



Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

CARACTÉRISATION NON DESTRUCTIVE DU COMPORTEMENT ÉLASTIQUE NON LINÉAIRE DU BÉTON : POTENTIEL, LIMITATIONS ET PERSPECTIVES

NON-DESTRUCTIVE CHARACTERIZATION OF CONCRETE NON-LINEAR ELASTIC BEHAVIOR: POTENTIAL, LIMITATIONS AND PROSPECTS

C. PAYAN^{1,(*)}, P.Y. LE BAS², V. GARNIER¹, T.J. ULRICH², M. GRIFFA³

¹ LMA CNRS UPR7051, Université d'Aix-Marseille, LCND, Av. Gaston Berger 13625 Aix-en-Provence

² Los Alamos National Laboratory, EES-17, Los Alamos NM USA

³ EMPA, Dübendorf, Suisse

* auteur correspondant : cedric.payan@univ-amu.fr

RÉSUMÉ

Le potentiel des indicateurs acoustiques non linéaires est démontré pour la caractérisation non destructive du béton. Depuis une dizaine d'années, de nombreuses études montrent que ces paramètres sont très sensibles face à l'endommagement ou une pathologie donnée. Nous introduisons la physique des phénomènes, les différents moyens de caractérisation ainsi que leurs limites. Nous exposons les différents résultats qualitatifs obtenus concernant certaines pathologies, la teneur en eau, la porosité ou l'endommagement. Nous introduisons une méthode quantitative de résonance, donc globale, pour mesurer la non linéarité. Nous proposons une nouvelle méthode locale fondé sur le principe physique du retournement temporel permettant une mesure locale et à différentes profondeurs des propriétés non linéaires du béton. Elle est appliquée et validée dans le cas de gradient propriétés induits par endommagement thermique.

ABSTRACT

The potential of nonlinear acoustics indicators for concrete NDE is established. Their large sensitivity has been shown regarding damage and some pathology for years. The physics of nonlinearity is introduced; experimental means to measure such parameters are presented as well as associated limitations. Qualitative results obtained in the presence of pathologies, varying water saturation, varying porosity or damage are presented. We introduce a quantitative method to measure nonlinear parameters by nonlinear resonance (global) measurements. Then a new method founded on time reversal is presented. This principle allows non-contact local measurements at various depths. It is validated in the presence of thermal damage.

Mots-clés : Acoustique non linéaire, retournement temporel, résonance non linéaire



1. INTRODUCTION

En acoustique, le principe de superposition indique que deux ondes se propageant dans un milieu n'interagissent pas. Le champ résultant est la somme de celui créé par la première et la seconde. Cependant, lorsque le milieu est non linéaire, ce principe n'est plus valide, le champ résultant sera pour partie la somme des deux contributions, mais des contributions supplémentaires vont apparaître due à l'interaction entre les deux ondes. Une onde perturbe le milieu, la seconde, lors de sa propagation, transite à travers ce milieu perturbé, transportant avec elle les informations relatives à cette perturbation. Le principe physique est résumé Figure 1. A l'échelle macroscopique, la loi de comportement n'est plus linéaire et dépend à l'ordre deux (ou plus) des déformations. Les paramètres non linéaires associés (β figure 1) caractérisent le comportement élastique non linéaire. La vitesse des ondes dépendant de la dérivée de la contrainte en fonction de la déformation, va, par voie de conséquences, dépendre également du niveau de déformation. Il en résulte une distorsion de l'onde avec les creux qui ont tendance à rattraper les bosses (Figure 1) ou inversement, dépendant du signe de β .

