessite donc la caractérisation et la modélisation du comportement triaxial du béton sous fort confinement et pour divers trajets de chargement.

Dans un premier temps sont présentés des résultats d'expérimentations menées avec Giga, une presse triaxiale de grande capacité, sur des éprouvettes en béton ordinaire considéré sec. L'effet du degré de saturation en eau du béton sur sa réponse sous chargement triaxial sévère est présenté dans (Vu et al., 07). Le dispositif expérimental et les méthodes de mesures associées ont été présentés dans (Gabet et al., 06). Cet article montrait également des premiers résultats obtenus sous chargements triaxiaux et proportionnels. D'autres types d'expérimentations sont également possibles : des essais œdométriques permettant d'atteindre des confinements plus élevés sous trajet de déformation uniaxiale et des essais triaxiaux d'extension permettant d'étudier les phénomènes de rupture en extension sous fort confinement. Une synthèse de l'ensemble des résultats d'essais obtenus sur le béton R30A7 est présentée. Elle permet de mettre en évidence les états limites du matériau étudié pour divers trajets de chargement. Un résultat remarquable est que les différents états limite constituent dans l'espace des contraintes une surface seuil indépendante du trajet de chargement..

Dans un second temps est présenté brièvement un modèle de comportement du béton dédié aux modélisations d'ouvrages sollicités en dynamique (Rouquand et al., 2007). Ce modèle, couplant endommagement et plasticité et prenant en compte le degré de saturation en eau du béton par la notion de contrainte effective, a été identifié à partir de quelques essais et utilisé pour simuler la réponse du béton pour l'ensemble des tests. La comparaison entre les résultats numériques et d'essais est présentée.

2. Dispositif expérimental

2.1. La presse triaxiale « GIGA »

La presse triaxiale GIGA a été conçue spécifiquement pour cette étude et financée par la Délégation Générale à l'Armement. Elle permet de tester des éprouvettes cylindriques de béton de diamètre 7 cm (10 cm sous chargement

oedométrique) et d'élancement 2 selon différents trajets de chargement tels que les valeurs maximales de la pression de confinement p , obtenue par l'action d'un fluide quasi-incompressible, et de la contrainte axiale σ_x , sont respectivement égales à 850 MPa et 2300 MPa (Figure 1). L'essai oedométrique, réalisé à l'aide d'une chemise en acier dont la déformation radiale est maintenue nulle par l'intermédiaire du fluide de confinement, est un essai de déformation uniaxiale permettant d'atteindre des niveaux de confinement supérieurs à 1000 MPa.

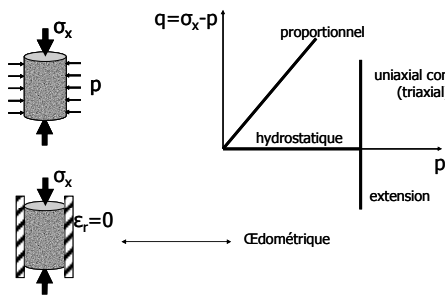


Figure 1. Trajets de chargements

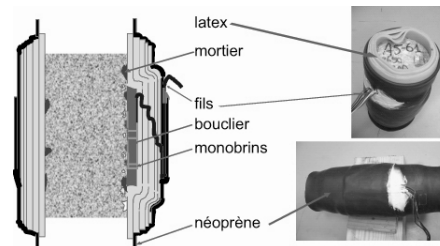


Figure 2. Echantillon prêt à être testé

2.2. Le béton et les éprouvettes

Tableau 1. Composition et propriétés mécaniques du béton R30A7

Proportions du mélange	kg/m ³
Eau	169
Sable Dmax = 1,8 mm	838
Agrégats D 0,5 à 8 mm	1007
Ciment CEM I 52,5 N PM ES CP2 (Vicat)	263
Propriétés mécaniques du béton	
Résistance en compression simple à 28 jours	30 MPa
Porosité mesurée (ISO 5017)	12 %
Masse volumique	2200 kg/m ³

Le béton a été formulé (Tableau 1) de telle sorte que ses propriétés mécaniques soient reproductibles et représentatives d'un béton standard mais légèrement ferme pour éviter la ségrégation ($f_{c28}=30$ MPa, affaissement au cône d'Abrams de 7 cm). Le béton est coulé dans des moules de 13,5 litres puis conservé 28 jours en environnement saturé en eau. Les éprouvettes cylindriques sont ensuite usinées à l'eau (carottage, sciage, surfacage) et conservées au four à 50°C pour séchage jusqu'à stabilisation de la masse. La mesure de la variation de la masse permet

l'estimation de la porosité du béton (ISO 5017). Les éprouvettes cylindriques et les jauges sont protégées par l'intermédiaire d'un bouclier en PVC et d'une membrane multi-couches en latex protégée chimiquement par une membrane en néoprène. Les éprouvettes ont une préparation de surface consistant à ouvrir puis boucher les porosités proches de la surface au mortier SIKATOP®SF26 afin d'éviter les phénomènes de poinçonnement (Figure 2).

