

## APPLICATION DU TUBE D'HOPKINSON POUR LES ESSAIS A GRANDE VITESSE DU BETON CELLULAIRE AUTOCLAVE

Reçu le 07/03/2006 – Accepté le 13/05/2008

### Résumé

Cette recherche expérimentale est basée sur l'utilisation du tube d'Hopkinson pour étudier le comportement du béton cellulaire autoclavé aux grandes vitesses de déformation. Les vitesses de déformation varient de  $143 \text{ s}^{-1}$  et  $10^3 \text{ s}^{-1}$ .

Le matériau se présente dans deux états différents (état sec et état saturé d'eau), l'augmentation de la vitesse de déformation donne une augmentation des contraintes critiques du béton cellulaire autoclavé. Le matériau présente une sensibilité à la vitesse de déformation.

**Mots clés :** Tube d'Hopkinson, béton cellulaire autoclavé, comportement dynamique, sensibilité à la vitesse de déformation

### Abstract

This research is based on Split Hopkinson Pressure Bar for study the behavior of autoclaved aerated concrete at high strain rates. The strain rates varying from  $143 \text{ s}^{-1}$  and  $10^3 \text{ s}^{-1}$ .

The material presents in two states (dry and saturated with water). An increase of strain rate causes an increase of the critical stress in autoclaved aerated concrete. The material shows a positive strain rate sensitivity.

**Keys words :** Split Hopkinson Pressure Bar, autoclaved aerated concrete, dynamic behavior, strain rate sensitivity.

<sup>1</sup> R. BELOUETTAR

<sup>2</sup> M. T. ABADLIA

<sup>3</sup> J. R. KLEPACZKO

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Civil, Université de Annaba Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire de Recherche des Matériaux Métalliques et Composites - Université de Boumerdes Algérie.

<sup>3</sup> Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux, CNRS UMR 7554, Université de Metz. Metz France

### ملخص

يعتمد هذا البحث على استعمال أعمدة هوبكنسون (tube d'Hopkinson). ركزت الدراسة على عدة تجارب بسرعة كبيرة على العمود واقعة بين  $10^3 \text{ s}^{-1}$  و  $143 \text{ s}^{-1}$ .

درست في المادة حالتين : حالة جافة و حالة معبئة بالماء. ارتفاع سرعة التشويه يعطي زيادة في مقاومة الشد للخرسانة الخلوية. تظهر المادة حساسية اجابية السرعة التشويه.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة الخلوية حساسية لسرعة التشويه أعمدة هوبكنسون

Le béton cellulaire autoclavé est un aggloméré fabriqué à partir des matières premières : sable finement broyé, ciment, eau, plâtre huile soluble auxquels on ajoute de la poudre d'aluminium. Les matières premières sont mélangées dans un malaxeur dans lequel vient s'ajouter la poudre d'aluminium. Le coulis est ensuite versé dans des moules.

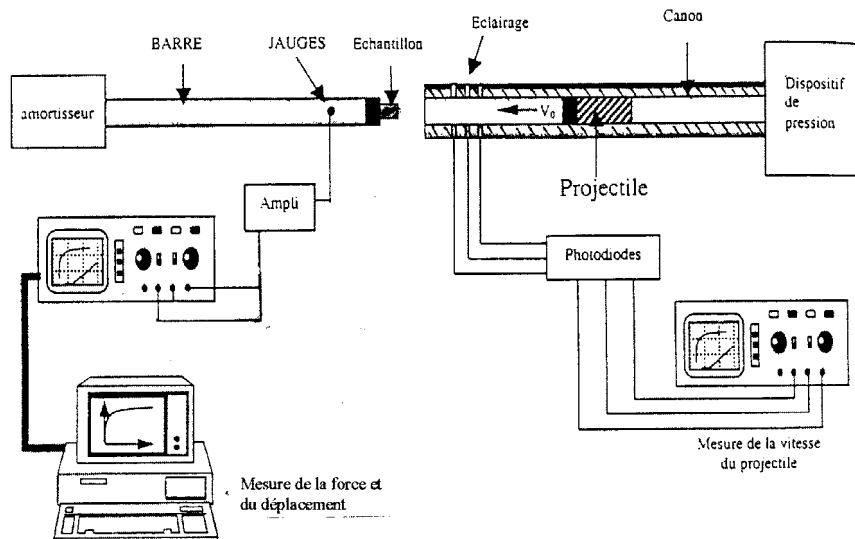
Par réaction entre l'hydroxyde de calcium et la poudre d'aluminium, il se produit un dégagement d'hydrogène qui contribue au gonflement de la pâte de la masse du béton et à la formation des pores. Après la prise, le produit est découpé en panneaux et traité. Le durcissement s'effectue dans un autoclave en soumettant le produit à la vapeur saturée. Le matériau est caractérisé par une bonne conductibilité thermique, des résistances moyennes et une faible masse volumique

