

Évaluation non destructive des propriétés d'un béton allégé par ultrason et tomographie x

Agnès Zambon¹, Zoubir Mehdi Sbartai¹, Nadia Saiyouri¹

¹I2M, Université de Bordeaux, UMR 5293, CNRS, 351 cours de la libération, 33405 Talence cedex

RESUME Cet article présente une étude expérimentale sur l'évaluation non destructive d'un béton allégé à base de sédiment marins et de mousse. Une méthodologie de formulation spécifique à ce type de béton a été mise en œuvre et l'effet de l'incorporation d'une mousse pour alléger le matériau a été étudié. Les mesures par ultrason ont permis de suivre l'évolution de la résistance. La tomographie par rayon x a été également implémentée pour voir la distribution des vides dans le matériau avant et après incorporation d'une mousse. Les résultats montrent une bonne relation entre vitesse des ultrasons et résistance à la compression pour l'ensemble des formulations. Les mesures par tomographie ont montré un effet très significatif de l'ajout de la mousse sur l'augmentation des vides et la baisse de la densité du béton.

ABSTRACT This paper presents an experimental study on the non-destructive evaluation of a light concrete based on marine sediment and foam. A specific formulation methodology for this type of concrete was implemented and the effect of incorporating foam to lighten the material was studied. The ultrasonic measurements make it possible to follow the variation of the resistance. X-ray tomography has also been implemented to observe the distribution of voids in the material before and after incorporating foam. The results show a good relationship between ultrasound and resistance for all formulations. Tomography measurements have shown a very significant effect of the addition of foam on the increase of voids and the decrease in concrete density.

Mots-clefs Ultrasons, béton allégé, mousse, sédiments, tomographie x.

I. INTRODUCTION

L'activité de dragage consiste à enlever les fonds marins dans les ports dans le but de sécuriser la navigation et l'aménagement d'un quai en assurant une hauteur d'eau suffisante pour le passage des bateaux. La quantité de sédiments dragués en France chaque année s'élève à environ 50 millions de mètres cubes. Jusque dans les années 80, la solution utilisée pour se débarrasser des sédiments marins était le relargage en mer. Cependant, cette méthode représente une menace pour l'écosystème littoral. Le devenir des sédiments marins issu du dragage a donc fait l'objet d'une réglementation qui impose de les mettre en dépôt à terre. La valorisation des sédiments marins est donc un enjeu écologique et économique.

Cette étude présente l'évaluation par Contrôle Non Destructif (CND) d'un nouveau matériau cimentaire allégé par de la mousse et incorporant des fines argileuses issues du dragage du bassin d'Arcachon. Les résultats montrent un effet significatif de l'incorporation de la mousse sur la

résistance mécanique et la porosité et une très bonne corrélation entre mesures par ultrasons et résistance mécanique. La tomographie X a montré la formation de bulles d'air qui sont provoquées par l'incorporation de la mousse.

II. Programme expérimental

A. Formulation et préparation des échantillons testés

La méthode de formulation du béton utilisée est basée sur la mesure de la limite de liquidité (notée w_L) des sédiments marins qui permet d'ajuster la quantité d'eau pour la fabrication du béton allégé (Horpibulsuk, 2014). Cette quantité d'eau est notée w et est considérée comme la teneur en eau des sédiments marins. Il existe une valeur optimale du rapport w/w_L au delà de laquelle l'augmentation de l'eau ne permet pas de faire baisser la densité du béton. Cette valeur optimale est déterminée en représentant graphiquement la densité à l'état frais en fonction de ce rapport. Les paramètres fixés pour la formulation des bétons étudiés sont : le pourcentage massique de ciment CEM I 52,5 (12, 15, 18%), le rapport w/w_L (1,25 ; 1,5 ; 1,75 ; 2), le pourcentage volumique de mousse (0, 30, 50%).

Après malaxage avec une vitesse de 30tr/min, le béton a été mis dans des moules cubiques de dimension $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ sans vibration. La fluidité du béton est telle que le béton est considéré auto-plaçant (étalement $> 65 \text{ cm}$). Au niveau des conditions de cure, les éprouvettes sont protégées avec du film plastique pendant 7 jours pour palier le phénomène de fissuration. Après 7 jours, les éprouvettes ont été démoulées et placées dans des bacs à humidité contrôlée de l'ordre de 90% et à une température de 20°C .

