
Evaluation par la méthode d'impact-écho de l'endommagement du béton exposé à haute température

Mahmoud Koabaz^{1,*}, Norbert Renault¹, Prosper Pliya¹, Jean-Louis Gallias

¹Université de Cergy-Pontoise – L2MGC
5 mail Gay-Lussac Neuville sur Oise
95031 Cergy-Pontoise Cedex
*mahmoud.koabaz@u-cergy.fr

RÉSUMÉ. Le béton exposé à haute température subit des fortes altérations compromettant ses performances mécaniques. L'évaluation de l'étendue des dégradations du béton et des besoins en réparation et renforcement de la structure après l'incendie est indispensable. Notre objectif a été d'utiliser la méthode d'impact-écho afin d'évaluer l'endommagement du béton. Les résultats présentés concernent des essais sur éprouvettes cylindriques ($\varnothing 16$ cm \times 32 cm) de plusieurs formulations de béton ayant subi des traitements thermiques à 300°C, 450°C et 600°C. Ils montrent une excellente corrélation entre le module d'élasticité dynamique déterminé par cette méthode et le module d'élasticité statique déterminé par des essais mécaniques indépendamment de la formulation du béton et du traitement thermique subi. En revanche, cette méthode est beaucoup moins bien adaptée pour évaluer la résistance en compression du béton.

ABSTRACT. The concrete exposed to high temperatures suffered heavy damage compromising its mechanical performances. The assessing after a fire of the concrete damage extent and of the repair and reinforcement needs of the structure is indispensable. Several nondestructive methods can be used for this purpose. Our goal was to use the impact-echo method to evaluate the damage of concrete. The results presented concern tests on cylindrical specimens ($\varnothing 16$ cm \times 32 cm) of different concrete formulations treated at 300° C, 450° C and 600° C. They show an excellent correlation between the dynamic modulus of elasticity determined by Impact-Echo and static modulus of elasticity determined by mechanical tests independently of concrete formulation and heat treatment. In return, this method is much lesser adapted to assess compressive strength of concrete.

MOTS-CLÉS: béton, température, Impact-Écho, module d'élasticité, résistance en compression.
KEYWORDS: concrete, temperature, Impact-Echo, modulus of elasticity, compressive strength.

1. Introduction

Le béton exposé à haute température subit des fortes altérations compromettant ses performances mécaniques. La stabilité des ouvrages ayant subi un incendie est souvent mis en cause pour cette raison. L'évaluation des caractéristiques mécaniques du béton après incendie constitue un préalable indispensable à toute ébauche de projet de réparation. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées dans ce but et plus particulièrement les méthodes de contrôle non destructif. Nous nous sommes intéressés à la méthode d'impact-écho. Cette méthode de contrôle non destructif des matériaux solides a été proposée par Sansalone et Carino en 1986 (Sansalone *et al.*, 1986). Elle consiste en analyser les vibrations du corps testé (qui peut être un élément de structure ou une éprouvette) suite à un impact. Elle a été largement appliquée à la mesure de l'épaisseur des dalles et des cylindres, à la localisation des vides, des défauts et des fissures, etc (Sansalone *et al.*, 1997), (Liang *et al.*, 2001). Dans ce travail, le module d'élasticité dynamique et la vitesse de propagation des ondes de compression ont été mesurés sur des éprouvettes cylindriques de différentes formulations de béton avant et après traitement à différentes températures jusqu'à 600°C. Les mesures ont été comparées avec celles du module d'élasticité statique et de la résistance de compression obtenue par des essais mécaniques classiques. L'endommagement du béton exposé à haute température a pu ainsi être déterminé.

2. Matériaux et méthodes

Plusieurs formulations de béton avec et sans fibres polypropylène ou fibres métalliques ont été confectionnées pour les essais. Nous les distinguons en trois familles :

- Les formulations de béton sans fibres, désignées C.
- Les formulations de béton avec des fibres polypropylène, désignées CP.
- Les formulations de béton avec des fibres métalliques, désignées CS.