## 1. LES ESSAIS DYNAMIQUES

Les premiers essais mécaniques à grande vitesse de déformation ont été réalisés en 1870 par Hopkinson qui avait mis au point un type d'appareillage fonctionnant par impact, appelé depuis "barre d'Hopkinson".

A partir de 1949, cette technique s'est développée sur l'initiative de Kolsky. Depuis, plusieurs dizaines de laboratoires dans le monde possèdent une (ou des) barres d'Hopkinson. Bien que le principe de base est toujours le même, les montages diffèrent les uns des autres.

Pour les essais à grandes vitesses, la technique la plus utilisée pour l'étude des propriétés des matériaux est celle basée sur le dispositif en barre ou tube d'Hopkinson "Split Hopkinson Pressure Bar" (SHPB).



**Figure 1** : Montage en barre d'Hopkinson, impact direct

Les bétons cellulaires sont utilisés dans les constructions civiles et industrielles. Cependant, ce matériau n'est pas très résistant peut être écrasé facilement. Il paraît que pendant un impact, le produit peut être pulvérisé sans difficulté.

Le comportement est important, par exemple, en cas de tremblement de terre ou chargements de courte durée causés par un impact. Parce que la structure cellulaire est très fragile et tend à s'écraser instantanément près la zone du chargement.

L'intérêt de cette étude est de connaître la sensibilité du matériau aux grandes vitesses de déformation (aux chargements instantanés).

Son principe repose sur la théorie de la propagation des ondes élastiques dans le tube et permet d'obtenir des vitesses de déformation élevées et comprises entre  $10^2 \text{ s}^{-1}$  et  $5.10^3 \text{ s}^{-1}$  [1], [2], [3].

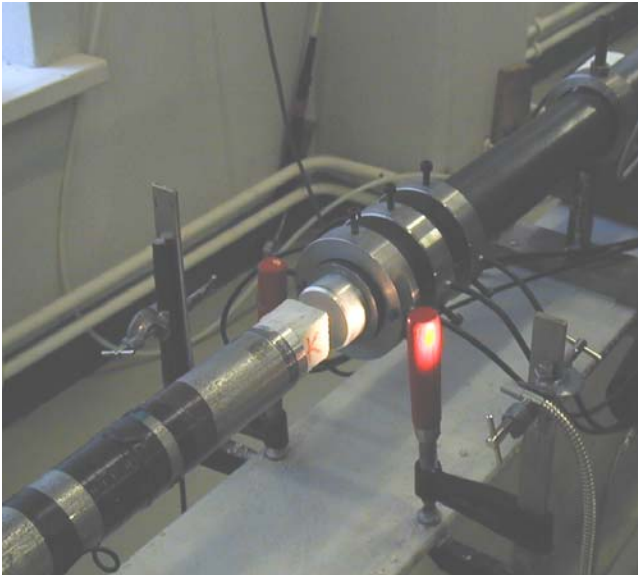
## 2. DESCRIPTION DU MONTAGE UTILISE EN CHARGEMENT DYNAMIQUE

Le montage utilisé dans nos essais est représenté sur la figure 1. Il permet de traduire l'impact direct d'un projectile sur l'échantillon en contact de la barre élastique dite transmettrisse (figure 2). Ce dispositif fonctionne de la façon suivante (figure 1) :

Un canon tire un projectile à une vitesse souhaitée. Sur l'éprouvette, lors du contact, le projectile crée une onde incidente qui se propage le long de l'éprouvette. Une partie de cette onde est alors réfléchiée et une autre partie est transmise dans le tube.

