

# Application d'une méthode de contrôle non destructif par interaction d'onde pompe-sonde basée sur l'acoustique non linéaire pour l'identification des zones endommagées dans les blocs de béton : une approche colinéaire

Klayne Silva 1, 2, \*, @ , Vincent Garnier 2, @ , Cédric Payan 2, @ , Benoit Durville 1, @ , Laurent Cantrel 1, @ , Sandrine Morin 1, @ , David Marlot 3, @

1 : *Laboratoire d'Expérimentation Environnement et Chimie (IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC) Service d'Etude et de Recherche Expérimentale F-13115, Saint-Paul-Lez-Durance - France*

2 : *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, UMR 7031, LMA/AMU/CNRS/ECM 4 impasse Nikola Tesla, CS 4000613453 Marseille Cedex 13 - France*

3 : *MISTRAS Group Eurosonic, Vitrolles - France*

\* : Auteur correspondant

## RESUME

Le béton est un matériau de construction très important, mais il est sujet à des dégradations. Une fissuration excessive peut être causée par différents facteurs, principalement par des pathologies d'expansion interne. Pour les structures et particulièrement pour les centrales nucléaires, la surveillance des structures en béton est nécessaire pour garantir leur durabilité. Les techniques de contrôle non destructif (CND) basées sur l'acoustique non linéaire sont prometteuses pour la détection des microfissures.

Une méthode basée sur l'acoustique non linéaire est développée en collaboration entre l'IRSN, le LMA/AMU et MISTRAS pour identifier en profondeur, les zones endommagées au sein des structures en béton. Cette méthode utilise des ondes pompes et sondes de différentes fréquences. Cette méthode est testée sur des blocs de taille moyenne présentant des endommagements d'origine thermique, avant d'être appliquée à des blocs plus volumineux. L'objectif est de détecter précocement les défauts internes du béton avant leur apparition à la surface.

**Mots-clefs** Béton, endommagement, diagnostic, acoustique non-linéaire, ultrasons

**Key-words** Concrete, damage, diagnostic, non-linear acoustic, ultrasounds

## I. INTRODUCTION

Le béton est un matériau de construction reconnu pour sa polyvalence et son utilisation répandue à travers le monde. Cependant, en raison de sa nature hétérogène et de l'évolution de ses propriétés physico-mécaniques au fil du temps, des études approfondies sont menées par la communauté scientifique depuis sa conception. [1-2] Le béton est exposé à divers facteurs de dégradation qui peuvent réduire sa durée de vie. Parmi les principales causes de dégradation, les pathologies de gonflement interne RGI jouent un rôle majeur en entraînant une fissuration excessive du matériau [3-4].

Dans le contexte des centrales nucléaires, où le béton est utilisé pour les enceintes de confinement, qui constituent la troisième barrière de protection mécanique contre les agressions extérieures et contre les fuites potentielles, il est impératif de surveiller l'intégrité des structures pour assurer leur durabilité. Étant donné que les méthodes traditionnelles de contrôle destructif par carottage ne sont pas envisageables dans ce contexte, le développement de techniques de contrôle non destructif (CND) est essentiel pour un suivi lors des visites décennales voire en service.

En collaboration avec l'institut de radioprotection et sûreté nucléaire (IRSN), le laboratoire de mécanique et d'acoustique d'Aix-Marseille Université (LMA/AMU) et MISTRAS group, et en s'appuyant sur les travaux précédents réalisés par Ouvrier-Bufferet [5] une méthode innovante basée sur l'acoustique non-linéaire est en cours de développement.

Cette étude réalisée avec des ondes sondes pompes et sondes perpendiculaire [5] est améliorée dans ces travaux avec une méthode d'interaction entre des ondes propagatives de basse fréquence (onde-pompe) et des ondes de plus haute fréquence (onde-sonde), qui sont colinéaires, c'est-à-dire en n'accédant qu'à deux côtés de la structure comme l'impose les mesures sur site. Cette méthode sera d'abord testée sur des blocs de taille moyenne ( $0,4 \times 0,4 \times 0,7 \text{ m}^3$ ) contenant une zone de béton endommagée par exposition thermique. Par la suite, cette méthode sera transposée à l'échelle de la mesure sur site sur un bloc de grande taille ( $2 \times 2 \times 1 \text{ m}^3$ ).