3. Principaux résultats d'essais

Pour la suite, σ_m représente la contrainte moyenne et $q = \sigma_x - p$ la différence des contraintes principales, ou encore la norme au sens de Von Mises du déviateur des contraintes lorsque $\sigma_x > p$, nous appellerons *déviateur* la grandeur q . Les contraintes de compression et les déformations associées sont considérées positives.

Un cycle de trois chargements hydrostatiques a été mené sur le même échantillon à 400, 650 et 650 MPa et à une vitesse de 100 MPa/min. La courbe de comportement volumique (contrainte moyenne fonction de la déformation volumique) est montrée sur la figure 3. Cet essai permet de mettre en évidence les phénomènes irréversibles liés au processus de compaction isotrope dû à l'effondrement de la matrice cimentaire et à la fermeture des pores. Des phénomènes similaires ont été observés sur mortiers (Burlion et al. 2001).

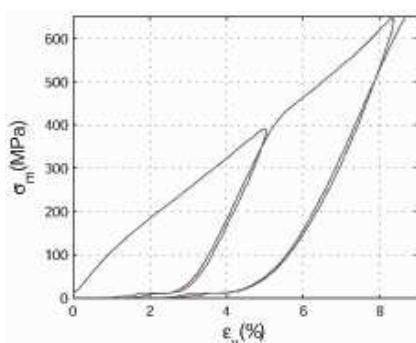


Figure 3. Comportement volumique sous chargement hydrostatique cyclé

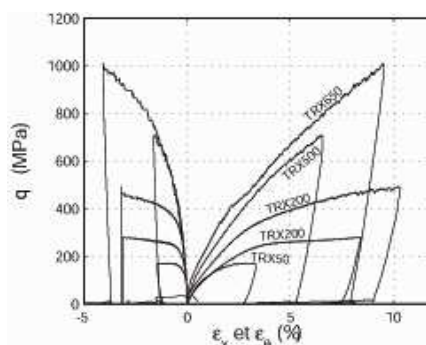


Figure 4. Réponse déviatoire sous chargement triaxial et pour différentes pressions de confinement

Les essais triaxiaux sont présentés en termes de courbes déviateur q / déformations axiale ϵ_x et ortho-radiale ϵ_θ (Figure 4) et σ_m / déformation volumique ϵ_v (Figure 5). La figure 4 permet de constater, dans la phase hydrostatique, la bonne reproductibilité des essais ainsi que le caractère isotrope du comportement du matériau. La figure 4 permet également de confirmer l'augmentation de résistance du matériau avec la pression de confinement. La figure

5 met en évidence, d'une part que la déformation volumique (compaction) augmente dès lors qu'un chargement déviatoire est ajouté au chargement hydrostatique, et d'autre part que la rupture est caractérisée par une apparition d'un phénomène de dilatance après une phase continue de contraction.

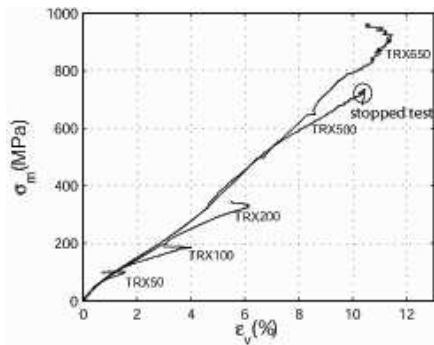


Figure 5. Comportement volumique sous chargement triaxial

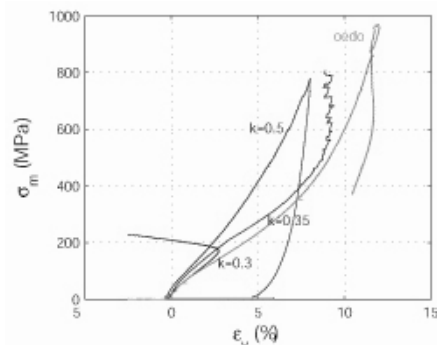


Figure 6. Comportement volumique sous chargements proportionnel et œdométrique

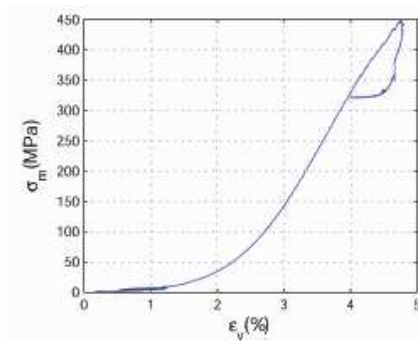


Figure 7. Comportement volumique pour l'essai d'extension à 450 MPa



Figure 8. Rupture localisée par bande de compaction obtenue après un essai proportionnel ($k=0,3$)