B. Essais non destructifs

La vitesse des ultrasons a été mesurée de manière directe avec les ondes de compression. Le système utilisé est constitué d'un générateur d'ondes ultrasonores relié à un capteur émetteur et un capteur récepteur d'une fréquence de 200 kHz. Un gel est appliqué pour faciliter le contact transducteur/surface du béton. Les transducteurs sont appliqués sur les faces opposées de manière à être alignés. Les mesures sont effectuées dans les trois directions. La variabilité entre les mesures de chaque direction permet d'évaluer l'isotropie du matériau. L'étude de la variabilité des mesures entre chaque éprouvette (6 éprouvettes en moyenne) d'une formulation permet d'évaluer l'homogénéité d'une gâchée. Des mesures pour différentes gâchées d'une formulation sont effectuées afin d'évaluer la répétabilité du protocole de fabrication.

L'observation au tomographe X est une technique d'imagerie non destructive qui permet la reconstruction en 3 dimensions d'un échantillon. L'acquisition des données repose sur le phénomène d'absorption des rayons X. Le tomographe enregistre par couche d'échantillon l'atténuation du faisceau qui a traversé le matériau dans différentes positions angulaires par le biais d'un écran détecteur de photons. Le rayonnement transmis après avoir traversé l'éprouvette va varier en fonction de la nature des éléments (numéro atomique Z) avec lesquels il aura interagit. Pour un faisceau de rayons X d'intensité I traversant une très fine couche de matériau d'épaisseur dx , l'intensité du faisceau émergent décroît d'une quantité dI tel que : $dI = -I \cdot \mu \cdot dx$. Avec μ est le coefficient d'absorption linéaire qui dépend du numéro atomique. Si Z est élevé, le

coefficient d'atténuation est élevé. La zone caractérisée par un coefficient d'atténuation élevé apparaît en clair après reconstruction des images. L'intégration de cette forme différentielle permet d'obtenir la loi Beer donnant l'intensité du rayonnement transmis par un matériau d'épaisseur x (Thiery, 2013) :

$$I_x = I_0 * e^{-\mu * x}$$

Le coefficient d'absorption correspond à une combinaison linéaire de la densité atomique de chaque élément i qui constitue la couche étudiée. A chaque élément i est associé un coefficient massique d'absorption μ/ρ et défini par la formule suivante :

$$\frac{\mu}{\rho} = N_A \sum_{i=1}^n w_i * \frac{\sigma_i}{A_i}$$

Avec N_A le nombre d'Avogadro, A_i la masse atomique de l'élément i , w_i la concentration pondérale de l'élément i dans le matériau, σ_i la section efficace de l'élément i .

II. Résultats et discussion

Dans la littérature plusieurs modèles reliant la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance mécanique en compression ont été établis pour estimer la résistance mécanique d'un matériau. Ces modèles sont propres au matériau et sont affectés par plusieurs facteurs ; la taille des éprouvettes, la quantité des granulats, le type de dosage en ciment, le rapport E/C et la teneur en humidité (Gregor T., 2008). La plupart des lois issues de la littérature sont de type exponentiel, polynomial ou puissance indiquant ainsi une augmentation de la résistance mécanique pour les fortes vitesses ultrasonores plus importante que pour les faibles vitesses.

La Figure 1 présente l'ensemble des valeurs de chaque éprouvette de la résistance mécanique en compression à 28 jours et de la vitesse des ultrasons associée. Le modèle le plus corrélé pour relier les deux grandeurs correspond à une loi exponentielle avec un coefficient de corrélation égal à 0,62 et d'équation :

$$R_c[\text{MPa}] = 1,09 * 10^{-1} * e^{1,49 * VU[\text{km/s}]}$$

Pour obtenir un modèle plus fiable, un modèle bi-variable reliant la résistance mécanique R_c , la vitesse des ultrasons (VU) et le pourcentage de ciment C est proposé pour l'estimation de la résistance mécanique. Ce modèle (noté $R_c=f(VU ; C)$) correspond à l'équation suivante :

$$R_c = b_0 * e^{b_1 * VU} * e^{b_2 * C}$$

La Figure 1a correspond à la simulation par ce modèle des courbes pour les différents pourcentages massiques de ciment testés. Ces courbes ont été superposées aux points expérimentaux. Pour tester la capacité du modèle, la Figure 1b présente la corrélation entre la résistance mécanique calculée par le modèle et celle mesurée expérimentalement. Le coefficient de corrélation de la régression linéaire égal à 0,88 indique une bonne qualité du modèle. Il faut cependant être prudent dans l'utilisation de ce modèle car la quantité de ciment doit être connue. En effet le nombre de formulation est réduit et les tendances déduites peuvent ne pas prendre en compte le comportement réel du matériau. Ces modèles seront testés pour l'estimation de la résistance mécanique à différents jours de cure afin de conclure sur leurs pertinences.

