

ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON CELLULAIRE AUTOCLAVE PRODUIT EN ALGERIE

Reçu le 05/06/2001 - Accepté le 17/04/2002

Résumé

Ce travail présente une étude expérimentale du comportement mécanique du béton cellulaire autoclavé. L'étude est portée essentiellement sur une série d'essais mécaniques en compression quasistatique à différentes vitesses de déformation variables entre 10^{-4} s^{-1} et 10 s^{-1} et à deux états différents (état sec et état saturé d'eau). En général, l'augmentation de la vitesse de déformation donne une augmentation de la contrainte critique du béton cellulaire autoclavé. Le béton cellulaire autoclavé présente une sensibilité à la vitesse de déformation positive. La valeur du module d'élasticité est proche de la valeur standard (1.5 GPa) pour un béton cellulaire autoclavé de masse volumique égale à 500-550 kg/m^3 .

Mots clés: Béton cellulaire autoclavé, comportement mécanique, sensibilité à la vitesse de déformation, essais quasistatiques en compression.

Abstract

This work presents an experimental study on the mechanical behavior of autoclaved aerated concrete. The study essentially concerns a series of mechanical tests in quasi-static compression with several strain rates varying from 10^{-4} s^{-1} to 10 s^{-1} and in two states (dry and saturated with water). In general an increase of strain rate causes an increase of the critical stress in autoclaved aerated concrete. Autoclaved aerated concrete shows positive strain rate sensitivity. The value of the elasticity modulus is close to the standard value (1.5 GPa) for the autoclaved aerated concrete with the volumetric mass 500-550 kg/m^3 .

Keys words: Autoclaved aerated concrete, mechanical behaviour, strain rate sensitivity, tests in quasistatic compression

R. BELOUETTAR

Département de Génie Civil
Université de Annaba
Annaba, Algérie

J.R. KLEPACZKO

Laboratoire de Physique
et Mécanique des Matériaux
Université de Metz, France

M.T. ABADLIA

Département des Liants et Bétons
Université de Boumerdès, Algérie

ملخص

يتمثل هذا البحث في دراسة تطبيقية للتصرف الميكانيكي للخرسانة الخلوية. أعتمد في هذا العمل عدة تجارب ميكانيكية في حالتان: حالة جافة و حالة معبئة بالماء و ذلك باستعمال سرعة تشويه ذات القيم العديدة بين 10^{-4} s^{-1} و 10 s^{-1} الشد. عامة، ارتفاع سرعة التشويه تعطي ارتفاع في مقاومة الشد للخرسانة الخلوية. الخرسانة الخلوية تظهر حساسية إيجابية لدرجة التشويه (1.5 GPa) قيمة مقياس المرونة لهذه الخرسانة يقارب القيمة النموذجية الكتلة الحجمية ذات القيمة بين 500 و 550 kg/m^3 .

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الخلوية و تصرف ميكانيكي و حساسية لدرجة التشويه و تجارب لمقاومة الشد.

Comme beaucoup de catégories de bétons légers, les bétons cellulaires autoclavés ont mis de très nombreuses années à se faire connaître et parfois s'imposer dans le monde de la construction et des matériaux de construction. En effet, la quasi-totalité des procédés actuels fut créée aux alentours des années trente. Axel Ericksson [1] fut l'un des premiers à mettre au point un dispositif permettant la formation d'un gaz dans une pâte de ciment. En 1924, deux sociétés suédoises s'intéressent à des brevets et commencèrent à produire ce matériau [1]. Aujourd'hui, elles sont devenues des sociétés bien connues (Durox et Ytong). Le traitement à l'autoclave fut mis au point en 1929.

Entre-temps, Christiani et Nielsen [1] ont développé de leur côté, au Danemark, un béton cellulaire dénommé Celcon et commercialisé en 1928.

En 1934, Siporex débuta en utilisant des brevets. Le développement des bétons cellulaires autoclavés dans le monde remonte à 1945 [1].

Les différentes études sur ce matériau sont essentiellement basées sur les propriétés physiques (essentiellement l'influence de l'humidité, la capillarité et la conductibilité thermique du matériau). Sur le plan mécanique, peu d'études ou de travaux ont été réalisés. De ce fait, nous nous sommes intéressés à étudier l'influence de la vitesse de déformation sur les contraintes du matériau.