L'objectif final est d'identifier d'une façon précoce, les zones endommagées à l'intérieur des structures en béton avant que les fissures ne soient générées et qu'elles ne se propagent jusqu'en surface.

Les résultats de cette recherche contribueront à améliorer la durabilité et la sécurité des structures en béton dans les centrales nucléaires, en permettant une intervention préventive avant que les conditions de la structure ne soient critiques.

## II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le protocole expérimental repose sur l'utilisation d'un bloc de béton de dimensions  $0,4 \times 0,4 \times 0,7 \text{ m}^3$ , dont la formulation est détaillée dans le tableau 1. Au sein de ce bloc, un insert en béton de dimensions  $0,08 \times 0,15 \times 0,25 \text{ m}^3$ , préalablement endommagé thermiquement à une température de  $400^\circ\text{C}$ , a été incorporé. Les caractéristiques spécifiques du béton d'enrobage et de cet insert endommagé sont décrites dans le tableau 2.

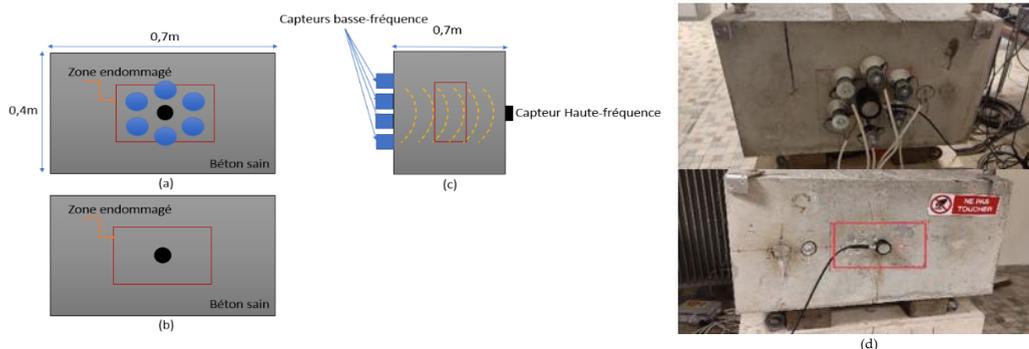
**TABLEAU 1.** Dosage du béton d'enrobage

|                    |                       |
|--------------------|-----------------------|
| CEM I 52,5 N       | 350 kg/m <sup>3</sup> |
| 0/4 Estaque (NR)   | 760 kg/m <sup>3</sup> |
| 6/16 Estaque (NR)  | 295 kg/m <sup>3</sup> |
| 11/22 Estaque (NR) | 755 kg/m <sup>3</sup> |
| Eau                | 195 kg/m <sup>3</sup> |

**TABLEAU 2.** Caractéristiques spécifiques du béton sain et de l'insert endommagé

| Propriétés acoustiques                 | Béton d'enrobage | Insert endommagé |
|--|------------------|------------------|
| Masse volumique (Kg/m <sup>-3</sup> )  | 2400             | 2050             |
| Coefficient de poisson                 | 0,25             | 0,13             |
| Module de Young (GPa)                  | 45,5             | 9                |
| Vitesse des ondes transversales (m/s)  | 2758             | 1400             |
| Vitesse des ondes longitudinales (m/s) | 4762             | 2150             |

Les ondes ultrasonores US usuelles ne sont pas suffisamment sensibles pour détecter une petite zone endommagée au cœur d'un bloc en béton d'une épaisseur importante, c'est donc nécessaire de mettre en œuvre une technique d'acoustique non linéaire qui décuple la sensibilité des ondes US. Le schéma de la méthode d'interaction onde-pompe (basse fréquence 27 kHz) et onde-sonde (haute fréquence 100 kHz) utilisée en configuration colinéaire est présenté dans la figure 1. Les signaux d'émission et de réception (capteurs en noir dans la Figure 1) des ondes sondes longitudinales, proviennent d'un *burst* d'émission à 100 kHz. L'onde pompe, est générée par la grappe de six capteurs (Fig.1(d)) de basse-fréquence (27kHz), activés simultanément à l'onde sonde mais avec une forte amplitude. Leur énergie importante induit un comportement non linéaire du béton qui est traduit par une baisse de la vitesse des ondes dans cette zone de non-linéarité et un décalage temporel de l'arrivée de l'onde sonde. Ce décalage est plus prononcé lors du passage à travers des zones présentant des endommagements dont le comportement est très non linéaire. Les ondes propagatives mettent ainsi en évidence la présence de microfissures localisées générées par des endommagements thermiques ou provenant d'une RGI.