L'évaluation de la non linéarité (paramètre β), mesure de la distorsion, peut se faire par propagation d'onde (Figure 2). Considérons un milieu non linéaire d'ordre deux. Deux ondes stationnaires monochromatiques S_1 et S_2 , aux fréquences ω_1 et ω_2 sont présentes dans le milieu. La contrainte résultante en un point donné peut se décomposer en une partie linéaire (σ_L) et une partie non linéaire (σ_{NL}). La partie linéaire est la superposition des deux ondes sources ($S_1 + S_2$), se traduisant par la présence des deux raies spectrales ω_1 et ω_2 sur le spectre. La partie non linéaire est le carré de la somme des deux sources. En développant cette expression apparaît la somme des carrés (σ_{NLH}), qui par relations trigonométriques fait apparaître des termes aux fréquences $2\omega_1$ et $2\omega_2$. Ces fréquences doubles, appelées harmoniques, permettent par un rapport d'amplitude, de remonter au paramètre β . Enfin, le double produit issu du développement, fait quant à lui, apparaître

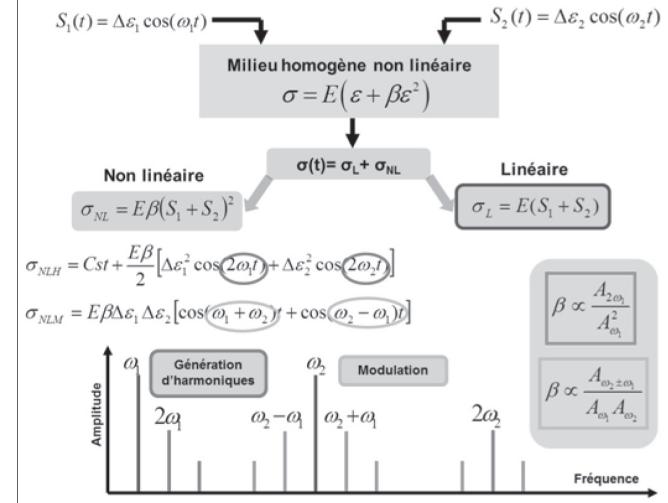


Figure 2 : Quantification de la non linéarité

les fréquences dites sommes et différences au fréquences $\omega_2 + \omega_1$ et $\omega_2 - \omega_1$. C'est un phénomène de modulation. De même, un rapport d'amplitude permet de remonter au paramètre β .

Cependant, il a été montré que dans les milieux dont la microstructure n'est pas homogène (roches, bétons...), ce modèle ne suffit pas à décrire les phénomènes non linéaires observés. Soumis à une onde de forte amplitude (de l'ordre de 10-6 en déformation), est observé une chute rapide ($\sim \mu s$) des propriétés élastiques. Ce phénomène est appelé dynamique rapide. Lorsque la sollicitation est stoppée, le matériau recouvre lentement ($\sim h$) ses propriétés élastiques initiales. Ce phénomène est appelé dynamique lente. Les observations expérimentales ne suivant pas la théorie « classique » de la non linéarité décrite ci-dessus, les auteurs ont introduit une loi de comportement phénoménologique permettant de décrire et de quantifier la théorie « classique » et « non classique » (Figure 4).

Cette loi de comportement prend en compte les phénomènes non linéaires à l'échelle atomique avec le paramètre β introduit ci-dessus, ainsi que les phénomènes non classiques à l'échelle de la microstructure avec le paramètre dit

