

# Evaluation Non Destructive des propriétés du béton en profondeur.

V. Garnier <sup>1</sup>, R. Hariri <sup>2</sup>, S. Klayne <sup>3</sup>, J.F Chaix <sup>1</sup>, C. Payan <sup>1</sup>, O. Abraham <sup>2</sup>, S Morin <sup>3</sup>, B Durville

<sup>1</sup>Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, AMU, ECM, CNRS, Bd Gaston Berger, 13625 Aix en Pce

<sup>2</sup>Université Gustave Eiffel, Bouguenais, Allée des ponts et chaussées, CS 5004, 44344 Bouguenais

<sup>3</sup>Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection, Centre de Cadarache, 13115 Saint Paul Lez Durance

## RESUME

Le béton peut évoluer dans le temps en vieillissant selon des conditions environnementales, les sollicitations mécaniques et le développement de pathologies. Les développements des pathologies dans le béton dépendent des conditions initiales lors de la réalisation/prise du béton, de l'environnement au cours de la vie de l'ouvrage (température, humidité ...) et aussi du transport d'éléments réactifs (chlore, eau et carbone) depuis la surface. Ainsi l'apparition de gradient de composants (chlore, eau, carbone) conduit à des phénomènes de vieillissement. Par ailleurs, des teneurs en eau importantes souvent à cœur favorisent des réactions gonflantes internes différées alcalines ou sulfatiques. La connaissance du béton en fonction de la profondeur devient indispensable. Les Essais Non Destructifs permettent de répondre à cet objectif, mais leurs mesures conduisent souvent à des données soit limitées à une zone proche de la surface soit intégrant des propriétés sur toute la profondeur testée. Nous proposons deux méthodes ultrasonores développées par deux thèses dont les objectifs sont pour l'une la mesure des gradients de teneur en eau en fonction de la profondeur pour l'autre la localisation d'endommagements issus de réactions différées dans le béton. Pour la première l'implantation de couples de capteurs à différentes profondeurs permet de mesurer les variations de la vitesse des ondes ultrasonores de pression liées à la teneur en eau. Pour la seconde des mesures sont effectuées dans la profondeur du béton afin de détecter le comportement non linéaire du béton. Ces méthodes non destructives ultrasonores sont développées dans deux thèses et permettent d'avoir une perspective sur la surveillance et le contrôle du béton en continu.

**Mots-clefs** END, Ultrasons, Gradient, Réaction Gonflante Interne.

## I. INTRODUCTION

L'auscultation d'une structure et son suivi dans le temps sont deux points essentiels pour connaître l'état de santé du béton d'un ouvrage soit ponctuellement à une date définie ou soit en continu (Structural Health Monitoring). Cette auscultation consiste à faire des mesures par l'intermédiaire de prélèvements de béton analysés en laboratoire, d'instrumentations in situ telles que les cordes vibrantes ou les fibres optiques ou/et encore par des Contrôles Non Destructifs (CND). Ces Essais Non Destructifs (END) sont usuellement fondés sur des mesures visuelles ainsi

que par des techniques radar, radiographiques, électriques, capacitives, thermographie ou encore ultrasonores *Balayssac JP, Garnier V (2017); Breysse D, (2012); Maierhofer C, Reinhardt HW, Dobmann G (2010)*. Ces techniques permettent d'avoir des informations sans endommager le béton et à coût limité. Elles peuvent être reproduites avec une certaine justesse si elles sont définies par un protocole ou une recommandation, voire une norme. Ce sont des moyens mis en œuvre régulièrement in situ sur des épaisseurs pouvant être décimétrique à métrique la plupart du temps à partir des surfaces de la structure. L'inversion des valeurs de mesures issues des END se fait par modèles de conversion établis au préalable *Sbartai ZM, Breysse D, Larget M, Balayssac JP. (2012)* pour en déduire des indicateurs de durabilité du béton. Les principaux indicateurs sont la résistance mécanique, du module d'élasticité, de la porosité et de la teneur en eau.

Certaines techniques nécessitent un accès à une seule face. Dans ce cas la profondeur d'auscultation est limitée ou/et la précision diminue avec la profondeur auscultée. De plus la séparation des informations en fonction de la profondeur peut être complexe en raison de nombreux paramètres d'influence *Tremblay SP and all, (2020)*.