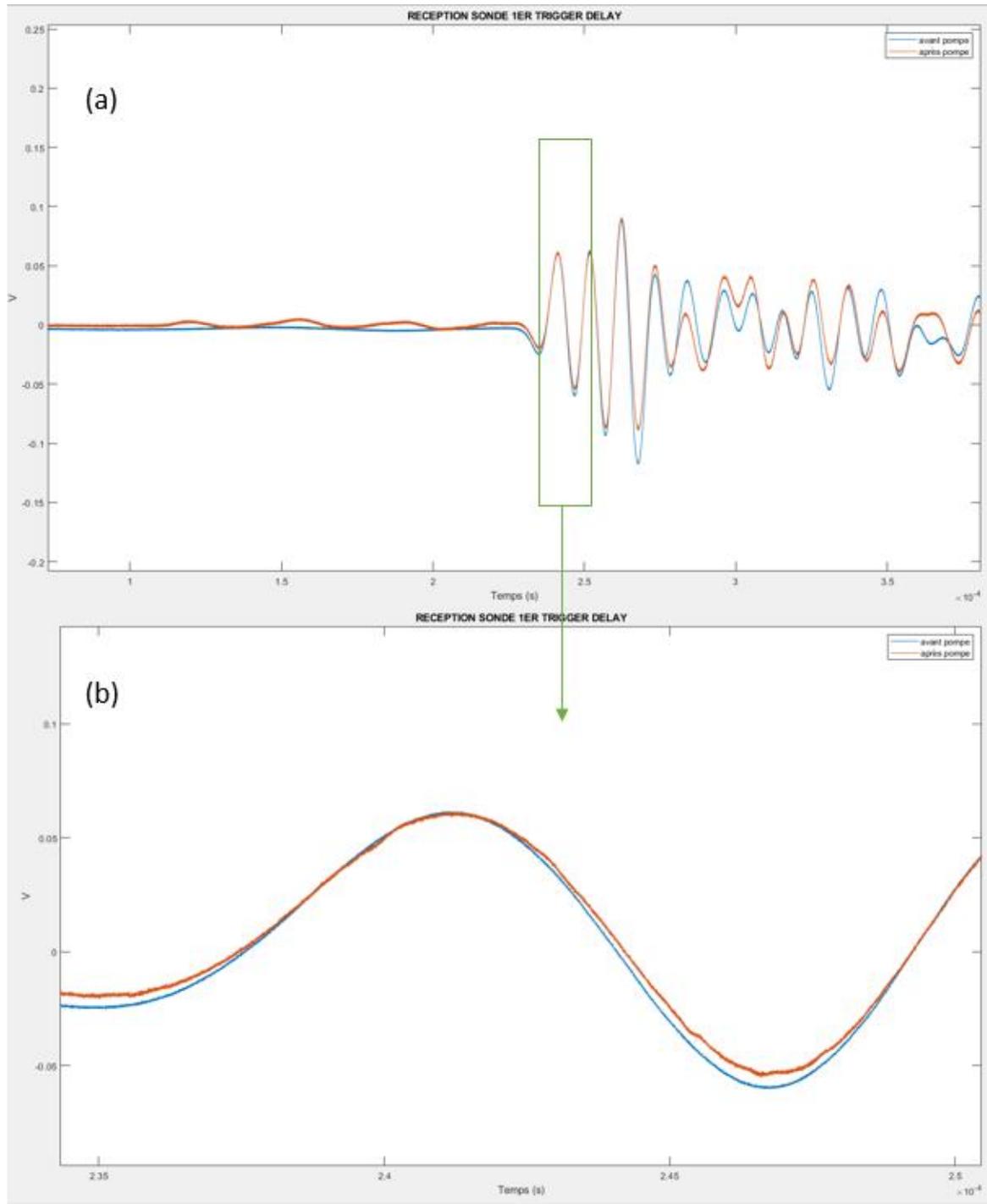
**FIGURE 1.** Configuration de l'essai : (a) Face du bloc dédiée à l'émission ; (b) Face du bloc dédiée à la réception du signal ; (c) Vue latérale du bloc : en bleu les transducteurs de basse-fréquence (onde-pompe) En noir les traducteurs haute-fréquence (onde-sonde); (d) Bloc d'essai réel.