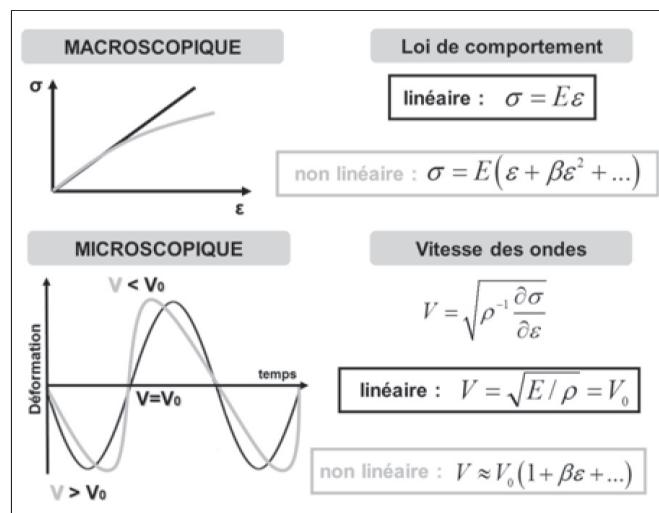


Figure 1 : Effets non linéaires à l'échelle micro et macroscopique

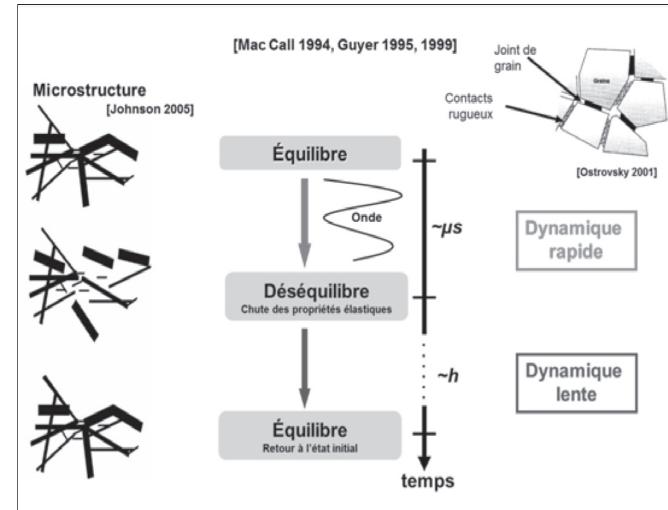


Figure 3 : Phénomènes « non classiques »

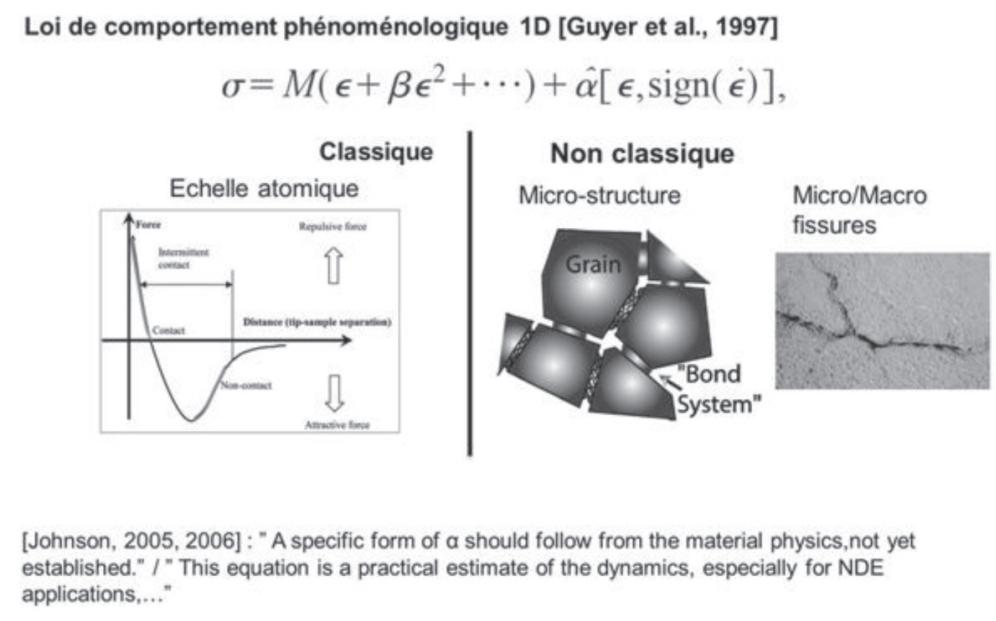


Figure 4 : Loi de comportement phénoménologique

non classique α . La physique liée à ces phénomènes n'est à ce jour pas encore entièrement connue, mais son origine vient d'un ensemble de phénomènes à l'échelle des joints de grains, des potentiels contacts entre ces grains, de la présence de micro fissures... Il est important de souligner que dans les matériaux fortement micro-inhomogènes (typiquement le béton), le paramètre de non linéarité non classique α domine le comportement non linéaire global. Appliqué au contrôle non destructif du béton, ce principe a largement été utilisé dans la littérature (cf. bibliographie [Pay07]), et montre une sensibilité à l'endommagement souvent plus que décuplée par rapport aux mesures standardisées de vitesses ou d'atténuation. Cependant, certaines limitations expérimentales ou physiques sont souvent ignorées. Le chapitre suivant expose quelques résultats issus de la littérature ainsi que les limitations associées.