D'autres techniques peuvent nécessiter ou autoriser un accès à deux faces de la structure mais dans ce cas, les données enregistrées correspondent au cumul des informations sur tous le parcours des ondes traversant l'épaisseur du matériau. L'analyse en fonction de la profondeur de gradient de propriété du béton ou de défaut localisé est généralement impossible car d'une part, le positionnement en profondeur n'est pas implicite et d'autre part, la modification de la mesure END générée par ce défaut est aussi d'autant plus faible qu'il est de petite dimension.

Pourtant dans beaucoup de cas les indicateurs de durabilité du béton peuvent évoluer au cours du temps et en fonction de la profondeur dans la structure. Il est donc nécessaire de suivre ces propriétés en temps réel avec une incertitude minimisée et la mesure de leurs gradients qui sont des éléments clés dans les modélisations prospectives de durée de vie. De plus les gradients thermiques, de teneur en eau, voire de micro-fissures associées à l'endommagement peuvent modifier les phénomènes de transfert d'éléments responsables de dégradations internes (chlore, eau, carbone) ou encore peuvent être moteur dans les phénomènes de diffusion.

Les techniques appliquées par la surface ne peuvent pas répondre à ce besoin d'auscultation des gradients des indicateurs de durabilité voire de pathologie naissante. Nous présentons ici deux méthodes d'évaluation des propriétés du béton et des gradients de propriétés par des techniques ultrasonores développées à travers deux thèses au LMA intégrées dans des projets ANR et internationaux. Elles s'appuient sur l'intégration de capteurs ultrasonores embarqués dans le béton pour l'une et sur la mise en œuvre de l'acoustique non linéaire en fonction de la profondeur pour l'autre. Nous les présentons successivement puis analysons leur complémentarité dans une approche possible d'auscultation lors de mesures sur site.

## II. TRADUCTEURS EMBARQUÉS DANS LE BETON

Ce travail de thèse a été réalisé par *Hariri R. (2024)* dans le cadre du projet ANR SCaNING *Villain G and all (2020)*. L'objectif de ce projet est d'implanter des traducteurs électriques, électromagnétiques et ultrasonores dans le béton pour suivre les évolutions des propriétés du béton avec le temps pour différents cycles de température et de séchage. Les différentes mesures

issues des END sont fusionnées par la suite *Sbartai ZM, Garnier V, Villain G, Breysse D (2018)* afin de tenir compte de leur complémentarité pour améliorer la justesse de la quantification des indicateurs recherchés. Nous présentons ici les mesures de la vitesse des ondes ultrasonores développées ans le cadre de SCaNING. Elles consistent à mesurer à différentes profondeurs par des couples de transducteurs de pression, la vitesse de pression  $V_p$ .

#### A. Instrumentation

Souvent les mesures de  $V_p$  ponctuelles sont réalisées par des ondes transmises au moyen de deux transducteurs positionnés sur deux surfaces opposées du béton, que cela soit en laboratoire ou sur site. Elles sont toujours entachées d'erreurs à minima de 1% de la valeur mesurée en raison de la reproductibilité des mesures dépendante de l'état de surface, du couplant indispensable et de l'opérateur. Par ailleurs les évolutions de la teneur en eau et du module d'élasticité peuvent générer des variations allant jusqu'à 10% de la valeur initiale des vitesses des ondes ultrasonores *Garnier V and all, (2013)*. Il est donc important de noter que pour de faibles variations de l'état hydrique, ces variations sont elles aussi de l'ordre de 1%. Enfin le béton étant constitué de granulats distribués aléatoirement dans une matrice cimentaire, les différentes distributions génèrent aussi des erreurs du même ordre pour un parcours identique d'une onde. Il apparait clairement que pour suivre les propriétés du béton avec le minimum d'erreurs dans leur évaluation, il faut réduire ces sources d'erreurs. C'est pourquoi des transducteurs noyés dans le béton se trouvent dans une configuration optimisée grâce à un contact transducteur-béton et une distribution des granulats toujours identiques dans le temps. Les seuls paramètres qui peuvent évoluer sont les propriétés du béton que l'on veut mesurer. Des études ont déjà été réalisées dont *Deraemaeker, A. Dumoulin, C. (2019)* qui valident ces avantages sur des petites poutres. Une expérience réalisée il y a plus de 35 ans pour surveiller un barrage en Saxe a permis de conclure récemment *Niederleithinger et al., 2015* que les transducteurs peuvent résister plusieurs décennies.