DEFINITION ET STRUCTURE DU MATERIAU

Le béton cellulaire autoclavé est un matériau silico-calcaire, obtenu par un traitement à l'autoclave d'un mélange de sable siliceux broyé, de

chaux et de ciment. Une multitude de petites cellules sont créées dans le matériau par un dégagement gazeux provoqué par l'addition, au moment du gâchage, d'une poudre d'aluminium. Dans l'autoclave, la silice et les produits de durcissement du ciment se combinent chimiquement en formant des hydrosilicates de calcium, plus une structure cellulaire caractérisée par une résistance mécanique élevée et une excellente stabilité dimensionnelle.

Comme le montre la figure 1, la structure du matériau se compose de parties pleines et d'une infinité de pores formés par l'hydrogène, l'air et l'eau présents au moment du coulage et de l'expansion. Suivant les dimensions et les caractéristiques physiques des pores, on distingue les micropores et les macropores. La structure des pores a une influence sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau [2].

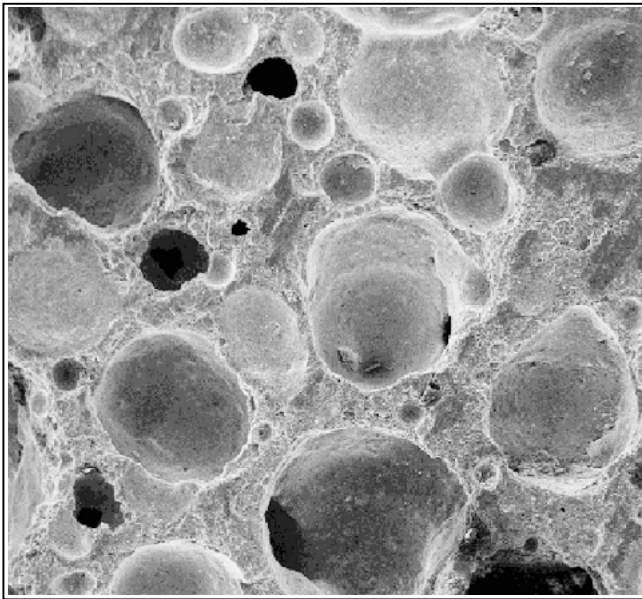


Figure 1: Structure du béton cellulaire vue au microscope.

PROPRIETES MECANIQUES DU MATERIAU

Module d'élasticité

Il existe un certain nombre de formules qui permettent de calculer le module d'élasticité E du matériau. La valeur quasi-statique de ce module est influencée par le pourcentage d'humidité contenu dans le matériau qui a également une influence sur la résistance à la compression. La formule (1) permet de calculer, avec une bonne approximation, la valeur du module d'élasticité d'un béton cellulaire autoclavé ayant une masse volumique comprise entre 400 et 700 kg/m³, avec un taux d'humidité compris entre 3 et 10 %.

$$E = k\rho_{sec}\sqrt{\sigma_c} \tag{1}$$

E est le module d'élasticité tangent, en MPa, ρ_{sec} est la masse volumique apparente du matériau, en kg/m³, σ_c est la résistance à la compression du matériau, en MPa, et k est un coefficient variable entre 1 et 1.5 et dépendant de la masse volumique du matériau et de son humidité.

La résistance à la compression varie en fonction de la masse volumique du matériau et de son taux d'humidité. Le matériau possède une bonne stabilité dimensionnelle. A une température de 20°C et une humidité relative de 43 %, la variation dimensionnelle varie de 0,1 à 0,5 mm/m. Il ne contient pas de matières combustibles, possède une bonne résistance au feu et offre deux fois plus de protection aux incendies que le béton lourd [2,3].

COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU MATERIAU

La vitesse de chargement influe largement sur la contrainte du matériau. Sur le diagramme contrainte-déformation longitudinale et transversale (Fig. 2 et 3), on observe, au début, une linéarité du comportement. Le coefficient de Poisson peut être déterminé par la relation suivante [4, 5]:

$$-\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \tag{2}$$

ν est le coefficient de Poisson, ε_t est la déformation transversale et ε_l est la déformation longitudinale. La variation de volume s'écrit [4]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_l(1 - 2\nu) \tag{3}$$

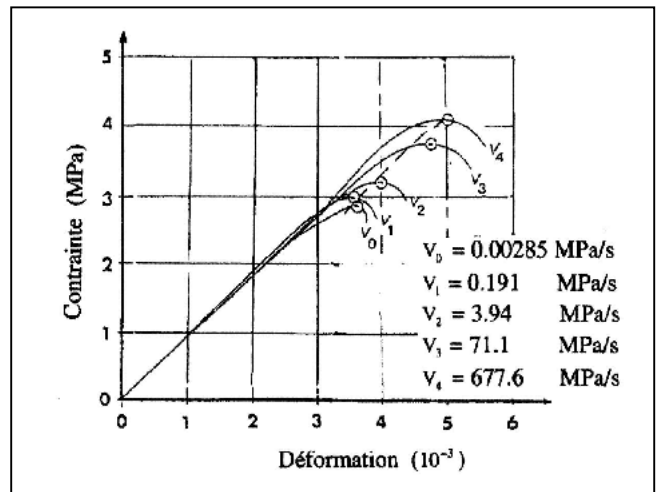


Figure 2: Influence de la vitesse de chargement sur les contraintes et les déformations [5].

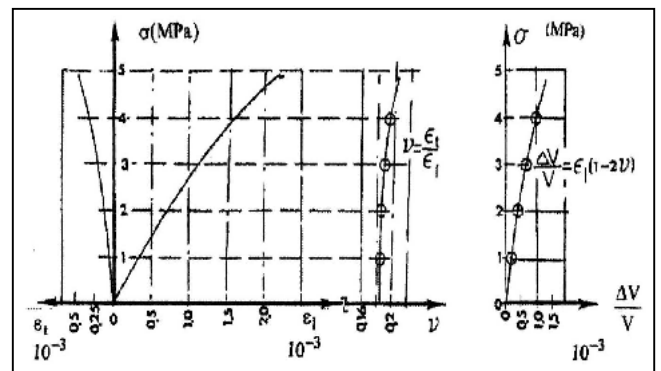


Figure 3: Diagramme contrainte-déformation transversale, déformation longitudinale et coefficient de Poisson et contrainte - variation de volume [5].

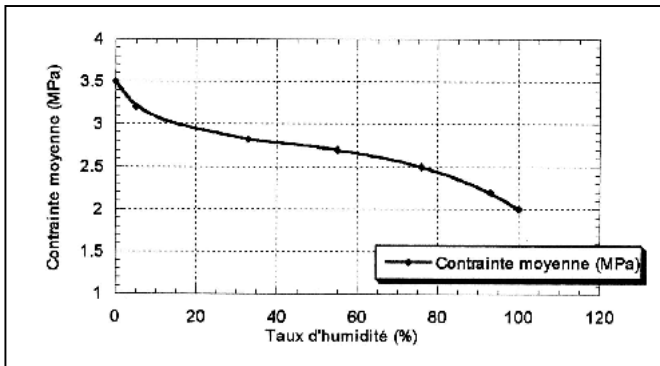


Figure 4: Contraite moyenne critique en fonction du taux d'humidité dans le matériau.

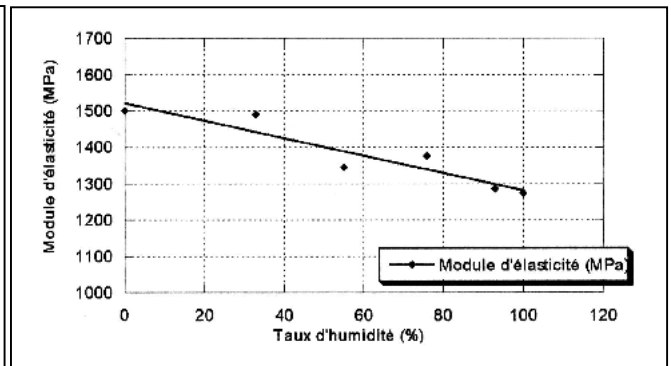


Figure 5: Module d'élasticité en fonction du taux d'humidité dans le matériau.