### III. RESULTATS PRELIMINAIRES

Après l'acquisition des données, un processus de post-traitement est réalisé pour calculer la différence de temps de vol ( $\Delta TOF$ ) de l'onde sonde lorsque l'onde pompe est inactive puis active pour générer la non-linéarité de la zone endommagée. Ensuite la variation relative du temps de vol ( $\Delta TOF/TOF_0$ ) est calculée, où  $TOF_0$  représente le temps de vol de l'onde sonde avant perturbation induite par l'onde pompe. Cette relation permet d'évaluer les variations temporelles de l'onde ultrasonore lorsque des dommages ou des modifications des propriétés du matériau se produisent. L'obtention précise et fiable de  $\Delta TOF/TOF_0$  est essentielle pour une interprétation correcte des résultats obtenus à partir des techniques d'acoustique non linéaire appliquées au matériau en question.

La Figure 2 présente l'un des résultats obtenus lors des essais préliminaires, mettant en évidence le décalage temporel entre la réception de l'onde sonde avant (bleu) et après (rouge) l'activation de l'onde pompe dans la zone contenant l'échantillon endommagé. Lorsque l'onde pompe est activée, nous observons un retard dans l'arrivée de l'onde de sonde par rapport à sa réception lorsque l'onde de pompe est inactive. Ce phénomène de retard est associé à la perturbation causée par l'onde de propagation dans la zone contenant l'échantillon endommagé qui présente une forte linéarité à la base

Les valeurs numériques révèlent un décalage de  $1,357 \times 10^{-7}$  secondes et un temps de vol direct mesuré de l'onde de sonde de  $100\mu s$ , le rapport  $\Delta TOF/TOF_0$  est équivalent à  $1,357 \times 10^{-3}$ . Ces deux valeurs se situent dans le même ordre de grandeur que celles obtenues dans les essais réalisés par Ouvrier-Bufferet [5] avec la méthode d'interaction ondes pompe et ondes sonde transversales. Cette observation confirme que la méthode d'interaction onde-pompe et onde-sonde en configuration colinéaire permet de détecter les variations temporelles liées aux défauts dans le matériau étudié. De nouvelles expériences sont en cours afin de cartographier les décalages temporels générés par l'insert endommagé dans le béton du bloc de dimension intermédiaire et de confirmer l'efficacité de la méthode pour ce type de détection.



**FIGURE 2.** (a) Signal de réception d'onde sonde : Courbe bleu signal avant déclenchement d'onde pompe et courbe rouge signal après déclenchement d'onde pompe ; (b) Décalage de réception d'onde sonde sur une période du signal.

#### IV. CONCLUSIONS

Contrairement au stade préliminaire des essais présentés dans cette étude, il est possible d'observer une correspondance entre les résultats obtenus et ceux du travail précédent d'Ouvrier-Bufferet [5].

Une analyse approfondie des paramètres et des données d'entrée nécessaires au système d'acquisition est en cours, ainsi que le développement d'un post-traitement plus complet.

Il est prévu que de nouveaux résultats soient disponibles lors de la présentation orale de cette étude, ce qui permettra une description détaillée de la méthode en cours de développement.

#### REFERENCES

- [1] GAGG, C. R. (2014) Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis, *Eng. Fail. Anal.*, vol. 40, pp. 114–140
- [2] NEVILLE, A. M. (2011). *Properties of concrete*. Edinburgh, U.K.: Pearson. 5th ed. p. cm.
- [3] SIMS, I., POOLE, A. B. (2017) *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review*. CRC Press.
- [4] BOUZABATA, H., MULTON, S., SELIER, A., & HOUARI, H. (2012) Swellings due to alkali-silica reaction and delayed ettringite formation: Characterization of expansion isotropy and effect of moisture conditions. *Cement and Concrete Composites*, 34.
- [5] OUVRIER-BUFFET, F. (2019) *Apport aux Contrôles Non Destructifs Ultrasonores pour la détection des pathologies de gonflement Interne du Béton*. Thèse de doctorat, Aix-Marseille Université.