La famille des formulations sans fibres (C) inclut une formulation courante de béton de structures dont la résistance en compression à 28 jours est de 46,0 MPa, désignée C2 et une formulation de béton à hautes performances dont la résistance en compression à 28 jours est de 70,2 MPa, désignée C3.

Les formulations des bétons avec fibres (CP et CS) sont obtenues à partir des formulations précédentes en incorporant soit 1, 1,5 ou 2 kg/m³ de fibres polypropylène, soit 20, 30 ou 40 kg/m³ de fibres métalliques. Ainsi la formulation CP3-1.5 désigne une formulation de béton à hautes performances avec 1,5 kg/m³ de fibres polypropylène et la formulation CS2-40 désigne formulation de béton intermédiaire avec 40 kg/m³ de fibres métalliques. Les caractéristiques mécaniques des formulations avec fibres sont relativement proches de celles des formulations sans fibres.

Des éprouvettes cylindriques Ø16x32 cm ont été fabriquées et conservées dans l'eau jusqu'à 28 jours après démoulage. Ensuite, trois cycles de chauffage - refroidissement à partir de la température ambiante (20°C) et jusqu'à différentes températures de palier : 300°C, 450°C et 600°C ont été appliqués sur les éprouvettes au moyen d'un four électrique de grande capacité (Pliya, 2010). Chaque cycle est composé de trois phases (Figure 1). La première constitue une rampe de montée en température à une vitesse de 1°C/min. La seconde est un palier de température constante dans le four pendant une heure afin d'homogénéiser la température au sein des éprouvettes. La dernière phase est un refroidissement partiellement contrôlé jusqu'à la température ambiante à la vitesse moyenne de 1°C/min. Les caractéristiques mécaniques des éprouvettes ont été déterminées avant et après le traitement thermique par des essais classiques suivant la norme NF EN 12390-3 pour la résistance en compression R_c (Afnor, 2003), et le mode opératoire LCPC pour le module d'élasticité statique E_s (Torrenti *et al.*, 1999).

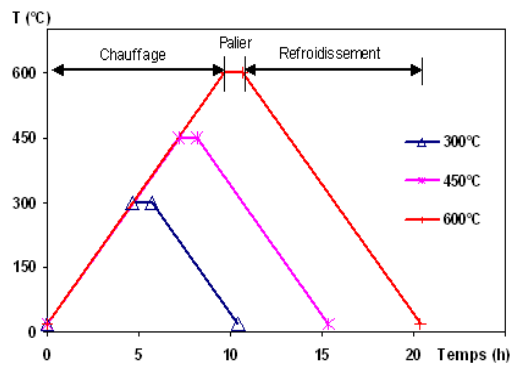


Figure 1. Cycles de chauffage-refroidissement appliqués aux éprouvettes.

3. Caractérisation non destructive des éprouvettes

Un dispositif d'impact-écho a été utilisé pour la détermination du module d'élasticité dynamique E_s et de la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans le béton V . Le principe de la méthode d'impact-écho repose sur les propriétés de propagation des ondes sonores dans le béton. L'impact est provoqué par une bille en acier tombant sur la surface en béton avec une énergie contrôlée. Les ondes sonores générées sont réfléchies d'une part par les surfaces libres de l'élément impacté (en occurrence les éprouvettes de béton) et d'autre part par les éventuelles discontinuités dans la masse du béton, si bien qu'une réflexion multiple s'opère et génère une mise en résonance de l'élément testé dont la fréquence permet de déterminer l'épaisseur ou éventuellement la profondeur d'une zone discontinue sous la surface impactée. Un récepteur enregistre les signaux réfléchis qui sont transmis à une cellule de

traitement afin d'accéder à cette fréquence. La méthode d'impact-écho est schématisée sur la figure 2.