Les valeurs du module d'élasticité augmentent avec l'accroissement de la masse volumique et la contraite de traction et de compression du matériau. Entre 0 % et 100 % d'humidité, la contraite moyenne à la compression diminue presque de 50 % (Fig. 4), alors que le module d'élasticité diminue de 14% (Fig. 5). Cette chute de résistance est due principalement à la diminution de la résistance des ponts intercellulaires provoquée par la présence de l'eau dans les pores du matériau [6].

CARACTERISTIQUES PHYSIQUE ET MECANIQUE DU MATERIAU ETUDIE

Les propriétés physiques et mécaniques du matériau sont présentées dans le tableau 1, les valeurs représentant la moyenne de six essais.

ρ (kg/m ³) Masse volumique	σ_c (Mpa) compression	σ_f (MPa) Traction	P(%) porosité	W(%) capacité d'absorption	λ (W/mh°C) cond. thermique
546	3.5	0.94	70	42	0.12

Tableau 1: Caractéristiques physiques et mécaniques du matériau étudié.

TECHNIQUE EXPERIMENTALE

Description des machines cinématique et hydraulique

Les essais mécaniques ont été effectués sur des machines quasi-statique 200 kN et 100 kN au Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux de l'Université de Metz (France).

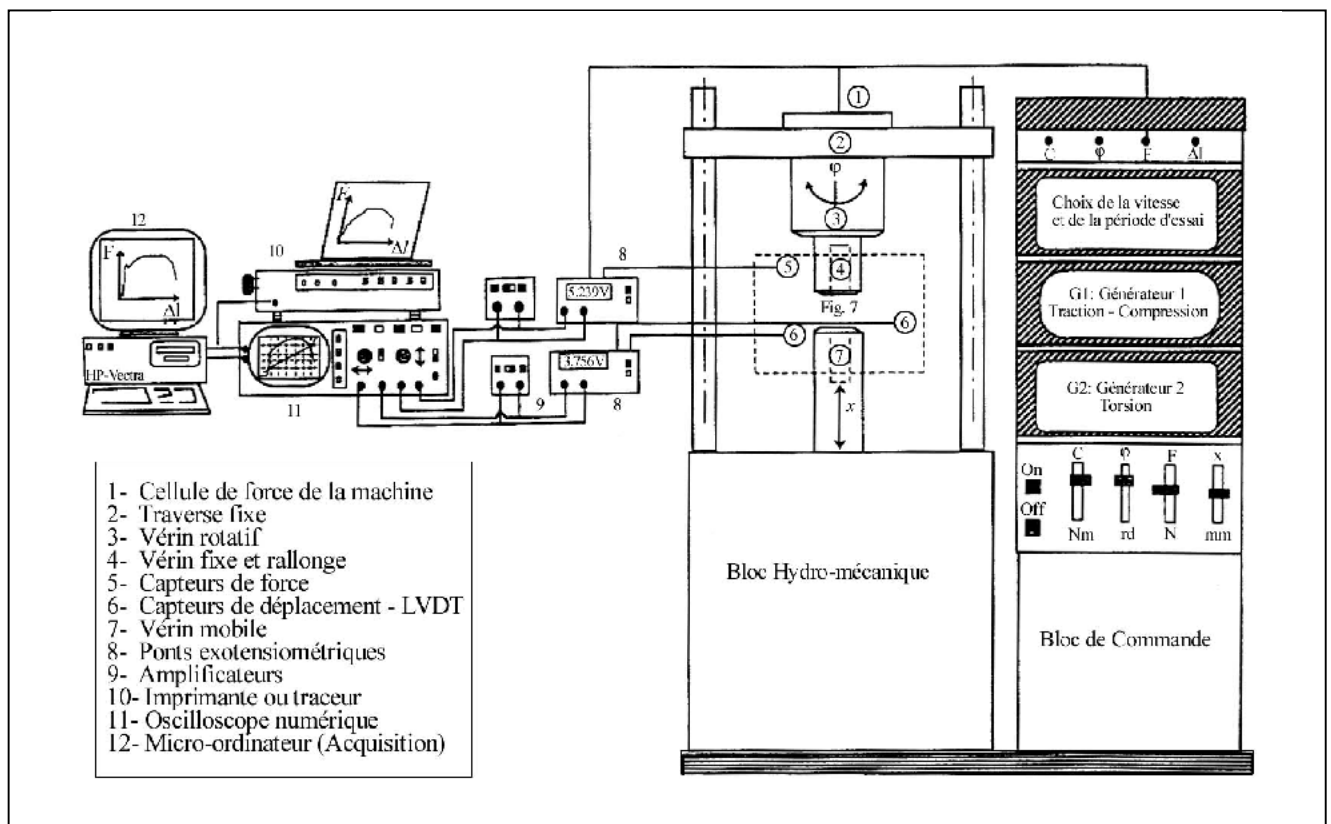


Figure 6: Descriptif de la machine hydraulique 100 kN [6].

La machine de 200 kN (Fig. 6) est composée d'une partie mécanique comportant un bloc équipé de deux traverses indépendantes. La force maximale de pression de la machine est de 200 kN. La machine hydraulique 100 kN peut effectuer des essais en traction / compression et en torsion rapide. La force maximale est de 100kN. Le principe de chargement de l'éprouvette et l'enregistrement des déplacements et des forces sont schématisés par la figure 6. Les essais de compression précise ont été