**Figure 2 :** Vue du dispositif de fixation de l'éprouvette sur la barre

Le montage est relié à un oscilloscope qui



enregistre l'onde transmise en fonction du temps grâce à des jauges extensométriques. La première mesure réalisée est la vitesse du projectile avant l'impact.

Elle se fait grâce à un système de trois sources de lumière et photodiodes couplées à deux compteurs de temps. La connaissance de la vitesse en ces deux points de mesure permet de définir la vitesse  $v(t)$  du projectile avant l'impact.

Le déplacement de la partie centrale  $U_c(t)$  de l'échantillon est mesuré par le biais d'un extensomètre optique qui se déclenche lors du mouvement de la cible collée sur l'échantillon. La dernière mesure faite durant l'essai est l'intensité de l'onde transmise  $\varepsilon_i(t)$  grâce à des jauges extensométriques collées sur la barre d'Hopkinson.

Ces jauges sont placées à une distance égale à cinq fois le diamètre du tube de façon à éviter les problèmes de réflexion d'ondes. Toutes ces valeurs sont amplifiées et transférées vers des oscilloscopes numériques possédant une fréquence d'acquisition élevée.

Une fois, cette acquisition faite, les données sont transférées vers un PC par l'intermédiaire d'une carte de communication IEEE pour le traitement numérique.

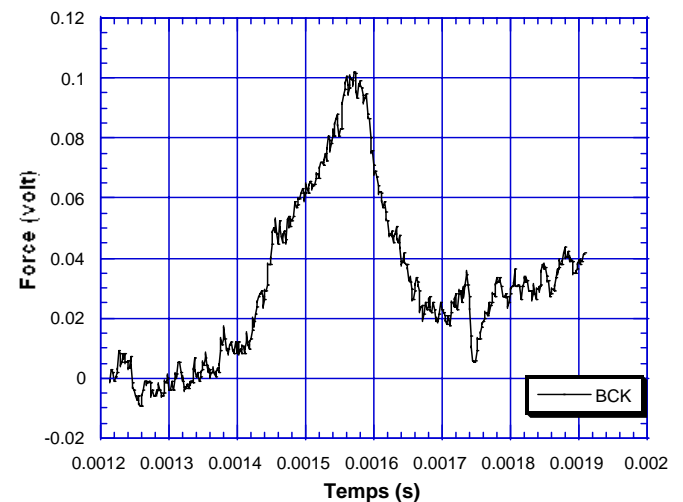
La figure 3 représente une allure caractéristique d'un oscillogramme donnant la force en volt en fonction du temps en seconde [4], [5], [6].

### 3. FORME DES EPROUVETTES ET CARACTERISTIQUES DES PROJECTILES UTILISES

Les essais ont été effectués sur un ensemble d'éprouvettes de forme cubique (35 x 35 x 35) mm de béton cellulaire autoclavé dont les propriétés sont représentées dans le tableau 1.

$\rho$  est la masse volumique en  $kg/m^3$

$\sigma_c$  et  $\sigma_f$  sont les contraintes de compression et de flexion en MPa

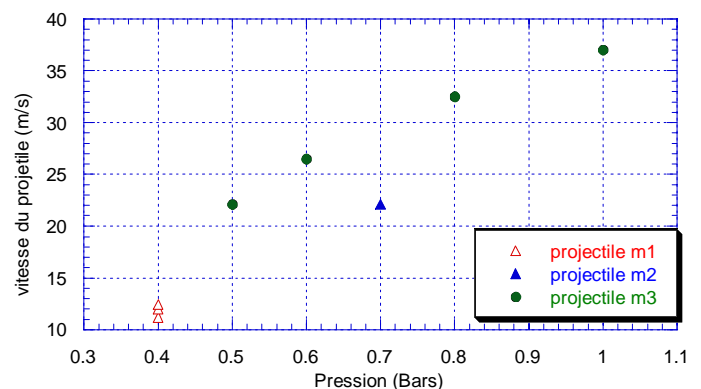


**Figure 3 :** Oscillogramme représentant un essai brut

**Tableau 1.** Propriétés physiques et mécaniques du matériau

$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_f$ (MPa)	Porosité (%)
500	3.40	0.90	77.5

Les éprouvettes sont testées dans deux états différents : état sec et état saturé d'eau. Les vitesses initialement calculées des projectiles utilisés sont de l'ordre de : 5, 10, 20, 30 et 35 m/s.