2. BIBLIOGRAPHIE : POTENTIEL ET LIMITATIONS

Depuis les années 2000, de nombreuses études montrent le potentiel des paramètres non linéaires pour le CND du béton. Les points déterminants pour ce type de mesures sont :

1. La linéarité de la chaîne de génération/acquisition
2. La bonne qualité du couplage entre l'échantillon et les transducteurs.
3. L'estimation de la déformation, gérant les effets non linéaires (cf. Figure 4)

Dans l'ensemble des résultats fournis Figure 5 sont loin d'être exhaustifs, beaucoup d'autres ont été publiés depuis, mais les conclusions sont toujours sensiblement les mêmes. Au vu de ces résultats, la première conclusion qui interpelle est la sensibilité du paramètre mesuré face à l'état du béton avec des évolutions relatives supérieures à

100% ce qui en fait un bon indicateur en vue d'application en CND.

Cependant, il est important de noter que tous ces résultats sont des valeurs relatives ou variations relatives obtenues avec diverses configurations expérimentales. Aucun des travaux publiés jusqu'alors ne fournit de valeur absolue du paramètre non linéaire mesuré pour les trois raisons invoquées en début de chapitre. Le couplant joue un rôle prédominant sur la mesure car les non linéarités de contact au niveau des transducteurs peuvent masquer la non linéarité du béton. Pour une série d'échantillons donnée qui sont endommagés graduellement, avec une géométrie et une configuration expérimentale déterminée et inchangée, il est possible de comparer les mesures. Cependant, si la configuration expérimentale change (espacement entre les transducteurs, type de transducteurs, signal transmis, générateur...) les mesures ne sont pas comparables.

Il n'y a à notre connaissance que quatre publications [Abe2002], [Abe2000], [Joh2002], [Hau2011] qui proposent des mesures absolues du paramètre α . La difficulté majeure à surmonter pour avoir une mesure absolue est l'estimation du niveau de déformation. Nous proposons dans la partie suivante deux méthodes, une globale et une locale, permettant via la simulation numérique de mesurer quantitativement la non linéarité.

3. MESURE QUANTITATIVE DE LA NON LINÉARITÉ

3.1. Mesure par résonance

Une méthode d'estimation de la non linéarité est la résonance non linéaire. Le principe consiste à mettre en résonance une éprouvette de géométrie donnée en faisant varier le niveau de sollicitation. Le phénomène de dynamique