Dans notre étude, nous avons réalisé des capteurs au LMA afin de répondre au mieux au cahier des charges établi. Une fréquence de 100 kHz un diamètre de 12 mm pour un parcours de 100 mm, une étanchéité et une isolation électromagnétique optimisée. Afin de suivre les propriétés du béton en fonction de la profondeur nous avons développé un support de deux séries de 8 paires de transducteurs (émetteur – récepteur) positionnés à 8 profondeurs. Ces transducteurs sont implantés dans une dalle armée de  $1 \times 1 \times 0,3 \text{ m}^3$  soumise à des cycles de séchage à différentes températures.

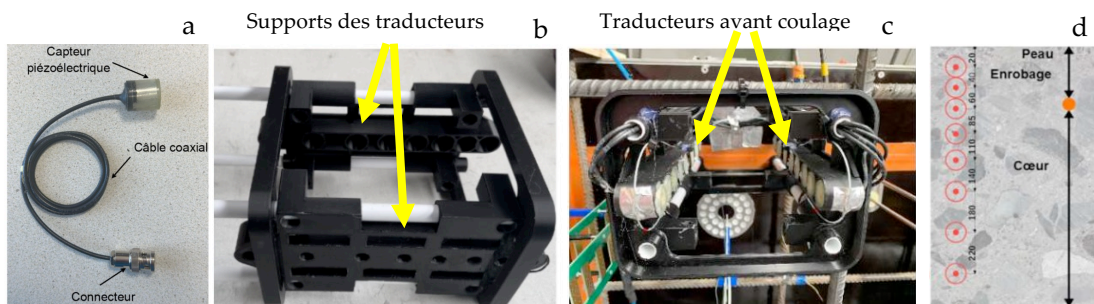


FIGURE 1. Traducteurs réalisés et montage implanté dans la dalle de béton.

La figure 1 montre un des traducteurs réalisés (a) ainsi que le montage support des 8 couples de traducteurs (b) qui est noyé dans le béton (c). Elle précise aussi la distribution des traducteurs en fonction de la profondeur (d).

### B. Résultats

Deux possibilités du suivi de  $V_p$  sont possibles : sa variation absolue ou sa variation relative. Un travail sur les incertitudes durant cette thèse a montré que suivre les évolutions relatives de temps  $T$  et de  $V_p$  réduit de l'ordre de 30 fois les incertitudes par rapport à un suivi de  $V_p$  absolue. En effet, la mesure de la distance entre les traducteurs est incertaine sur le montage et elle n'intervient pas pour les mesures relatives de temps. Nous effectuons donc une corrélation croisée entre les signaux enregistrés à chaque instant et le signal de référence pris au premier instant des essais. Il est alors possible de déduire  $\Delta T$  puis  $\Delta V/V_0$ . La dalle a subi un premier séchage à 20°C pendant cinq mois (150 jours), un deuxième à 45°C pendant trois mois, et un troisième à 20°C en continu jusqu'à ce jour. Nous présentons, Figure 2, les résultats correspondant au séchage à 45°C. Le signal pris en référence au premier instant est la fin du séchage à 20°C juste avant la mise à 45°C soit T01+ 150 jours. Le temps T2 correspond à la fin de la mise en température à 45°C.

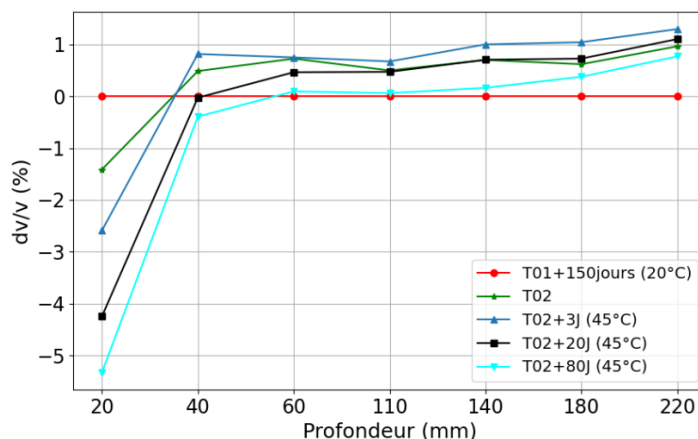


FIGURE 2. Variation relative de  $V_p$  en fonction de la profondeur à différents temps de séchage à 45°C.