**Figure 4 :** Relation entre la vitesse du projectile et la pression de propulsion

Ces dernières donnent des vitesses d'impact allant de  $143 \text{ s}^{-1}$  à  $10^3 \text{ s}^{-1}$ . Les projectiles sont usinés en aluminium 2017 A, de densité égale à 2.79 et de module d'élasticité égal à 74000 MPa.

Ils ont une forme cylindrique, de diamètre égal à 49.8 mm.

Les masses des projectiles ont été déterminées en fonction des énergies cinétiques calculées en fonction des valeurs des contraintes maximales et minimales obtenues lors des essais quasistatiques à des vitesses inférieures [7] La figure 4 met en relation la pression de propulsion du projectile et sa vitesse.

### 3.1. Impact direct du projectile sur l'éprouvette

La vitesse de déformation dans un essai est limitée par la vitesse d'impact. L'utilisation de l'impact direct du projectile à bout plat, propulsé par un canon à gaz, sur l'échantillon permet d'atteindre des grandes vitesses de déformation ( $10^5 \text{ s}^{-1}$ ) et de choisir à l'avance la vitesse d'impact du projectile.

### 3.2. Mesure de la vitesse d'impact

Elle est directement liée à la pression du canon à gaz avec laquelle il est propulsé. Le système de mesure de la vitesse d'impact est constitué de trois couples lumières photodiode placés sur l'extrémité libre du tube du canon à des distances bien définies l'une par rapport à l'autre.

Ces photodiodes sont reliées à un oscilloscope à quatre voies par l'intermédiaire de deux capteurs de temps qui sont déclenchés et arrêtés successivement au passage du projectile. La vitesse du projectile peut être déterminée avec précision au moment de l'impact (figure 2).

### 3.3. Analyse des signaux

La connaissance de l'onde transmise  $\varepsilon_t(t)$  et du déplacement de l'éprouvette  $U_{ext}(t)$  permet de définir complètement le comportement du matériau en fonction de la vitesse de déformation. En effet le déplacement réel de l'échantillon est calculé en faisant la différence entre le déplacement de la partie centrale obtenu par le capteur de déplacement optique  $U_{ext}(t)$  et le déplacement du tube  $U_{tube}(t)$

$$U_{ep}(t) = U_{ext}(t) - U_{tube}(t) \quad (1)$$

Le déplacement du tube lors de l'impact est relié directement à l'intensité de l'onde transmise et à la célérité de celle-ci par la relation suivante :

$$U_{ep}(t) = U_z(t) - U_{tube}(t) \quad (2)$$

où  $U_z(t)$  et  $U_{tube}(t)$  sont, respectivement, le déplacement total mesuré par l'extensomètre optique et le déplacement élastique du tube d'Hopkinson. Le déplacement élastique du tube peut être calculé par la formule suivante :

$$U_{bare} = C_0 \int_0^t \varepsilon_t(\xi) d\xi \quad [3]$$

$C_0$  est la célérité des ondes.

$\varepsilon(t)$  est le signal de l'onde transmise mesurée par la jauge.

La déformation nominale en fonction du temps est donnée par la formule suivante :

$$\varepsilon(t) = \frac{U_{ep}(t)}{l_0} \quad [4]$$

$U_{ep}(t)$  est le déplacement de l'éprouvette.

$l_0$  est la longueur de l'éprouvette.

### 3. 4. Mesure de la contrainte

La mesure de la contrainte est déterminée par le biais des jauges extensométriques à fil résistant. La contrainte ainsi que la force peuvent être déterminées en fonction du signal de l'onde transmise, [8].

$$\sigma_t(t) = E_{tube} \cdot \varepsilon_t(t) \quad [5]$$

$$F_t(t) = E_{tube} \cdot A_{tube} \cdot \varepsilon_t(t) \quad [6]$$

$E_{tube}$  est le module d'élasticité de la barre et  $A_{tube}$  est la section de la barre.