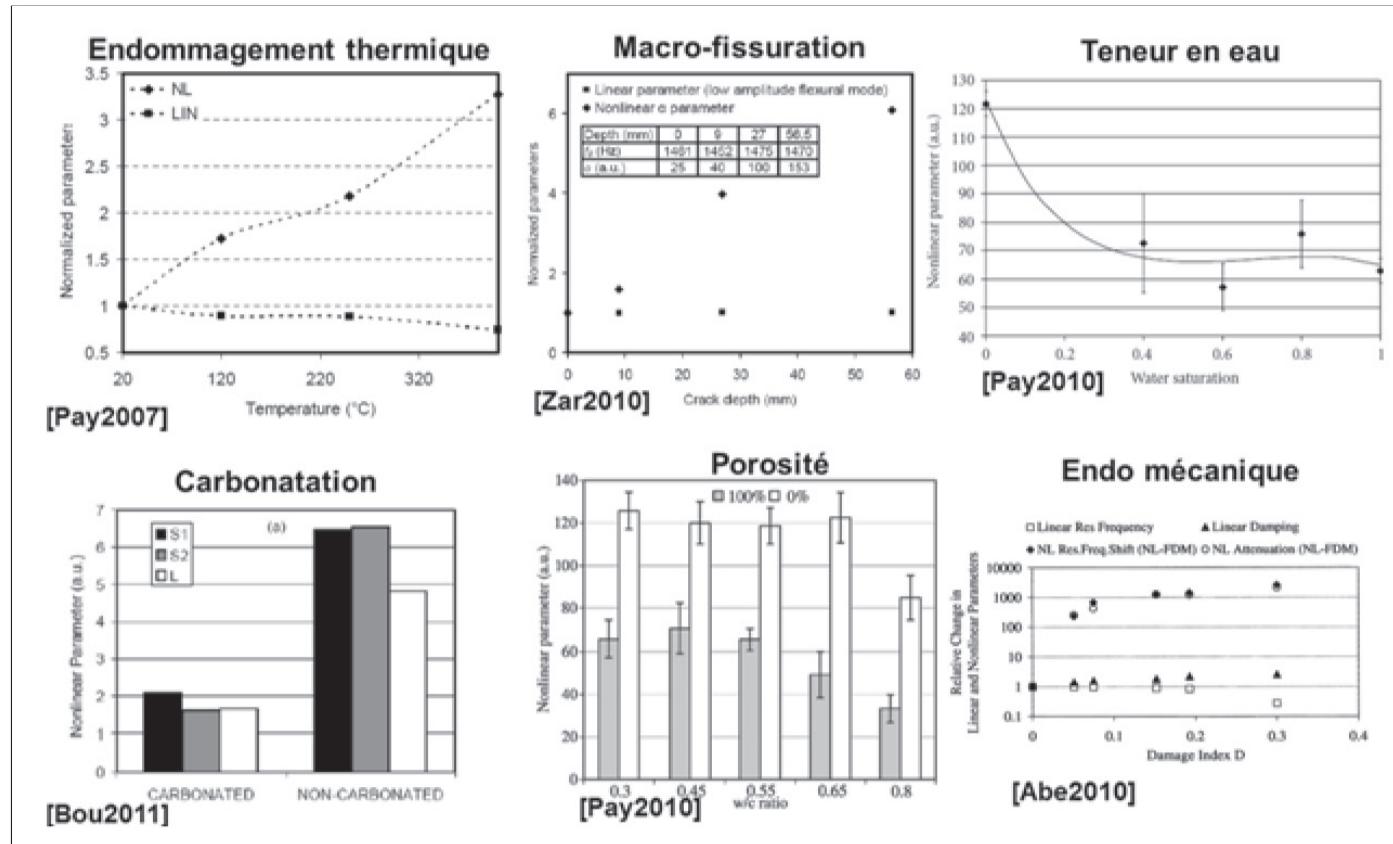


Figure 5 : Evolution de la non linéarité pour différents états du béton.

rapide (Figure 3) fait que la fréquence de résonance décroît linéairement avec l'amplitude de la déformation. La pente de cette droite donne le paramètre α .

Le principe de la mesure est fourni Figure 6. La géométrie de l'échantillon ainsi que sa masse volumique servent d'entrée au processus. L'analyse de toutes les fréquences de résonance de l'échantillon permettent d'obtenir le tenseur élastique linéaire complet (Se référer à [Mig1997] pour plus de détails). Connaissant alors la géométrie et le

tenseur élastique, une fréquence de résonance est sélectionnée. L'expérience de résonance non linéaire est alors réalisée sur ce mode. La simulation numérique permet alors de relier la quantité mesurée par le récepteur (vitesse ou accélération) à l'état de déformation du matériau. Connaissant la décroissance de la fréquence de résonance en fonction de la déformation, le paramètre α est obtenu quantitativement.