Les variations relatives de la vitesse montrent pour toutes les profondeurs une diminution relative de  $V_p$  entre le début et la fin du séchage de l'ordre de 5 à 0.5 %. Cette variation diminue en amplitude avec la profondeur. Elle est importante dans le béton d'enrobage (5%  $\approx$  200 m/s) à 20 mm de la surface où l'eau s'évapore rapidement et elle est faible en profondeur à 220 mm (0.5%  $\approx$  20 m/s), là où l'eau doit migrer vers les couches externes. Sur la base d'un modèle linéaire de conversion entre  $V_p$  et la saturation réalisée pour ce béton lors de ces travaux, la chute de saturation correspondante est estimée à 80% en surface et à 8% en profondeur après 3 mois de séchage à 45°C.

### C. Conclusion

Ce travail a montré qu'il est possible d'instrumenter une dalle de béton pour suivre des gradients de saturation en fonction de la profondeur. Les évolutions des  $V_p$  montrent des diminutions de teneur en eau 10 fois plus importantes dans l'enrobage qu'à cœur. Ce suivi peut se faire en continu et conduire à des tomographies de la distribution de la teneur en eau à tout instant. Il est ainsi possible de suivre la cinétique d'évolution de cet indicateur.

De telles études peuvent être conçues pour d'autres indicateurs de durabilité du béton. Ces montages sont implémentés actuellement lors de la réalisation, mais la suite de l'étude en cours a pour but de travailler sur l'implantation sur des structures anciennes.

### III. ACOUSTIQUE NON LINEAIRE A CŒUR

#### A. Instrumentation

Ce travail de thèse est réalisé par Klayne Da Silva *Silva K. and all (2023)* dans le cadre du consortium *Concrete (2016)* et du projet international *ODOBA 2016* coordonnés par l'IRSN maintenant ASNR. Ces projets sont attachés à l'étude de la prolongation de durée de vie des centrales électronucléaires. Ils ont pour but d'évaluer dans le temps et de prédire de manière pertinente la performance d'ouvrages de génie civil. Notamment les bétons peuvent être atteints de pathologies qui résultent de réactions chimiques en leur sein au cours de leur vieillissement. Deux d'entre elles, la RAG et la RSI ont fait l'objet de nos travaux. Ces Réactions Gonflantes Internes peuvent conduire à la dégradation des propriétés mécaniques et de la capacité du béton à assurer le confinement des matières radioactives.

Cette thèse fait suite à une première thèse *Ouvrier Buffet F. 2019* sur le sujet de la détection des RGI. La RAG a déjà été étudiée tant sur le point de vue génération chimique *Pan and all (2012)*, que paramètres d'influence *Martin R.P., Bazin C., Toutlemonde F. (2012)*, que conséquence sur la micro structure *Bouzabata and all (2012), Mohammadi and all (2020)*. Cette pathologie se développe à cœur en fonction des conditions de teneur en eau et de température à la prise puis lors du cycle de vie de la structure. L'objectif est donc de détecter à cœur et d'une façon précoce la présence du gel caractéristique de son développement à tout moment du cycle de vie de la structure. Pour les épaisseurs métriques des enceintes de confinement, les techniques de surface ne sont pas applicables en raison de leur faible profondeur de pénétration. Les techniques traversantes quant à elles, ne sont pas en mesure de porter une information précoce de la RAG car elles intègrent les informations sur tout le parcours de l'onde.