Dans le cas de la compression, la force qui agit sur la surface de contact de la barre et de l'éprouvette est la même, la force peut s'écrire de la manière suivante :

$$F_{ep}(t) = F_{tube}(t) = E_{tube} \cdot A_{tube} \cdot \varepsilon_t(t) \quad [7]$$

la contrainte de compression est alors:

$$\sigma_n(t) = \frac{F_{ep}(t)}{A_{ep}} \quad [8]$$

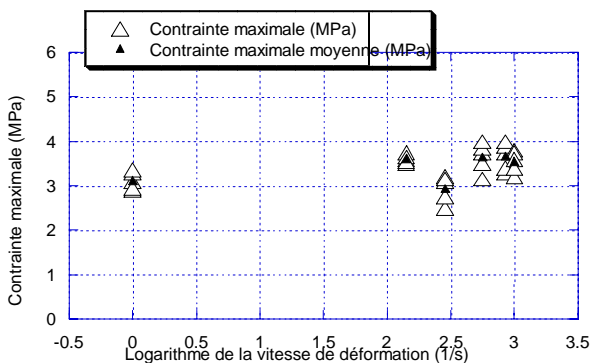
## 4. RESULTATS OBTENUS

Cinq vitesses ont été programmées pour les différents essais : 5, 10, 20, 30, et 35 m/s. Nous avons réalisé cinq essais par vitesse de déformation et calculé la moyenne des valeurs. Après dépouillement, tous les résultats ont été regroupés. L'analyse est portée sur les variations des contraintes et des logarithmes des contraintes en fonction des logarithmes des vitesses de déformation.

#### 4.1. Discussions des résultats

Comme le montrent les figures 5, 6, 7 et 8, le matériau humide présente une meilleure contrainte maximale par rapport au matériau sec. La sensibilité est observée entre les vitesses  $10 \text{ s}^{-1}$  et  $143 \text{ s}^{-1}$ . A partir de cette dernière vitesse, on remarque une diminution des contraintes par rapport à l'augmentation des vitesses de déformation, ensuite une augmentation de ces contraintes. Ceci est dû essentiellement à une faible célérité du matériau cellulaire. Il ressort des résultats obtenus lors des essais dynamiques des bétons cellulaires autoclavés que :

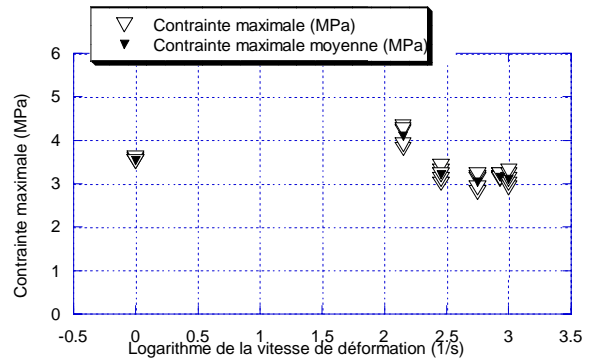
- Le béton cellulaire autoclavé possède une sensibilité à la vitesse de déformation positive surtout aux grandes vitesses. Le matériau atteint une valeur maximale de  $3.75 \text{ MPa}$  (en état sec) et  $4.00 \text{ MPa}$  (à l'état humide) pour une vitesse d'impact de  $143 \text{ s}^{-1}$ . Dans ce comportement intervient l'effet de saturation des pores en eau.
- Au delà d'une vitesse de déformation égale à  $143 \text{ s}^{-1}$ , la contrainte du matériau diminue. Cette chute est due principalement à la propagation des ondes au niveau du matériau provoquée par la faible célérité. Quand la vitesse est élevée, le matériau subit un endommagement sur une certaine épaisseur, la propagation des ondes sur l'autre partie s'avère difficile : la transmission des ondes est perturbée.
- La géométrie de l'éprouvette, sa forme et ses dimensions dans ce genre d'essais jouent un rôle important.