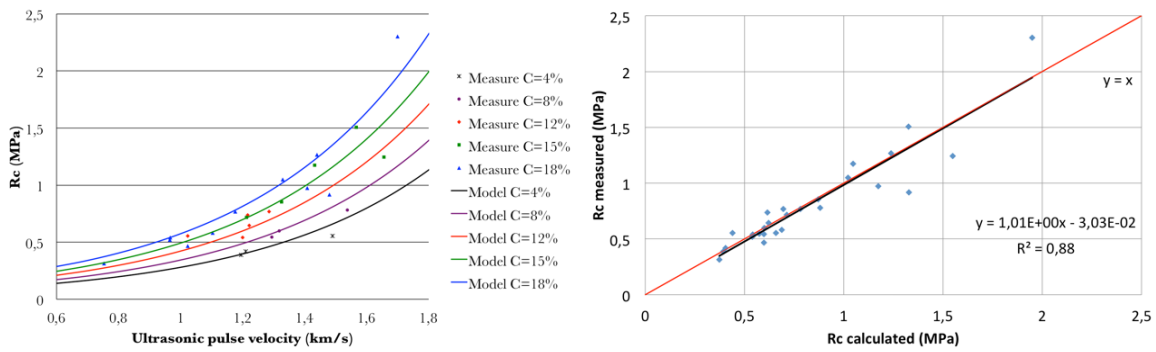


FIGURE 1. Rc en fonction de la vitesse US (a), Rc mesurée vs Rc calculée (b)

Les formulations avec $M=0\%$ présentent des fissures internes plus importantes que les formulations avec $M=50\%$ (fig 2). La présence de mousse permet en effet de diminuer les tractions internes exercées par le phénomène de rétraction de l'argile. Elles sont également d'autant plus importantes pour $C=12\%$ que pour $C=18\%$. Les images des formulations avec $M=0\%$ présentent des pores sphériques qui sont issus des mécanismes d'hydratation du ciment et de l'évaporation de l'eau. Les formulations avec $M=50\%$ présentent des pores sphériques de plus grande taille qui semblent être isolés avec peu de connections. La répartition des pores est aléatoire et homogène dans tout le matériau. Les granulats de sable sont répartis également de façon homogène dans le matériau. Pour quantifier l'effet de la mousse sur la porosité le volume des vides cumulé normalisé par rapport au volume total est représenté sur la figure 2c en fonction du rayon des pores. On observe une décroissance importante du volume en fonction de l'augmentation du rayon. Cette décroissance est plus marquée pour la formulation avec les quantités de ciment et de mousse les plus élevées.

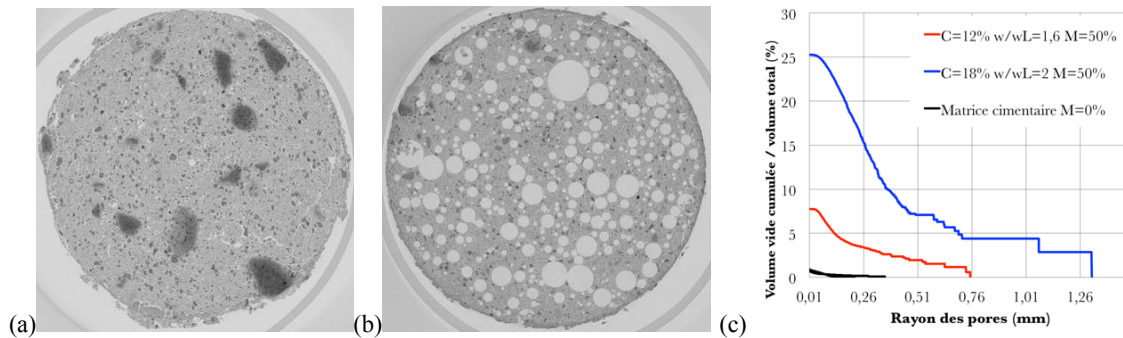


FIGURE 2. Résultat des mesures par tomographie X : image 0% mousse (a), image 50% de mousse (b), volume des vides cumulé en fonction de la taille des pores

III. Conclusions

Cet article a montré la possibilité d'incorporer une mousse ainsi que des sédiments marins pour fabriquer un mélange cimentaire allégé avec de bonnes propriétés lui permettant d'être utilisé dans des applications diverses comme des remblais, remplissage entre palplanche, etc. Les mesures non destructives ont permis de montrer que la vitesse des ultrasons peut être corrélée avec la résistance par une relation bi-variée dépendante de la quantité de ciment. Les rayons X ont montré clairement la présence de bulles d'air qui ont été quantifiées dans les mélanges étudiés.

REFERENCES

Gregor T., F. K. (2008)., « Predictions of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks », *Ultrasonics*, 8.

Horpibulsuk S., Wijitchot A., Nerilitknorburee S., « Factors influencing unit weight and strength of lightweight cemented clay », *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol.47, 2014, p101-109.

Thiery. (2013). *Tomographie à rayon X*. Techniques de l'ingénieur.