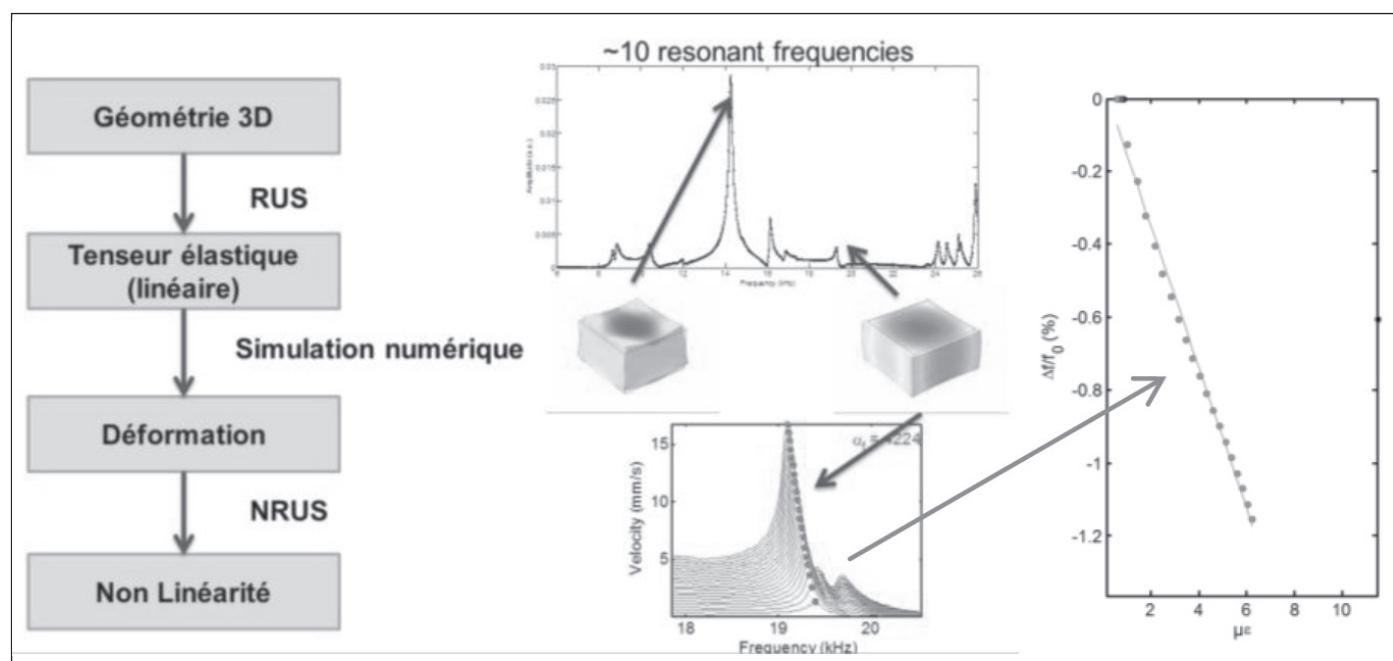


Figure 6 : Evolution de la non linéarité pour différents états du béton.

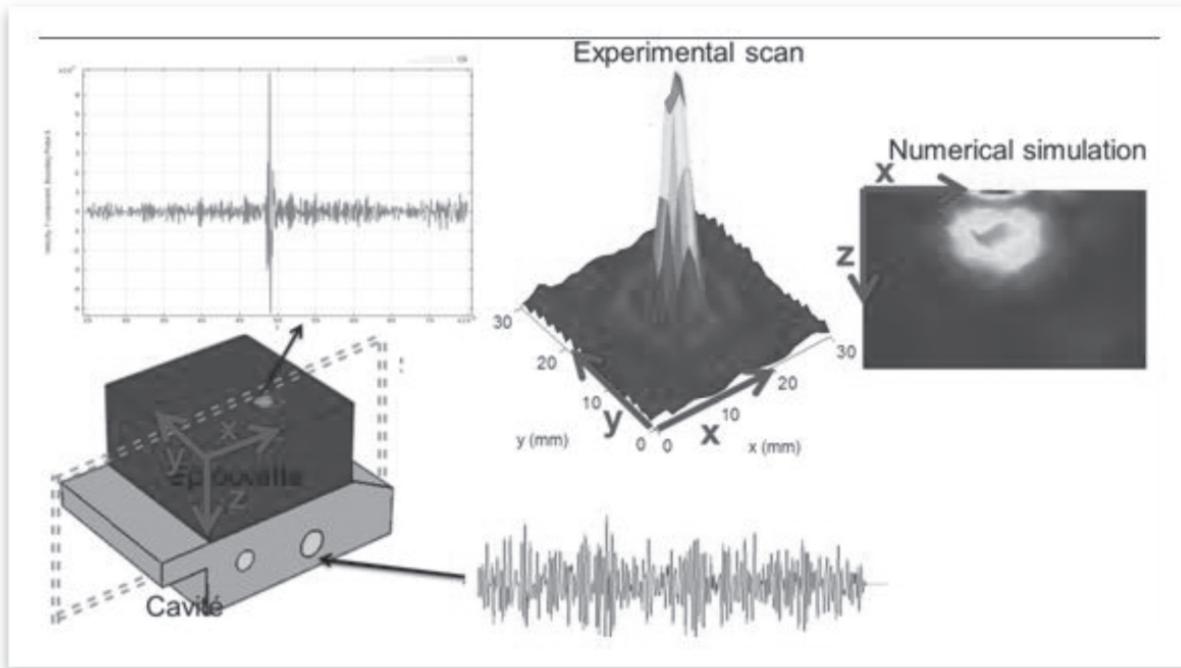


Figure 7 : Schéma du retournement temporel.