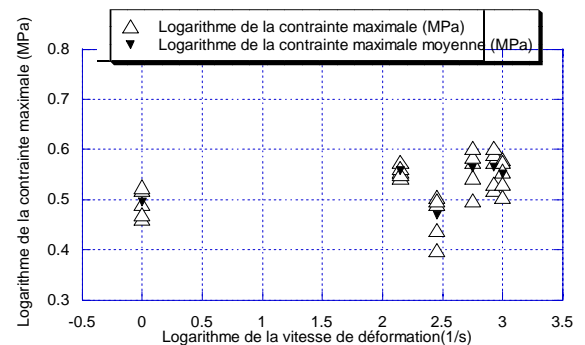
**Figure 5 :** Contrainte maximale en fonction du logarithme des vitesses de déformation pour le béton cellulaire autoclavé sec

#### CONCLUSION

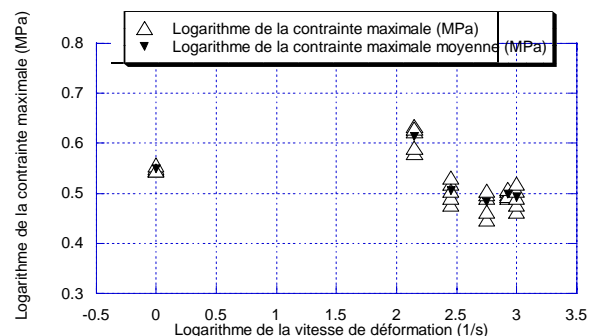
En procédant aux essais dynamiques du béton cellulaire autoclavé, nous avons su maîtriser la technique expérimentale sur la barre d'Hopkinson



**Figure 6 :** Contrainte maximale en fonction du logarithme des vitesses de déformation pour le béton cellulaire autoclavé humide



**Figure 7.** Logarithme de la contrainte maximale en fonction du logarithme des vitesses de déformation pour le béton cellulaire autoclavé sec



**Figure 8.** Logarithme de la contrainte maximale en fonction du logarithme des vitesses de déformation pour le béton cellulaire autoclavé humide

pour une large gamme de vitesse de déformation variant de  $143 \text{ s}^{-1}$  à  $10^3 \text{ s}^{-1}$ .

Cette nouvelle technique expérimentale basée sur la propagation des ondes reste un moyen valable pour les essais à grandes vitesses.

En se référant aux résultats expérimentaux obtenus en dynamique, il apparaît que l'augmentation de la vitesse de déformation jusqu'au seuil d'une vitesse de  $143 \text{ s}^{-1}$  induit une croissance des contraintes maximales du béton cellulaire autoclavé dans ses 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.

Le béton cellulaire autoclavé possède une sensibilité positive à la vitesse de déformation.

### REFERENCES

- [1] Kolsky H., « An investigation of the mechanical properties of materials at very rates of loading » Proc. Phys. Soc., London B.62, (1949), p. 672.
- [2] Kolsky H., « Waves in Solids » (1952) edit New York, Dover Publication, INC.
- [3] Hopkinson B., « A method of measuring the pressure produced in the detonation of explosives or by impact of bullets » (1913) Phi ; Trans. Royal Society of London, Series A 213.
- [4] Brara A., [1999], « Étude expérimentale de la traction du béton par écaillage ». Thèse de doctorat de l'université de Metz. .
- [5] Rusinek A., [2000], « Modélisation thermoviscoplastique d'une nuance de tôle d'acier aux grandes vitesses de déformation. Étude expérimentale et numérique du cisaillement, de la traction et de la perforation », Thèse de doctorat de l'université de Metz.
- [6] Jarkas M., [1999], « Étude expérimentale et modélisation du comportement viscoplastique du titane pur à grande vitesse de déformation ». Thèse de doctorat de l'université de Metz.
- [7] Belouettar R., Klepaczko J. R., Abadlia M.T « Etude du comportement mécanique du béton cellulaire autoclavé produit en Algérie » Revue Sciences et technologie N ° 18 pp 49- 54 (2002)
- [8] Klepaczko J. R., « Quasi-static and Dynamic Compression Behavior of Coal », Report n°1, Département of Mech. Eng. The University of Manitoba, Canada, (1982).