

Caractérisation des gradients de bétons endommagés thermiquement en utilisant des ondes de surface ultrasonores

Massina Fengal¹, Pierric Mora¹, Eric Genesseeux² et Odile Abraham¹

¹ Univ Gustave Eiffel, GERS-GeoEND, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais, France

² Univ Gustave Eiffel, MAST/MIT, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais, France

RESUME Dans cette étude, des mesures d'ondes longitudinales réfractées et ondes de Rayleigh sont réalisées sur des dalles de béton et mortier endommagées thermiquement. Les dalles ont subi deux expositions différentes, choisies pour produire deux gradients différents sur les premiers centimètres sous la surface. La première exposition est un feu de type « ISO » et le deuxième endommagement, plus profond, a été obtenu avec des panneaux radiants. L'objectif est de caractériser le gradient de propriétés mécaniques causé par chacun des deux endommagements. Ce travail servira d'étape préliminaire au développement d'une nouvelle méthode de mesure de gradients par ondes de surface non-linéaires.

Mots-clefs Ondes de surface ultrasonores, ondes réfractées, évaluation non destructive, gradient de propriétés mécaniques, endommagement thermique, béton, mortier.

I. INTRODUCTION

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les constructions du génie civil, pour des applications allant des bâtiments aux barrages, en passant par les ponts, les digues et les enceintes de confinement des centrales nucléaires. Selon [European Cement Association., 2022], La production mondiale de béton a atteint 4,1 milliards de tonnes en 2022.

Ces ouvrages, exposés à un environnement extérieur, sont confrontés à des agressions environnementales telles que la carbonatation du béton et la réaction alcali-granulats. Par ailleurs, les structures en béton peuvent subir des agressions dans le cadre de leurs usages industriels, tels que les enceintes de confinement des centrales nucléaires [Payan et al., 2014] ou accidentelles telles que les incendies [Abraham et al., 2003], durant lesquels elles sont exposées à des températures très élevées. Ces agressions peuvent causer une perte de résistance et de durabilité, et nécessitent des mesures de prévention et de protection pour éviter ou limiter leur impact sur les performances des ouvrages.

L'étude suivante consiste à effectuer des mesures linéaires des ondes de compression réfractées et des ondes de Rayleigh sur des dalles de béton et mortier qui ont subi deux endommagements thermiques différents.

II. Échantillons et endommagements

L'étude comprend 3 dalles de béton et 3 dalles de mortier, chacune ayant des dimensions de (12 x 25 x 50 cm³). Des thermocouples ont été placés à différentes profondeurs de la surface qui sera exposée à l'endommagement thermique (face A), à savoir à 0, 2, 3, 4 et 5 cm de profondeur. Les dalles ont été soumises à deux types d'expositions distincts, soigneusement choisis pour créer deux gradients de température différents dans les premiers centimètres sous la surface.

La première exposition consistait en un feu de type « ISO ». Les 2 dalles de béton ont été exposées pendant 20 minutes aux flammes d'un four à gaz, provoquant un gradient jusqu'à une température de 370 °C mesurée sur la surface exposée (face A), Fig.1.a. Un deuxième niveau d'endommagement, plus profond, a été obtenu à l'aide de panneaux radiants appliqué sur les deux dalles de mortier,

avec une durée d'exposition d'une heure et une température de 230°C, Fig.1.b. Ce qui fait au total: 4 faces endommagées et 8 saines.