Le principe de l'Acoustique Non Linéaire est de solliciter le matériau avec une forte amplitude afin de le placer dans un état hors équilibre. Dans notre cas, cette onde s'appelle l'onde pompe. Le comportement non linéaire du béton diminue alors localement le module d'élasticité et par conséquence la vitesse des ondes ultrasonores. Cette diminution est évaluée par une onde sonde. Cette technique décuple la sensibilité des ultrasons aux évolutions de la microstructure comparativement à l'acoustique linéaire *Payan C. (2015), Lesnicki and all (2013)*. Pour réussir à ausculter à une profondeur donnée, nous avons exacerbé le comportement non linéaire du béton dans une zone donnée de la structure par une onde pompe de pression générée par une grappe de 6 traducteurs supportant 100 W chacun. L'auscultation de cette zone se fait d'une façon optimisée temporellement par une onde sonde perpendiculaire à l'onde pompe. Dans ce cas, cette

onde sonde est une onde transversale dont la polarisation est orientée dans le sens de la propagation des ondes pompes. La variation de la vitesse de l'onde sonde est liée à l'évolution de la pathologie dans la zone d'interaction des deux ondes. Ce principe initial d'onde pompe-sonde orthogonales est donné par le Figure 3.

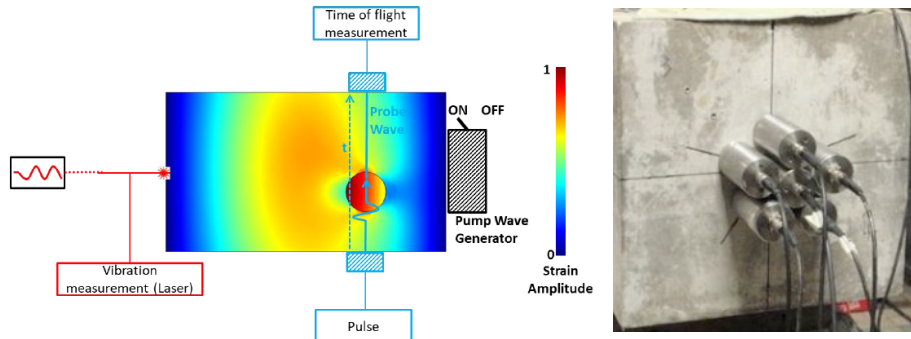


FIGURE 3 : Principe de génération de l'interaction des ondes pompe et sonde orthogonales à cœur.

Le corps d'épreuve à une échelle dite moyenne est de  $0.4 \times 0.4 \times 0.7 \text{ m}^3$ . Il contient un bloc simulant une zone RAG avec un comportement non linéaire avéré tel que du grès ou un béton endommagé de dimension 10 cm.

### B. Résultats

La mesure en un point consiste à quantifier le décalage temporel de l'onde sonde généré par la mise en action de la sollicitation de forte amplitude par l'onde pompe. Ce décalage caractérise l'apparition du comportement non linéaire du béton et donc d'une pathologie ou défaut potentiel. Dans le cadre d'un travail en 2D, le déplacement des traducteurs de l'onde sonde dans le plan de propagation des ondes permet d'établir une cartographie de la zone de propriétés non linéaire projetée comme le montre la figure 4 Eiras and all (2024).

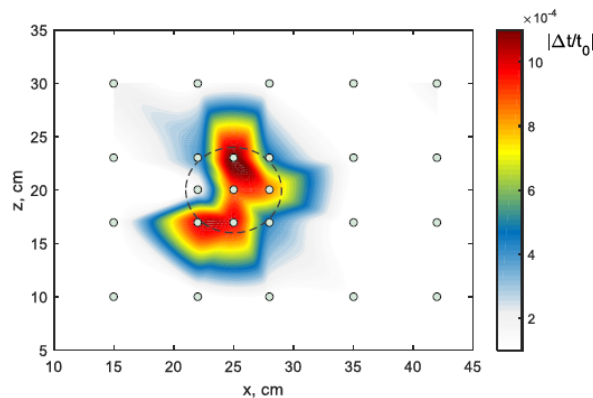


FIGURE 4 : Cartographie 2D de la zone du corps d'épreuve simulant le béton atteint de la RAG.

L'accès aux 4 faces d'une structure tel que nécessaire initialement (Figure 3) n'est pas réaliste pour un travail sur site. Le premier travail de la seconde thèse consiste à développer une auscultation par ondes pompe et sonde colinéaires. Le principe est montré par la Figure 5 a. Ici les ondes pompe et sonde sont des ondes de pression. L'onde sonde est retardée temporellement de façon à ce que l'onde pompe ait le temps de solliciter le corps d'épreuve avant que celui-ci ne soit sondé.