développés au Canada par Klepaczko [6]. L'éprouvette est placée entre les deux plaques dont l'une est fixe et l'autre est mobile. Dans le but de minimiser le problème de contact entre les plaques et les faces de l'échantillon, une rotule en acier est incorporée à la plaque actionnée par le vérin. La rotule permet de rattraper les imperfections de planéité des faces de l'éprouvette et éviter les concentrations de contraintes (Fig. 7). On impose la vitesse de déplacement entre la plaque mobile et celle immobile de la machine en choisissant, sur le bloc de commande, le parcours maximal souhaité et la période de l'essai. Le déplacement du vérin est obtenu par un système de mesure, développé au LPMM et formé par deux capteurs de déplacement du type LVDT (Linear Variable Differential Transducer).

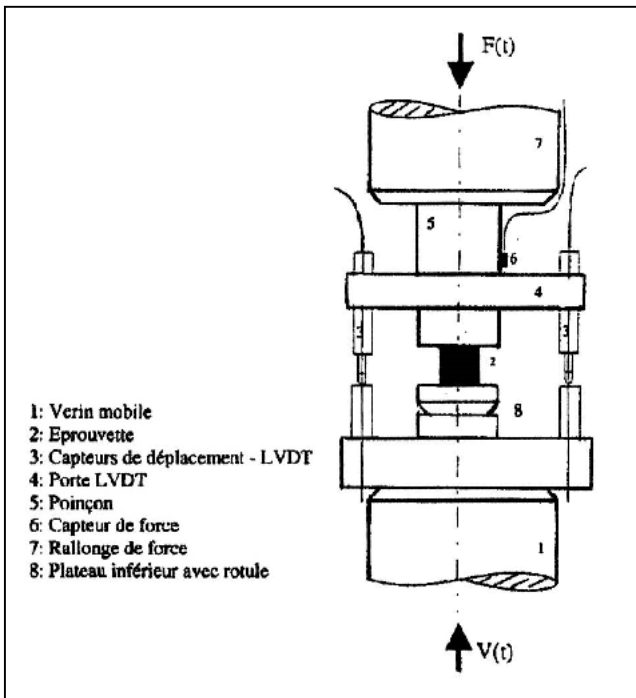


Figure 7: Dispositif du montage avec le système de mesure de déplacement, LVDT [6].

Ces derniers sont montés en parallèle avec l'éprouvette, et placés symétriquement sur la rallonge de la traverse fixe, de façon à mesurer avec précision le déplacement des deux cotés de l'éprouvette (voir le principe de mesure). Celui-ci est relatif à la déformation de l'éprouvette. La force développée par la machine est mesurée par l'intermédiaire d'un capteur de force incorporé à la machine et monté en série avec l'éprouvette. L'ensemble de la machine est relié à une série d'appareils électronique et informatique permettant la visualisation en temps réel de l'évolution des

signaux de déplacement et de la force en fonction du temps. Il permet aussi l'enregistrement numérique de ces derniers. Un exemple d'oscillogramme obtenu à l'état brut et représentant la force et les déplacements en fonction du temps est illustré par la figure 8.