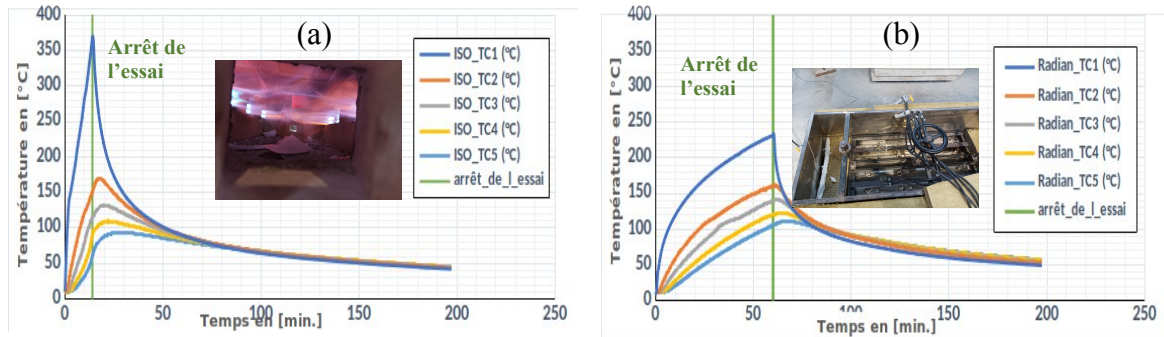


Figure 1: Enregistrements de températures pris sur les 5 thermocouples pour un endommagement de type "feu ISO" Fig.1.a. et "Panneaux radiants" Fig.1.b. TC1 désignant le thermocouple 1 situé en surface (0 cm) et TC5 désignant le thermocouple 5 positionné à une profondeur de (5 cm) depuis la surface exposée à la chaleur. Essai effectué au CSTB de Marne la Vallée.

III. Mesures et résultats

III-1 Dispositif expérimental et signal source

Un transducteur piézoélectrique ponctuel (S1003-Longitudinal wave DPC transducer 100kHz) a été utilisé comme source, le signal est réceptionné par un vibromètre laser (OFV-525/-5000-S) monté sur un axe de déplacement horizontal. La principale difficulté de ces mesures réside dans la faible amplitude des signaux. En effet, l'émetteur est quasi ponctuel et est très peu énergétique. De plus, une des ondes étudiées est l'onde de compression (P) directe, qui est bien moins énergétique que l'onde de surface. Enfin, le dispositif de mesure est sensible à la composante normale alors que l'onde P rasante est principalement polarisée dans le plan. Pour ces raisons, il est nécessaire de moyenniser les résultats un grand nombre de fois : 10000 moyennes ont été choisies par pas de mesure (2,5mm). Moyenner sur une impulsion brève (type Ricker) n'est cependant pas suffisant : il est nécessaire de générer des signaux très longs (type Chirp d'une durée de 4 ms), puis de re-synthétiser un signal source Ricker virtuel par compression d'impulsion.

III-2 Ondes longitudinales réfractées

Les données sont recueillies sous forme de BSCAN, dans lequel le temps d'arrivée est enregistré en fonction de la distance. Ensuite, une procédure de repérage des premières arrivées des ondes P est effectuée, comme illustré à la Fig.3.a. Une hypothèse relative à un bicouche est considérée pour détecter l'impact de ses deux types d'endommagements.

Dans le cas du bicouche, nous examinons une structure composée d'une première couche d'épaisseur finie "e" avec une vitesse de propagation des ondes P de V_1 , reposant sur une couche d'épaisseur infinie avec une vitesse V_2 telle que $V_2 > V_1$ [Magnin et al., 2005], comme illustré à la Fig.2.a.

L'équation qui exprime le temps d'arrivée de l'onde réfractée en fonction de la distance x entre le point d'émission 'E' et le récepteur 'R' est la suivante :

$$T = \frac{x}{V_2} + \frac{2e}{V_2} \cos \lambda \quad (1)$$

avec $x = L_2 - L_1$ et $\sin \lambda = \frac{V_1}{V_2}$.