Face à un endommagement thermique progressif, la méthode quantitative est appliquée pour des éprouvettes de mortier, béton haute performance et béton ordinaire. L'endommagement thermique agissant principalement à l'interface ciments/granulats, le mortier est moins non linéaire que le béton. La linéarité des mesures de résonances a été calibrée par une mesure sur un échantillon linéaire de plexiglass pour lequel $\alpha=6$, soit plusieurs ordres de grandeurs en dessous des présents résultats. L'ensemble des analyses de la microstructure et les validations associées sont détaillées dans [Pay2013] et constituent les premières valeurs quantitatives relatives pour le béton. Les résultats pour le béton ordinaire sont fournis Figure 8.

3.2. Mesure locale

La résonance étant une méthode globale, difficilement transposable sur site à l'échelle d'une structure, une méthode fondée sur le principe du retournement est proposée. Le principe physique repose sur l'invariance de l'équation d'onde par renversement du temps ($t \rightarrow -t$). Cette méthode est détaillée dans [Pay2012]. La mesure permet de focaliser de l'énergie ultrasonore à n'importe quel endroit à la surface de l'échantillon, la taille de la tache focale en profondeur et à la surface dépendant de la longueur d'onde employée (Figure 7). La réception étant réalisée sans contact par un vibromètre laser à balayage, le

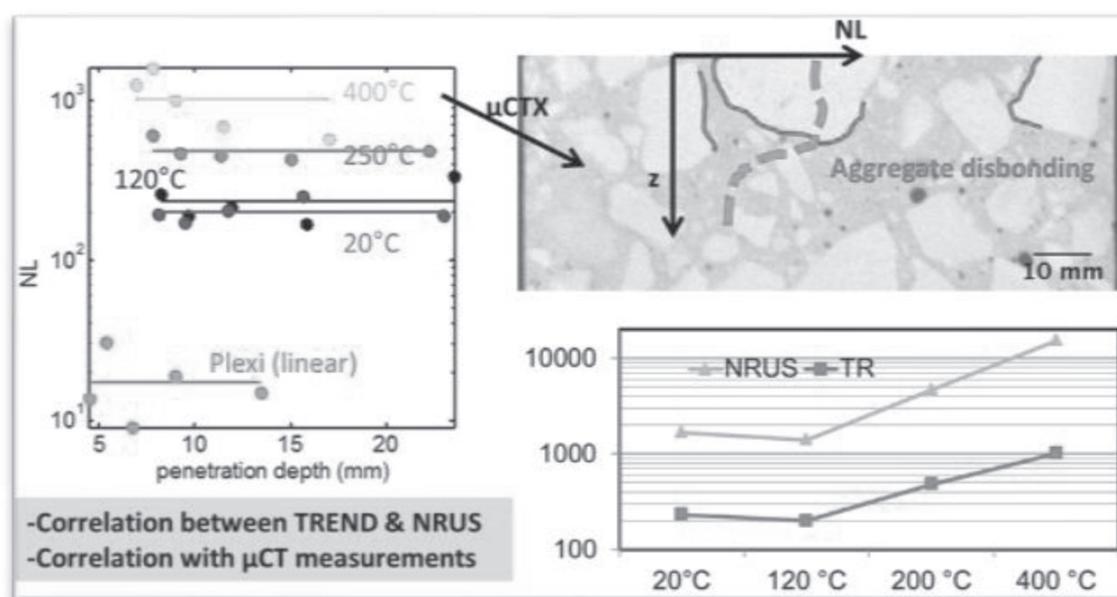


Figure 8 : Compilation des résultats obtenus par retournement temporel, résonance non linéaire et validation par tomographie X.