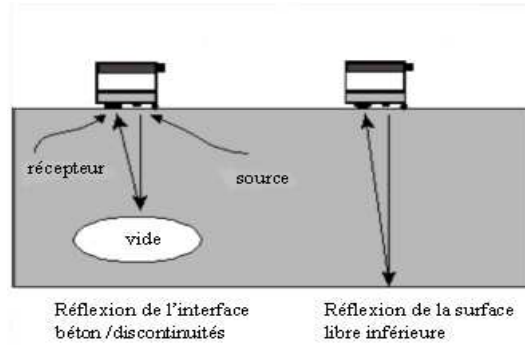


Figure 2. Principe de la méthode d'impact-écho

Pour notre étude, nous avons utilisé la fréquence de résonance f des éprouvettes déterminée par le dispositif d'impact-écho pour déduire le module d'élasticité dynamique E_d du béton en tenant compte des dimensions des éprouvettes suivant la relation :

$$E_d = 4 \rho f^2 L^2 / \beta \quad [1]$$

où ρ est le poids volumique du béton, L la hauteur des éprouvettes (≈ 32 cm) et β est un facteur de forme égal à 0,8 pour les éprouvettes $\text{Ø}16 \text{ cm} \times 32 \text{ cm}$ (Sansalone *et al.*, 1997).

Par ailleurs, nous avons déterminé la vitesse de propagation des ondes de compression V dans le béton par la relation :

$$V = 2 L f / \beta \quad [2]$$

La méthode d'impact-écho a déjà été employée pour évaluer l'endommagement du béton au laboratoire ou sur les ouvrages in situ (Hassani *et al.*, 1997), (Gucunski *et al.*, 2009), (Hsiao *et al.*, 2008), (Schubert *et al.*, 2004), (Aggelis *et al.*, 2008). Mais elle n'a pas été utilisée jusqu'à présent pour évaluer les caractéristiques du béton endommagé par le feu.

4. Résultats et discussion

Les figures 3 et 4 montrent la variation du module élastique statique (E_s) et de la résistance en compression (R_c) des différentes formulations de béton en fonction de la température du traitement thermique appliqué. Nous constatons que ces deux caractéristiques mécaniques du béton n'évoluent pas de la même façon.

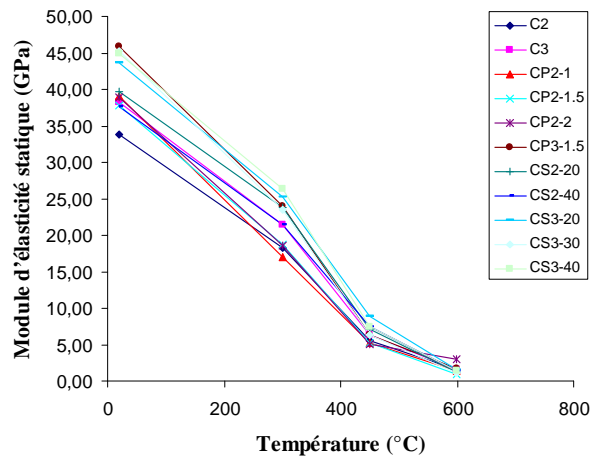


Figure 3. Evolution du module d'élasticité statique du béton en fonction de la température du traitement thermique.

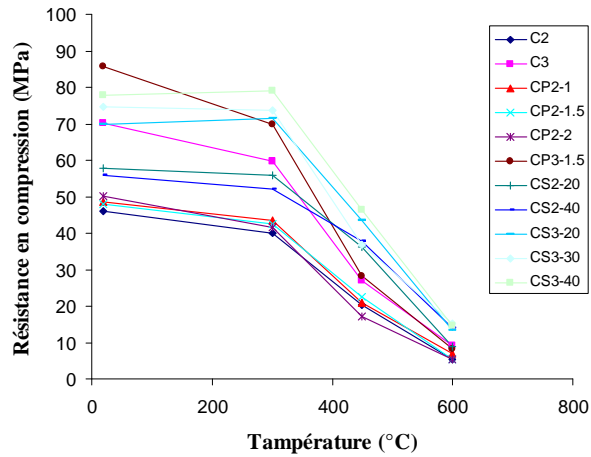


Figure 4. Evolution de la résistance en compression du béton en fonction de la température du traitement thermique.

Pour toutes les formulations testées, le module d'élasticité statique présente une diminution très importante avec l'élévation de la température. A 300°C la diminution du module peut atteindre facilement 50% par rapport à la température ambiante et dépasser 85% à 450°C.