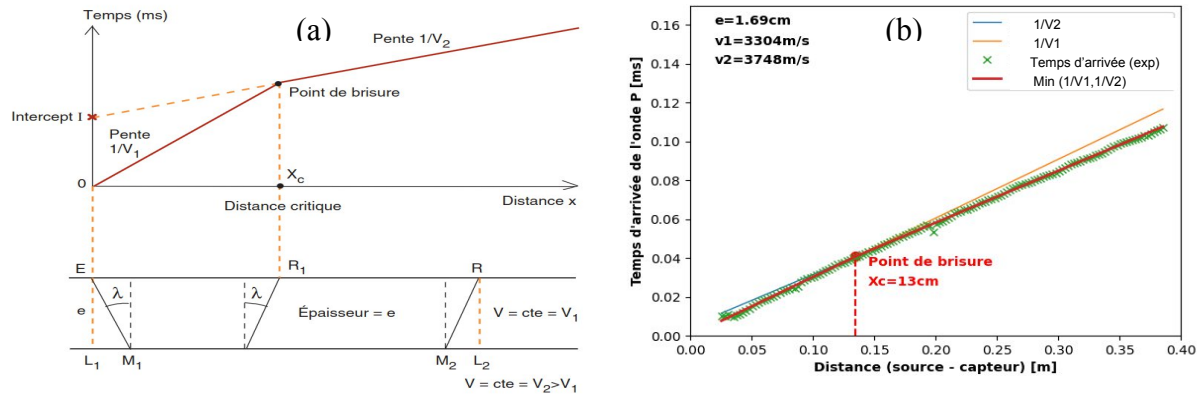


Figure 2 : Modèle bicouche: Théorie et Application. Fig.2.a : Courbe dromochromique et Schéma des Paramètres - « E » Émetteur, « R » Récepteur, [Magnin et al., 2005]. Fig.2.b : Résultats de l'ajustement aux moindres carrés du modèle bicouche aux premières arrivées sur une face endommagée avec un feu ISO d'une dalle de béton. Les paramètres d'ajustement sont : « e » épaisseur de la couche endommagée, « V1 » vitesse de l'onde compression longitudinale directe, et « V2 » vitesse de l'onde de compression longitudinale réfractée.

L'ajustement aux moindres carrés avec le modèle bicouche a été réalisé sur les 4 jeux de données pointées recueillis. Cela comprend 2 faces de dalles en béton exposées à un feu ISO et 2 faces de dalles en mortier exposées à des panneaux radiants, Fig.3.

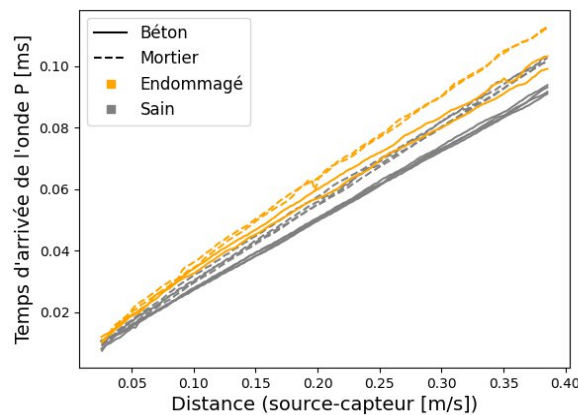


Figure 3 : Résultats des pointés des premières arrivées (onde P) pour les dalles de béton (lignes continues) et mortier (lignes discontinues) saines (couleur grise) et endommagées (couleur orange) thermiquement (béton en feu ISO et mortier en panneaux radiants).

Nous observons clairement dans la Fig.3 la séparation des courbes de pointés des faces saines et exposées de béton et de mortier. En ce qui concerne le béton, les résultats de l'ajustement aux moindres carrés par le modèle bicouche indiquent que la couche endommagée présente une vitesse d'onde P d'environ 21% plus faible que celle de la couche non endommagée. Pour le mortier, la couche endommagée montre une vitesse d'onde P d'environ 13% plus faible que celle de la couche non endommagée. Cette diminution de vitesse est probablement due au changement de densité et de rigidité dans les parties endommagées du matériau causés par les microfissures provoqué par l'endommagement thermique. Dans les deux cas, l'épaisseur de la couche endommagée est d'environ 2cm — le modèle bicouche gagnerait certainement à être remplacé par un modèle multi-couches pour mieux résoudre les différences d'échelle spatiale. Ces mesures seront bientôt confrontées à des méthodes de mesure telles que NRUS (les mesures sont déjà réalisées), résistivité électriques et radar.

III-3 Vitesses de Phase et atténuation des ondes de Rayleigh

L'atténuation des ondes de Rayleigh peut fournir des informations sur la présence de grosses hétérogénéités (granulats), les propriétés microstructurelles du béton, ainsi que sur les propriétés viscoélastiques du matériau qui sont impactées par l'endommagement thermique.