Des essais proportionnels, paramétrés par le facteur de proportionnalité k ($p=k\sigma_x$), ainsi qu'un essai œdométrique ont également été réalisés, ils sont représentés en terme de comportement volumique à la figure 6. Notons que l'essai œdométrique a atteint une déformation volumique de 12% correspondant à la porosité du matériau. Enfin, trois essais d'extension ont été réalisés avec une pression de confinement p égale à 0 (traction simple), 200 et 450 MPa. Ils consistent en un chargement hydrostatique jusqu'à p suivi d'une diminution de σ_x . La figure 7 montre le comportement volumique de l'essai d'extension correspondant à

$p=450$ MPa. Une augmentation de volume à contrainte moyenne constante apparaît clairement lors de la rupture en extension.

4. Etats limites

Alors que sous faible confinement l'état limite (résistance maximale) du béton peut être défini comme un maximum de contrainte (Figure 4), cette définition n'est plus valable sous fort confinement. La transition contraction-dilatance, qui représente un seuil de déformation volumique et qui coïncide avec le maximum de contrainte sous faible confinement, est l'état limite le mieux adapté aux chargements étudiés. Cet état limite correspond vraisemblablement à des phénomènes de rupture localisés sous fort cisaillement, la figure 8 montre une bande de « compaction » c'est-à-dire une bande de localisation perpendiculaire à la direction principale de chargement. Tous les états limites ont été reportés dans un diagramme déviateur-contrainte moyenne (Figure 9). Les états limites d'extension correspondant à $q < 0$ ont été reportés en considérant la valeur absolue du déviateur. Ces résultats mettent clairement en évidence une courbe d'état limite (ou surface seuil si l'on suppose une non dépendance de l'état limite avec l'angle de Lode) indépendante du trajet de chargement et proche d'une ligne droite. Ce résultat confirme que les critères d'états limites classiquement définis pour les géomatériaux sont valables pour le béton sous fort confinement.

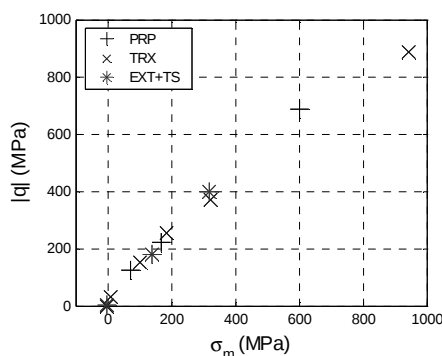


Figure 9. Etats limites de tous les essais reportés dans un espace ($|q|$, σ_m)

5. Modélisation des essais avec un modèle élasto-plastique avec endommagement

Le modèle « PRM crash model » (Rouquand et al., 2007) développé au Centre d'Etudes de Gramat et implanté dans le code de calcul aux éléments finis Abaqus a été utilisé pour modéliser la réponse des éprouvettes de béton soumises aux divers

trajets de chargement. Ce modèle, décrit très brièvement, est fondé sur le couplage d'un modèle d'endommagement permettant de décrire les phénomènes de microfissuration dus aux extensions à des niveaux de confinement modérés avec un modèle élasto-plastique de Krieg (1978) permettant de simuler les mécanismes de fermeture des pores pour de très fortes pressions ainsi que les mécanismes de cisaillement irréversibles observés pour des contraintes élevées. La courbe de comportement volumique (σ_m , ε_v) est supposée être un paramètre du modèle, le matériau complètement consolidé (porosité refermée) a un comportement élastique linéaire. La variation de volume (réduction de porosité) est supposée due au seul effet de la contrainte moyenne. Le degré de saturation en eau du béton poreux est pris en compte dans le volume compactable avant d'atteindre la consolidation. Dès lors que le matériau devient complètement saturé, sa raideur devient celle du mélange béton sec et eau (Rouquand et al., 2007). A chaque incrément du calcul aux éléments finis, la connaissance de la nouvelle déformation volumique permet de calculer la nouvelle contrainte moyenne σ_m .