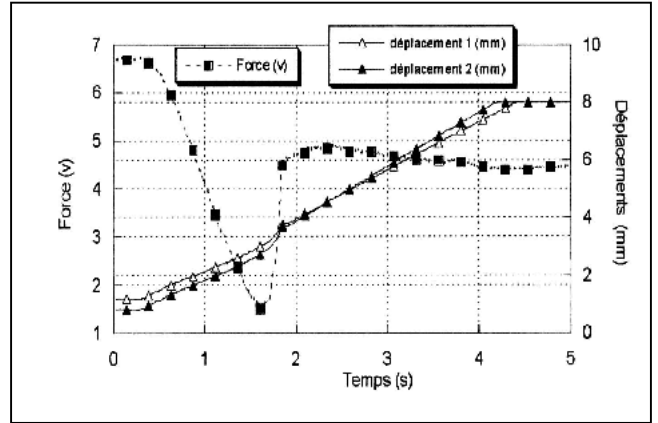


Figure 8: Oscillogramme obtenu et représentant les déplacements $U_1(t)$, $U_2(t)$ et la force $F(t)$ d'un essai à une vitesse de 10^{-3} s^{-1} sur la machine 100 kN.

PRINCIPE DE MESURE

Le principe de mesure est basé sur les valeurs des signaux obtenus. A partir de la valeur des signaux mesurés, on peut déterminer le déplacement moyen qui est fonction de la moyenne des deux mesures de déplacement.

$$D(t) = \frac{U_1(t) + U_2(t)}{2} \quad (4)$$

La déformation $\varepsilon(t)$ de l'échantillon et la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}(t)$ sont respectivement exprimées par:

$$\varepsilon(t) = \frac{D(t)}{h} \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{1}{h} \frac{d}{dt} [D(t)] \quad (6)$$

où h étant la hauteur de l'éprouvette.

A partir de la force mesurée, on peut calculer la contrainte par la formule suivante :

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{a.b} \quad (7)$$

$F(t)$ est la force mesurée par la cellule de la machine, et a et b sont les dimensions de l'éprouvette. Les résultats obtenus nous permettent de construire les courbes suivantes: $U(t)$, $F(t)$, $\varepsilon(t)$, $\dot{\varepsilon}(t)$, $\sigma(\varepsilon)$ et d'essayer en plus, de connaître l'histoire des vitesses et les sensibilités à la vitesse de déformation β , la valeur de la sensibilité logarithmique à la vitesse de déformation du matériau ainsi que le taux d'érouissage η , pour une plage de vitesses de déformation variant de 10^{-4} s^{-1} à 10 s^{-1} :

$$\beta = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \log \dot{\varepsilon}} \right)_{\varepsilon} \quad (8)$$

$$m = \left(\frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\varepsilon}} \right)_{\varepsilon, t} \quad (9)$$

$$\eta = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} \right)_{\varepsilon, t} \quad (10)$$

ESSAIS ET RESULTATS

Nous avons réalisé des essais sur une plage de vitesses de déformations de 10^{-4} s^{-1} à 10 s^{-1} . Une série de trois essais a été effectuée pour chacune des vitesses de déformation. Nous avons relevé toutes les valeurs des contraintes maximales et minimales. L'ensemble des résultats nous permet d'étudier l'influence de la vitesse de déformation sur les contraintes maximales et les contraintes minimales du matériau.

Après dépouillement, on trace les courbes contrainte-déformation. Les valeurs des contraintes maximales et minimales augmentent avec l'accroissement de la vitesse de déformation. Cet accroissement est plus important pour les valeurs maximales que pour les valeurs minimales. La pente est plus grande pour un matériau saturé d'eau que pour un matériau sec (Fig. 9 et 10). De ce fait, l'accroissement de la vitesse de déformation a engendré un accroissement des logarithmes des contraintes maximales et minimales (Fig. 11 et 12).