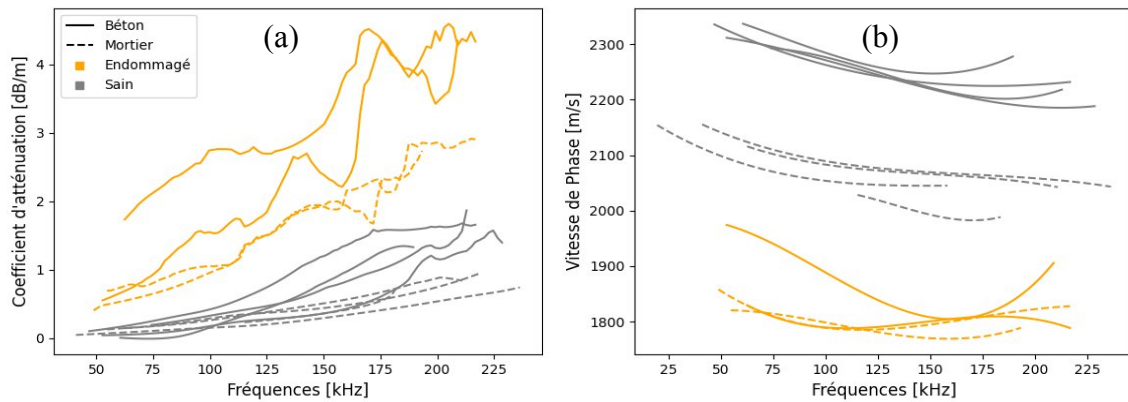


Figure 4: Résultats de mesure de l'atténuation des ondes de Rayleigh [dB/m] Fig.1.a. et l'évolution des vitesses de phase [m/s] en fonction des fréquences [kHz] dans les dalles de béton et mortier saines et endommagées Fig.1.b.

En examinant la Fig.4.a et en comparant les courbes des mortiers et des bétons non endommagés, nous pouvons observer qu'en présence de granulats, la valeur du coefficient d'atténuation diffère d'environ 1 dB/m à 200 kHz. Cet effet commence à être visible à partir de 100 kHz ce qui correspond à une longueur d'onde de 2.5 cm soit environ 2 fois la taille du plus gros granulats (la taille des grains de sable du mortier varient de 0 à 4 mm et celle des granulats du béton de 4 à 12 mm). En ce qui concerne les dommages causés par le feu de type ISO sur les dalles de béton, une augmentation d'environ 3,5 dB/m à 200kHz est observée, tandis que la différence entre les résultats des faces de mortier saines et exposées aux panneaux radiants est d'environ 2 dB/m à 200 kHz. Cette différence entre les résultats du béton et du mortier s'explique par le fait qu'il s'agit de deux types d'endommagement distincts, et également par le fait que l'interface entre le ciment et les granulats est la zone la plus sensible à l'exposition thermique, ce qui rend l'endommagement plus impactant dans le béton.

IV. Conclusion

Cette étude met en évidence l'efficacité des méthodes de réfraction et ondes de Rayleigh pour la détection des endommagements thermiques. Elle montre également une bonne répétabilité pour les échantillons sains mais une plus grande variabilité est observée pour le béton endommagé par le feu ISO. Il est possible de noter la présence de gradients avec la méthode de réfraction, cependant, cela reste limité par le modèle bicouche considéré. Il est plus difficile d'observer des gradients avec les ondes de surface; ceux-ci s'observeraient probablement mieux en utilisant des fréquences plus basses.

Les perspectives futures pour cette étude comprennent plusieurs aspects d'amélioration. Tout d'abord, il y a la possibilité d'améliorer le rapport signal sur bruit du champ cohérent en effectuant des moyennes spatiales. Ensuite, il y a la dimension de continuité, qui implique l'inversion des vitesses de phase des ondes de Rayleigh, ainsi que la confrontation avec d'autres méthodes de référence telles que les mesures NRUS, la méthode de résistivité électrique et la méthode radar. Enfin, à plus long terme, ces avancées contribueront au développement d'une nouvelle méthode de mesure de gradients à l'aide d'ondes ultrasonores non linéaires.

REFERENCES

European Cement Association report. (2022). Cembureau key facts & figures. <https://cembureau.eu/media/lfqjyve5/key-facts-figures-2021.pdf>

Payan, C., Ulrich, T. J., Le Bas, P. Y., Saleh, T., & Guimaraes, M. (2014). Quantitative linear and nonlinear resonance inspection techniques and analysis for material characterization: Application to concrete thermal damage. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(2), 537-546. <https://doi.org/10.1121/1.4887451>

Abraham, O., & Dérobert, X. (2003). Non-destructive testing of fired tunnel walls: the Mont-Blanc Tunnel case study. *NDT & E International*, 36(6), 411-418. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00034-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00034-3)

Magnin, O., & Bertrand, Y. (2005). Guide sismique réfraction. *Laboratoire Centrale des ponts et chaussées*. http://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/GuideTechnique/GuideTechnique-LCPC-AGAP2.pdf