En revanche, la résistance en compression diminue très peu jusqu'à 300°C. Plusieurs formulations maintiennent même leur résistance initiale à cette température. C'est au-delà de cette température que la résistance en compression chute très fortement. Dias (Dias, 1990) explique cette évolution singulière de la résistance en compression par une restructuration des hydrates sous l'effet combiné de la température et de la pression des vapeurs d'eau au cœur des éprouvettes permettant de maintenir une forte cohésion dans la matrice cimentaire malgré l'augmentation de la microfissuration et de la porosité à cette température.

Il faut souligner ici que l'endommagement du béton à 300°C n'est pas facilement visible sur la surface des éprouvettes, alors qu'à 450°C les éprouvettes sont sévèrement endommagées et un réseau des fissures aléatoires apparaît sur la surface même dans le cas des bétons renforcés de fibres. A 600°C la fissuration est généralisée et profonde, des petits éclats peuvent aussi être observés parfois en surface et certaines éprouvettes maintiennent à peine leur intégrité.

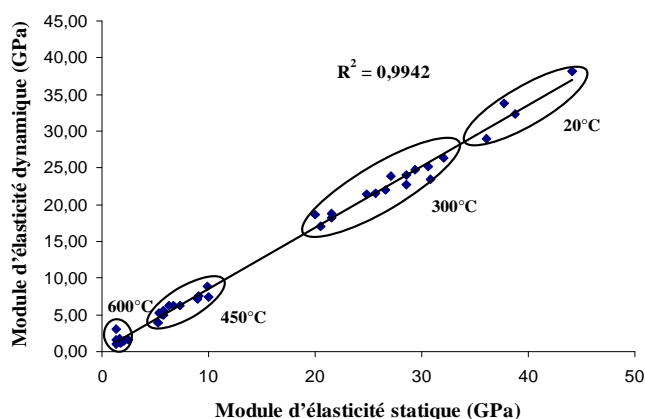


Figure 5. Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique des bétons testés.

Essayons maintenant de comparer les caractéristiques mécaniques précédentes avec celles obtenues par les mesures d'impact-écho et en premier lieu regardons la relation entre le module d'élasticité statique E_s et celui dynamique E_d (Figure 5). Nous pouvons constater que cette corrélation est excellente ($R^2 > 99\%$) pour l'ensemble des formulations de béton et quel que soit le traitement thermique appliqué. Cette excellente corrélation montre que la méthode d'impact-écho est

parfaitement bien adaptée pour caractériser le module d'élasticité du béton quel que soit son degré de dégradation par l'élévation de la température. Elle peut plus particulièrement quantifier la diminution du module d'élasticité du béton dans des endroits où la température n'a pas dépassé 300 à 350°C et dont la dégradation n'est pas visible et la résistance en compression est globalement maintenue. Elle peut donc être employée avec succès pour évaluer l'état du béton dans un ouvrage après un incendie et identifier et quantifier rapidement l'étendue de la dégradation. Il faut noter que plusieurs travaux avaient montré que cette corrélation existait aussi dans le cas des bétons de performances différentes ou des bétons plus ou moins endommagés mécaniquement (Yildirim *et al.*, 2011), (Li *et al.*, 1999), (Sideris *et al.*, 2004). Nos résultats étendent cette corrélation dans le cas des bétons endommagés par les hautes températures.

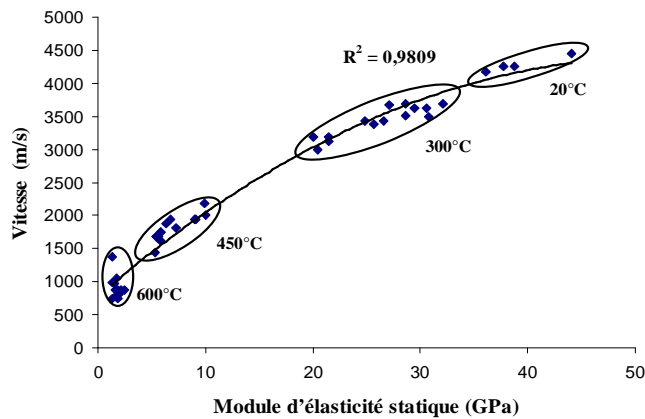


Figure 6. Relation entre la vitesse de propagation des ondes et le module d'élasticité statique des bétons testés.