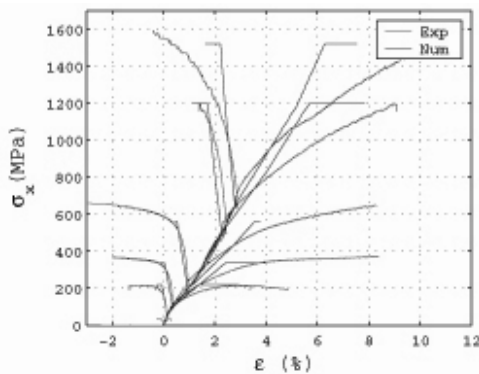


Figure 10. Réponses numérique et expérimentale – essais triaxiaux

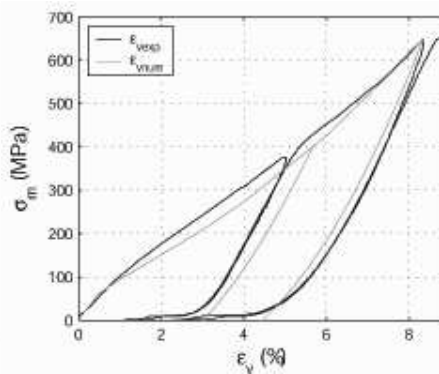


Figure 11. Réponses numérique et expérimentale – essais hydrostatiques

Une surface seuil d'écoulement plastique $q_0=f(\sigma_m)$ est définie dans le plan (q, σ_m). Cette surface est identifiée à partir des résultats montrés en figure 9. Le comportement déviatoire est supposé élastique parfaitement plastique. Les paramètres du modèle ont été identifiés à partir des résultats d'essais présentés précédemment (Gabet, 2006). La figure 10 compare les réponses numérique et expérimentale sous chargement triaxial (courbe contrainte axiale / déformations axiale et orthoradiale). La partie hydrostatique du chargement a permis l'identification de la courbe de comportement volumique du modèle. Il apparaît un défaut du modèle, la non prise en compte du déviateur des contraintes dans le phénomène de compaction. Cette figure montre également que la contrainte axiale est bornée lorsque le déviateur des contraintes atteint la surface seuil. La figure 11 concerne la validation du modèle sous chargement hydrostatique.

6. Conclusion

Une synthèse de résultats d'essais triaxiaux sous fort confinement a été présentée. Elle a permis de caractériser l'état limite ultime sous fort confinement d'un béton ordinaire considéré sec comme une transition de comportement contractant vers un comportement dilatant. Un modèle de comportement prenant en compte les déformations irréversibles dus aux fortes pressions a été identifié et a permis de reproduire les phénomènes majeurs observés expérimentalement. Le modèle pourrait néanmoins être amélioré en prenant en compte le déviateur des contraintes dans l'évaluation de la variation de volume due à la compaction. De plus, le modèle élasto-plastique parfait de déformation déviatoire (de distorsion) permet une déformation plastique à volume et déviateur constants alors que la surface d'état limite correspond à une transition contraction-dilatation.

Ce travail a été mené dans le cadre d'un protocole de collaboration entre le Centre d'Etudes de Gramat (CEG) de la Délégation Générale à l'Armement et l'UMR 5521 (UJF/INPG/CNRS). Les auteurs remercient le CEG pour son soutien financier et technique.

7. Bibliographie

- Burlion N., Pijaudier-Cabot G., Dahan N., « Experimental analysis of compaction of concrete and mortar », *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 25, 2001, p. 1467–1486, 2001.
- Gabet T., Malecot Y., Daudeville L. « Ultimate strength of plain concrete under extreme combined stresses: triaxial and proportional stress paths », *Revue Européenne de Génie Civil*. Vol. 10, n°3, 2006, p. 375-390.
- Krieg R.D., « A simple constitutive description for soils and crushable foams », Sandia National Laboratories, SC-DR-72-0833, Albuquerque, New Mexico, 1978.
- Rouquand A., Pontiroli C., Mazars J., « Concrete structures under severe loadings: a strategy to model the response for a large range of dynamic loads », *Proc. FRAMCOS-6: Sixth International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, June 17-22 2007, Catania, Italy.
- Vu X.H., Malécot Y., Daudeville L., « Comportement du béton sous fort confinement : Effet du degré de saturation et du rapport Eau/Ciment », *Conception et vie des ouvrages, Actes des 25^{ème} rencontres de l'AUGC*, Bordeaux, 23-25 mai 2007.