point de mesure peut être déplacé n'importe où. Un autre avantage notable de cette méthode est que le régime non linéaire (forte amplitude) n'est atteint qu'à l'instant et à l'endroit précis de la focalisation. Ainsi, la non linéarité potentielle due au couplage des émetteurs est négligeable. En changeant les fréquences, la longueur d'onde varie donc la taille de la tache focale évolue également, permettant d'inspecter à différentes profondeurs. La simulation numérique permet d'obtenir la taille de la tache focale, ainsi que le lien entre la quantité mesurée par le récepteur (ici la vitesse de vibration) à l'amplitude de la déformation dans la tache focale, permettant une mesure absolue de la non linéarité.

Ce principe est expérimenté des éprouvettes endommagées thermiquement à 20°C (référence), 120, 250 et 400 °C. Les résultats sont fournis Figure 8. La non linéarité est donnée en fonction de la profondeur de pénétration et la mesure est calibrée sur un échantillon linéaire de plexiglass. La non linéarité est obtenue par mesure de la dynamique rapide. Toutes les éprouvettes de béton montrent une non linéarité constante en fonction de la profondeur, exceptée l'éprouvette endommagée à 400°C. Cette dernière éprouvette a été inspectée par tomographie X.

Les résultats montrent que pour cette éprouvette, des micro fissures sont localisée dans le premier centimètre. Cette observation est corrélée avec la mesure. Par ailleurs, les résultats sont comparés avec les mesures absolues réalisée précédemment et l'accord entre les deux est notable. L'évolution est identique. L'écart vertical entre les deux mesures est dû à la surestimation de la déformation par simulation numérique. Ce point est en cours d'amélioration.

4. CONCLUSION

Cet article démontre le potentiel des méthodes issues de l'acoustique non linéaire pour le CND du béton. Après de nombreuses études qualitatives appliquées au CND du

béton depuis le début des années 2000, il est important maintenant de pouvoir comparer les données entre elles. Le point clé réside dans l'estimation de la déformation. Les méthodes proposées ici sont une piste parmi d'autres, et permettent d'envisager des applications plus pratiques de l'acoustique non linéaire à l'échelle du laboratoire ou d'une structure réelle.

RÉFÉRENCES

- [PAY07] C. Payan, CARACTERISATION NON DESTRUCTIVE DU BETON: ETUDE DU POTENTIEL DE L'ACOUSTIQUE NON LINÉAIRE. Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée, 2007.
- [GUY95] Guyer, R. A., K. R. McCall, and G. N. Boitnott, Phys. Rev. Lett., 3491-3494 (1995).
- [GUY99] R. A. Guyer and P. A. Johnson, Physics Today, 52, 30-35 (1999)
- [JOH05] Johnson P. and Sutin S., J. Acoust. Soc. Am. 117, 1, (2005)
- [Abe2002] K. Van Den Abeele, J. Carmeliet, P.A. Johnson, and B. Zinszner, J. Geophys. Res. 107 (B6), 2121 (2002).
- [Haup2011] S. Haupert, G. Renaud, J. Rivière, M. Talmant, P.A. Johnson, and P. Laugier, J. Acoust. Soc. Am. 130(5), 2654-2661 (2011).
- [Joh2004] P.A. Johnson, B. Zinszner, P. Rasolofosaon, F. Cohen-Tenoudji, K. Van Den Abeele, J. Geophys. Res. 109, B02202 (2004).
- [Abe2000] K. Van Den Abeele, J. Carmeliet, J.A. TenCate, and P.A. Johnson, Res. Nondestruct. Eval. 12, 31-43 (2000).
- [Mig1997] A. Migliori, John L. Sarrao, Resonant ultrasound spectroscopy: applications to physics, materials measurements, and nondestructive evaluation, Wiley, 1997
- [Pay2013] C. Payan, T.J. Ulrich, P.Y. Le Bas, T.A. Saleh, M. Guimaraes, J. Acoust. Soc. Am. (Revised, 2013)
- [Pay2012] C. Payan, T.J. Ulrich, P.-Y. Le Bas and M. Guimaraes, Acoustics 2012, April 23-27, Nantes, France, HAL 00810940 (2012)