Une confirmation de l'existence de l'excellente corrélation précédente entre modules statique et dynamique peut être obtenue aussi en étudiant la relation entre la vitesse de propagation des ondes de compression dans le béton (V) et le module d'élasticité statique (E_s) déterminé par des essais mécaniques (Figure 6). Nous constatons en effet que ces deux grandeurs sont reliées par une relation parabolique en accord avec la théorie de Newton concernant la propagation des ondes mécaniques dans un matériau solide élastique qui stipule que :

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad [3]$$

où E est le module d'élasticité, ν le coefficient de Poisson et ρ la masse volumique du matériau.

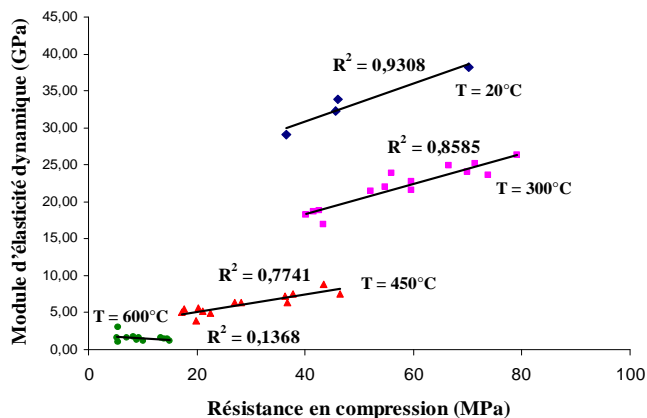


Figure 7. Relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance de compression des bétons testés.

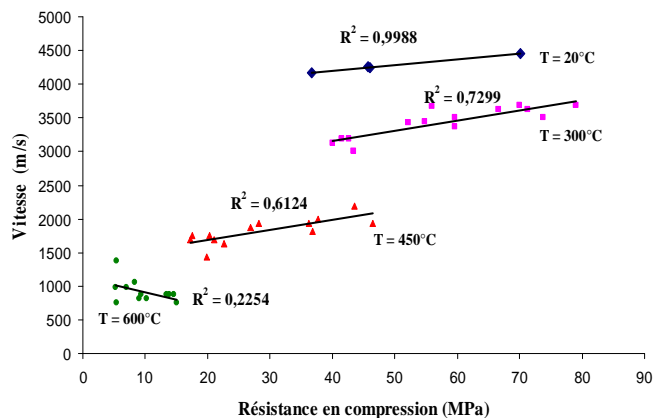


Figure 8. Relation entre la vitesse de propagation des ondes et la résistance de compression des bétons testés.

Toutefois, le caractère parabolique de cette corrélation conduit à des faibles variations de vitesses de propagation des ondes de compression pour des endommagements engendrés par le traitement thermique à 300°C. Ainsi, la mesure de la vitesse de propagation des ondes de compression dans le béton est moins efficace que celle du module d'élasticité dynamique pour caractériser la dégradation

du béton à cette température. De plus, la corrélation entre V et E_s est plus faible ($R^2 = 0,981$) que celle entre E_d et E_s ($R^2 = 0,994$) car suivant l'équation [3] le coefficient de Poisson intervient dans la relation et celui-ci varie en fonction du degré d'endommagement du béton.

En revanche, il n'y a pas de corrélation générale forte entre le module d'élasticité dynamique E_d et la résistance de compression R_c des éprouvettes (Figure 7). Nous remarquons que les valeurs sont plutôt regroupées en fonction du traitement thermique appliqué et que chaque groupe de valeurs (ou chaque température de traitement) présente sa propre corrélation. Toutefois, ces corrélations partielles se dégradent fortement avec l'élévation de la température. De plus, leur pente demeure plutôt faible donnant des faibles variations du module d'élasticité dynamique pour une large gamme de résistance en compression. Un constat identique peut être fait en ce qui concerne la corrélation entre la vitesse de propagation des ondes de compression dans le béton et la résistance en compression, comme nous le montre la Figure 8. Il en résulte donc que la méthode d'impact-écho n'est pas bien adaptée pour évaluer la résistance en compression du béton exposé à haute température.