Cette disposition permet dans un premier temps de détecter la présence d’une zone pathologique dans une structure de forte épaisseur par des ondes générées en surface. La Figure 5 b montre le résultat de la variation de temps de l’onde sonde après sollicitation de l’onde pompe pour une ligne horizontale de points le long de l’éprouvette obtenue par déplacement du dispositif ultrasonore.

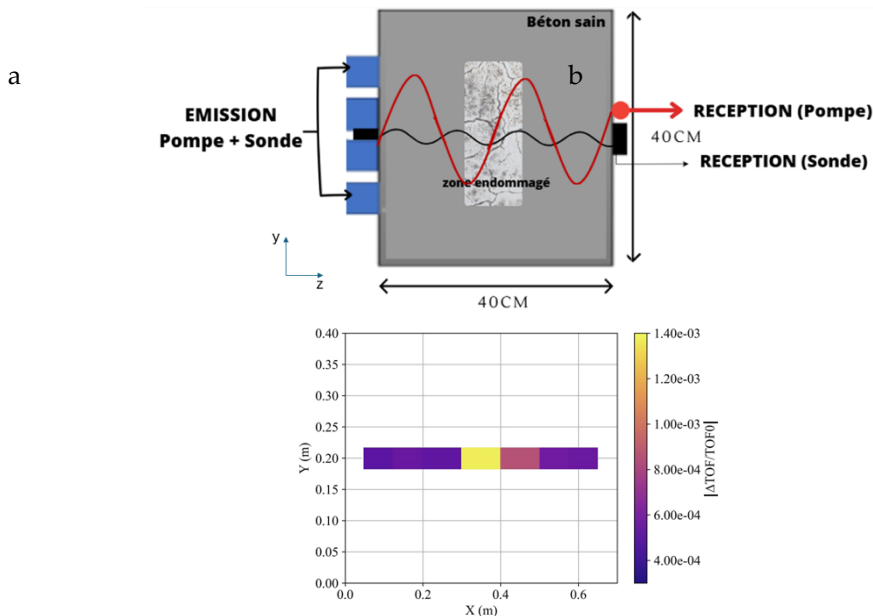


FIGURE 5 : Principe d’auscultation par ondes pompe et sonde colinéaire. Décalage temporel relatif obtenus sur une ligne horizontale par déplacement du dispositif ultrasonore.

La zone non linéaire est clairement identifiée. Les variations de la non-linéarité mesurée est de 270 % alors que la variation des  $V_p$  pour cette même zone n’est que de 11%. Il est donc possible de détecter une zone non linéaire mais le second objectif de ce travail est ensuite de la localiser. Pour y parvenir des essais ont permis de valider une localisation par croisement d’ondes pompe et sonde se propageant dans des directions opposées.

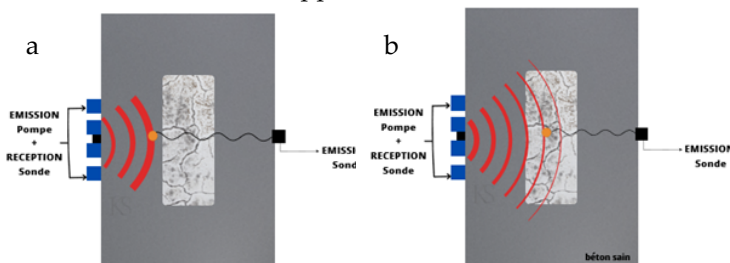


FIGURE 5 : Principe de localisation par croisement des ondes pompe et sonde colinéaire.

La position de l’interaction des ondes pompe et sonde est gérée par un délai de synchronisation de génération des ondes montré par la figure 5. Si l’onde sonde traverse la zone pathologique avant la sollicitation de l’onde pompe (Figure 5 a), la non-linéarité de cette zone et donc la pathologie ne seront pas identifiées par l’onde sonde. Dans le cas contraire (Figure 5 b), la zone pathologique sera identifiée par l’onde sonde et positionnée par le délai entre les ondes.