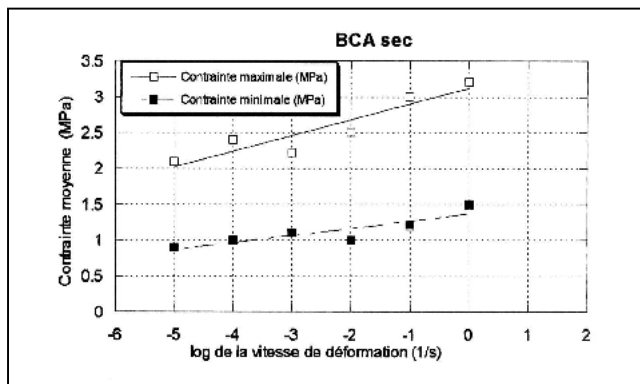


Figure 9: Contraintes moyennes maximales et minimales en fonction du logarithme de la vitesse de déformation.

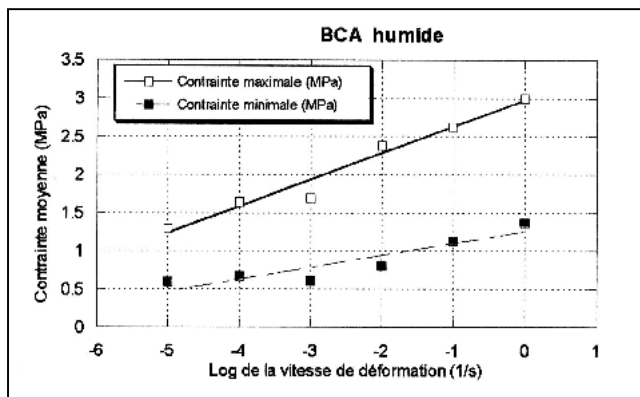


Figure 10: Contraintes moyennes maximales et minimales en fonction du logarithme de la vitesse de déformation.

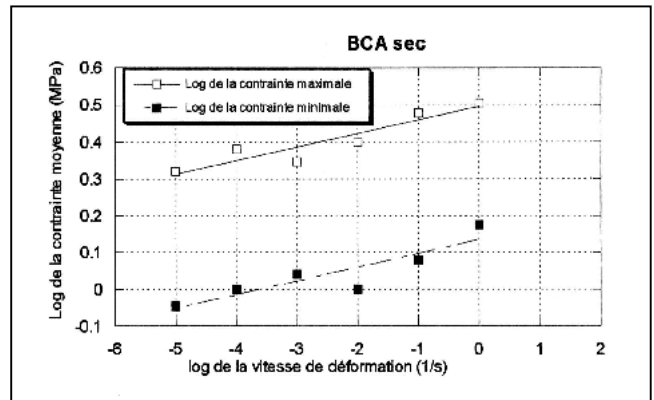


Figure 11: Logarithme de la contrainte maximale et minimale en fonction du logarithme de la vitesse de déformation.

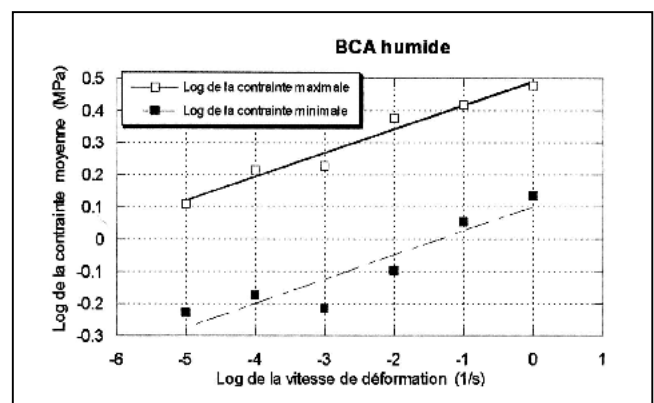


Figure 12: Logarithme de la contrainte maximale et minimale en fonction du logarithme de la vitesse de déformation.

Les valeurs de β varient de 0,219 à 0,348 MPa pour les contraintes maximales, et de 0,1 à 0,156 MPa pour les contraintes minimales. Si nous comparons ces valeurs avec celle d'un mini-béton ou la valeur de β est égale à 4,7 MPa [7], on peut conclure qu'elles sont faibles, car elles dépendent directement de la valeur de la contrainte.