5. Conclusion

Les résultats sur éprouvettes montrent que la méthode d'impact-écho est une méthode de contrôle non destructif parfaitement bien adaptée pour évaluer la dégradation du béton exposé à haute température quel que soit le degré de cette dégradation. Une très forte corrélation linéaire ($R^2 > 99\%$) a été obtenue entre le module d'élasticité dynamique (déterminé par l'impact-écho) et le module d'élasticité statique (déterminé par des essais mécaniques) sur 8 formulations de béton avec et sans fibres polypropylène ou métalliques traitées ou non thermiquement jusqu'à 600°C. En revanche, la corrélation entre la résistance en compression du béton et le module d'élasticité dynamique ou la vitesse de propagation des ondes de compression est beaucoup plus faible et ne permet pas une évaluation de cette caractéristique par la méthode d'impact-écho.

En considérant que la réduction du module élastique du béton désigne l'endommagement induit par la haute température la méthode d'impact écho permet donc de discriminer très facilement les zones endommagées d'un élément d'épaisseur connue avec beaucoup de précision. La perspective envisagée pour ce travail est l'application de la méthode impact-écho in situ pour évaluer l'étendue des zones endommagées par le feu dans des ouvrages en béton.

6. Bibliographie

AFNOR, NF EN 12390-3, Essai pour béton durci – Partie 3: Résistance en compression des éprouvettes, Indice de classement: p. 18-455, Février 2003.

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 mai 2011.

- AGGELIS D.G., SHIOTANI T., KASAI K., Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 23, 2008, p. 629-637.
- DIAS W.P.S., KHOURY G.A., SULLIVAN P.J.E., mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C, *ACI Materials Journal*, vol. 87-M18, 1990.
- GUCUNSKI N., WANG A., FANG T., MAHER A., Rapid Bridge Deck Condition Assessment Using Three Dimensional Visualization of Impact Echo Data, *Actes NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Nantes, June 30th – July 3rd 2009, LCPC, p. 881-886.
- HASSANI F.P., GUEVREMONT P., MOMAYEZ M., SADRI A., SALEH K., Application of nondestructive evaluation techniques on concrete dams, *Int. J. Rock Mech & Min. Sci.*, vol. 34, n°3-4, 1997, Paper No. 125.
- HSIAO C., CHENG C.C., LIOU T., JUANG Y., Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method, *NDT & E International*, vol. 41, 2008, p. 98-107.
- LIANG M-T., SO P-J., Detection of the corrosion damage of rebar in concrete using impact-echo method, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001, p. 1427-1436.
- LI G., ZHAO Y., PANG S-S., LI Y., Effective Young's modulus estimation of concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 29, 1999, p. 1455-1462.
- PLIYA P., Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2010
- SANSALONE M.J., STREETH W.B., Impact echo non-destructive evaluation of concrete and masonry, *Bullbrier Press*, 1997.
- SANSALONE M.J., CARINO N.J., Impact echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves, Rep. No. NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, Gaithersburg, Md, 1986.
- SCHUBERT F., WIGGENHAUSSER H., LAUSCH R., On the accuracy of thickness measurements in impact-echo testing of finite concrete specimens—numerical and experimental results, *Ultrasonics*, vol. 42, 2004, p. 897-901.
- SIDERIS K.K., MANITA P., SIDERIS K., Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete, *Cement & Concrete Composites*, vol. 26, 2004, p. 623-631.
- YILDIRIM H., SENGUL O., Modulus of elasticity of substandard and normal concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 25, 2011, p. 1645-1652.
- TORRENTI J.M., DANTEC P., BOULAY C., SEMBLAT J.F., Projet de processus s'essai pour la détermination du module de déformation longitudinale du béton, notes techniques, Bulletin des Laboratoires Des Ponts et Chaussées, 220 NT 4263, 1999, p. 79-81.