Ce travail est réalisé ainsi que le transfert des techniques de détection de la RAG à grande échelle sur des blocs du projet ODOBA de  $2 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ . Ces résultats à moyenne et grande échelle seront présentés lors de la soutenance de thèse le 1 juillet 2025.

### *C. Conclusion*

Ces développements ont montré qu'il est possible de générer une analyse par acoustique non linéaire à cœur d'un corps d'épreuve de forte épaisseur. La technique de sollicitation par onde pompe et auscultation par onde sonde colinéaires a montré la forte sensibilité à la présence d'une zone non linéaire et la possibilité d'une cartographie en 2D. Elle est adaptée pour localiser en profondeur cette même zone et donner une vision 3D des défauts. Des validations sont à proposer pour la précocité de la détection.

## **IV CONCLUSION**

Les deux développements ont permis un travail de détection de pathologies ou/et d'indicateurs de durabilité à cœur dans le béton. Si elles sont fondées sur des approches différentes, elles contribuent toutes les deux à améliorer la mesure et les incertitudes associées.

La première méthode est interne. La stratégie d'auscultation associée doit être préétablie dans le cadre d'une maintenance préventive sur des zones identifiées comme étant pathologiques potentiellement. Elle peut rentrer dans le cadre du suivi en temps réel des propriétés du béton d'une structure et de la production de données pour le recalcul d'une structure. Notamment elle peut fournir des gradients de propriétés nécessaires pour estimer les transferts potentiels d'agents agressifs.

La seconde technique est externe. Elle peut s'appliquer sur des zones ciblées au préalable mais sa destination première est d'ausculter des zones identifiées comme à risque au cours de cycle de vie de la structure. Des développements de cette technique sont encore nécessaires, notamment pour mettre en œuvre la localisation sur site. L'acoustique non linéaire est dédiée dans nos travaux aux réactions gonflantes internes, mais elle peut être développée pour d'autres endommagements.

A ce stade, les apports de chacune de ces techniques sont différents car attachés à des comportements différents du béton. La technique par mesure de vitesse par acoustique linéaire est sensible aux évolutions de la saturation, alors que l'acoustique non linéaire est sensible principalement aux évolutions d'une micro-fissuration diffuse ou d'une macro-fissure naissante. La complémentarité entre les deux techniques pourra être un atout pour dissocier les indicateurs de durabilité saturation/endommagement par des processus de fusion de données. Une détection ou le suivi d'un endommagement représenté par le module d'élasticité et son évolution à cœur peut être un objectif de travaux futurs.

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions l'Agence Nationale de la Recherche pour le financement du projet ANR SCaNING et par là-même de la thèse de Rouba Hariri ainsi que la Région Sud PACA, l'ASNR et MISTRAS pour le financement et les collaborations durant la thèse de Klayne Dos Santos Silva.

## REFERENCES

*Balayssac JP, Garnier V (2017), Editor, Non Destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures, ISTE Press - Elsevier, Version anglaise November 2017*

*Breysse D, (2012), Editor, Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207-INR. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2736-6>.*

*Bouzabata and all (2012) Bouzabata, Hassina, Stéphane Multon, Alain Sellier, and Hacène Houari. 2012. 'Swellings Due to Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation : Characterisation of Expansion Isotropy and Effect of Moisture Conditions'. Cement and Concrete Composites 34 (3): 349–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.10.006>*

*Concrete (2016) <https://www.irsn.fr/recherche/programme-concrete>*

*Deraemaeker, A. Dumoulin, C. (2019) Embedding ultrasonic transducers in concrete : A lifelong monitoring technology. Construction and Building Materials, 194 :42–50. [Nie 2015]*

*Eiras and all (2024) Eiras, J, Ouvrier Buffet F., Durville B., Garnier V., Payan C., Pump and Probe Wave Mixing for Imaging Nonlinear Features Embedded Into a Massive Concrete Block, Journal of Nondestructive Evaluation Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems 7(4):1-11, 2024, DOI: 10.1115/1.4065599*

*Garnier and all (2013) Garnier V, Piwakowski B, Abraham O, Villain G, Payan C, Chaix JF, (2013). Acoustic techniques for concrete evaluation : Improvements, comparisons and consistency. Construction and Building Materials, 43 :598–613.*