Les valeurs de la sensibilité logarithmique m varient de 0,236 à 0,074 pour les contraintes maximales, et de 0,037 à 0,075 pour les contraintes minimales, alors que les valeurs de η varient de 0,892 à 0,98, proches de 1. Ces valeurs confirment bien l'exactitude des résultats trouvés.

Le module d'élasticité du matériau, déterminé correctement par la pente de la partie élastique du matériau et après correction de la rigidité de la machine, diminue avec l'augmentation du taux d'humidité. Pour un béton cellulaire autoclavé sec, la valeur moyenne est de 1,484 GPa alors qu'à l'état humide, elle est de 1,388 GPa.

Le rapport entre les modules d'élasticité du matériau à l'état sec et à l'état humide $\frac{E_{sec}}{E_{hum}}$ est égal à 1,07. Cette

valeur du module d'élasticité diminue de 7 % et représente 93 % de la valeur à l'état sec (Fig. 13). Cette diminution est influencée par la résistance mécanique du matériau et sa masse volumique. Tous les résultats obtenus confirment bien les données bibliographiques.

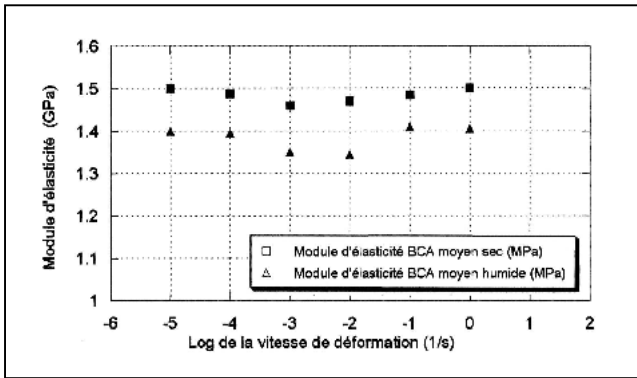


Figure 13: Valeurs du module d'élasticité du matériau.

CONCLUSION

En procédant à ces essais quasistatiques sur du béton cellulaire autoclavé, nous avons pu maîtriser la technique expérimentale pour une large gamme de vitesses de déformation, variable de 10^{-4} s^{-1} à 10 s^{-1} . En se référant aux résultats expérimentaux, il apparaît que l'augmentation de la vitesse de déformation induit une croissance des contraintes maximales et minimales du béton cellulaire autoclavé dans ces deux états: sec et saturé d'eau. Il apparaît également que l'accroissement des contraintes du matériau humide avec les vitesses de chargement est aussi important que celui d'un matériau sec. La valeur du module d'élasticité diminue avec l'augmentation de l'humidité du matériau.

Le matériau possède une bonne sensibilité à la vitesse de déformation.

Ce travail nous a permis de déterminer les valeurs de β , m et η du matériau. Le module d'élasticité du matériau diminue avec l'augmentation de la capacité d'absorption d'eau. En plus de l'effet de la vitesse de déformation, il faut tenir compte de l'effet de l'humidité du matériau et la considérer dans une éventuelle proposition d'une loi de comportement du matériau.

REFERENCES

- [1]- Cormon P., "Bétons légers d'aujourd'hui", Eyrolles, (1982), pp 231-245.
- [2]- Documentation, Siporex, AB. Suède, (1986), pp.5-8.
- [3]- Eden N.B.E., Manthorpe A.R., Miell S.A, Szymanek P.H. and Watson K.L., "Autoclaved aerated concrete from slate waste, Part 1: Some property/density relationships", The International Journal of Lightweight Concrete, (1980), pp 95-100.
- [4]- Wittman F.H. and Gheorghita I., "Fracture toughness of autoclaved aerated concrete, Cement and Concrete Research", Pergamon Press, USA, (1984), pp. 369-374.
- [5]- Gheorghita I.M. et Wittman F.H., "La mécanique de la rupture appliquée au béton cellulaire autoclavé, Chronique des Matériaux de Construction, Chantiers Suisse", vol. 15, (1988), pp 451-456.
- [6]- Klepaczko J.R. "Quasi-static and Dynamic Compression Behavior of Coal", Report n°1, Department of Mech. Eng. The university of Manitoba, Canada, (1982).
- [7]- Rapport scientifique "Greco-Géomatériaux" (sols, bétons, roches), France, (1992), pp.109-110. □