*Hariri R. (2024) Doctorat de l'École Centrale de Nantes, ED 602, Suivi des gradients de propriétés du béton par capteurs ultrasonores embarqués, Décembre 2024*

*Lesnicki and all (2013) Lesnicki K., Kim J.M., Kurtis K. E., Jacobs L.J., Assessment of alkali-silica reaction damage through quantification of concrete nonlinearity, Materials and Structures, 46:497–509, DOI 10.1617/s11527-012-9942-y, (2013)*

*Maierhofer C, Reinhardt HW, Dobmann G (2010), Editor, Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures, Non-Destructive Testing Methods, Volume 2*

*Martin R.P., Bazin C., Toutlemonde F. (2012) Alkali Aggregate Reaction and Delayed Ettringite Formation : Common Features and Differences. In 14th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR14, 10 p. France. <https://hal.science/hal-00852367>.*

*Mohammadi and all (2020) Mohammadi, Afshin, Ebrahim Ghasvand, and Mahmoud Nili. 2020. 'Relation between Mechanical Properties of Concrete and Alkali-Silica Reaction (ASR); a Review'. Construction and Building Materials 258 (October):119567. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119567>. Payan 2015 HDR*

*Niederleithinger et al., (2015) Niederleithinger, E., Krompholz, R., Muller, S., Lautenschlager, R., and Kittler, J. (2015). 36 ans de surveillance de l'état du béton par ultrasons. 38e colloque*

d'ingénierie hydraulique de dresde 2015. Mesure et surveillance en génie hydraulique et sur les eaux.

*ODOBA (2016)* <https://www.irsn.fr/recherche/projet-odoba#contexte>

*Ouvrier Buffet F. (2019)*, Doctorat d'Aix Marseille Université, LMA LMDC IRSN, ED 353, Développement et qualification de CND par ultrason pour la détection de réactions de gonflement interne de structures en béton, 2019

*Pan and all (2012)* Pan, Jianwen, Y. Feng, Jinting Wang, Q. Sun, C. Zhang, and D.R.J. Owen. 2012. 'Modeling of Alkali-Silica Reaction in Concrete: A Review'. *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 6 (March). <https://doi.org/10.1007/s11709-012-0141-2>. Martin, Bazin, and Toutlemonde 2012

*Payan C. (2015)* Habilitation à Diriger les Recherches, ED 353 AMU, Contribution à la caractérisation non destructive des milieux complexes : Ultrasons diffus et non-linéarité, 2015

*Sbartai ZM, Breyse D, Larget M, Balayssac JP. (2012)*. Combining NDT Techniques for Improved Evaluation of Concrete Properties'. *Cement and Concrete Composites* 34 (6): 725–33. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.03.005>.

*Sbartai ZM, Garnier V, Villain G, Breyse D (2018)* Ch.8, Assessment of Concrete by a Combination of Non-Destructive Techniques, *Non Destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures*, ISTE Press - Elsevier, November 2017

*Silva K. and all (2023)*, Silva K. Garnier V. Payan C. Durville B. Cantrela L. Lahlouc L., Applying linear and non-linear resonant ultrasonic techniques to assess the formation of Alkali-aggregate reaction in concrete, *International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, NDE NucCon*, Finland, 2023

*Tremblay SP and all, (2020)*, Temblay SP, Mhenni A, Karray M, Paquet-Bouchard B, Chekired M, Bessette C, Jinga L, Non-intrusive Characterization of Shallow Soils and Utility Structures Below Pavements Using Rayleigh Waves, *Pure Appl. Geophys.* 177 (2020), <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02333-x>

*Villain G and all (2020)* Villain, G. and all, *Projet SCaNING : Suivi des infrastructures neuves et existantes par Capteurs Noyés pour évaluer les Indicateurs Nécessaires à leur Gestion durable*. *Academic Journal of Civil Engineering*, 2021, 38(2), 94-98. [journal.augc.asso.fr/index.php/ajce/article/view/2493/2153](http://journal.augc.asso.fr/index.php/ajce/article/view/2493/2153) (Diagnobéton 2020, Bordeaux)