END du béton par ultrasons : apport du modèle numérique intégrant l'ITZ

Manda RAMANIRAKA[1], Vincent GARNIER[1]

[1] *LMA UMR7031, Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille*

RESUME

Ces travaux montrent la nécessité de considérer l'Interfacial Transition Zone (ITZ) dans les simulations numériques de propagation d'ultrasons dans le béton. Cette couche très poreuse à l'interface granulat/mortier, bien que très fine, a des répercussions aussi bien sur la résistance mécanique du béton que sur sa durabilité. Un modèle numérique simple est proposé, consistant en un milieu biphasique avec des conditions de saut « masse-ressort » aux interfaces. Celui-ci a permis de retrouver des valeurs de paramètres ultrasonores mesurés expérimentalement, en prenant en compte des caractéristiques physiques « réalistes » d'ITZ. Cela pose les bases d'un outil d'inversion paramétrique destiné au diagnostic du béton. Le modèle a d'ailleurs été utilisé pour lier des observations d'effets de non-linéarité sur la diffusion des ondes ultrasonores avec l'état des contacts au niveau de l'ITZ.

Mots-clefs END, ultrasons, béton, ITZ, numérique

Keywords NDE, ultrasound, concrete, ITZ, numerical

I. INTRODUCTION

L'outil numérique occupe une place de plus en plus importante dans le diagnostic du béton. Ceci est vrai aussi bien pour les ultrasons que pour les autres techniques telles que l'analyse vibratoire ou encore le radar. En évaluation non destructive (END), le challenge réside dans la capacité à lier les observables à l'état réel du matériau, notamment à cœur. L'étalonnage des méthodes est ainsi nécessaire afin de fournir des informations pertinentes et quantitatives lors d'un diagnostic. Or, ceci est parfois difficile voire impossible. Disposer d'étalons numériques permettrait d'y palier et d'effectuer des inversions. Les outils numériques se posent également en bancs d'essai pour les travaux de recherche car ils permettent de tester un nombre important de configurations, en étant moins chers et plus rapides, comparés aux bancs d'essai physiques (éprouvettes, dalles, …). Tout cela n'aurait de sens qu'avec des modèles numériques intégrant des réalités physiques. C'est l'objet de cette communication qui présente le cas de l'Interfacial Tranzition Zone (ITZ) avec les ultrasons. Elle s'organise en 3 étapes : Pourquoi considérer l'ITZ dans les simulations ? Comment la considérer dans ces simulations ? Et enfin, quels sont les résultats obtenus ?

II. POURQUOI CONSIDERER L'ITZ ?

A. L'ITZ : le maillon faible du béton

L'ITZ est l'interface entre le granulat et la pâte de ciment dans un béton. Elle se matérialise en une couche de propriétés mécaniques moindres - car très poreuse – et d'épaisseur variable en fonction de la nature et de l'état du béton. Elle est identifiée comme étant le maillon faible du béton :

- La résistance mécanique du béton est gouvernée par celle de l'ITZ ;
- La durabilité du béton est affectée par les caractéristiques de l'ITZ. Favorisées par les pores remplis d'eau, les pathologies s'y développent et les fissurations y prennent naissance.
- La rupture du béton sous sollicitations s'amorce à ces interfaces.

B. Paramètres ultrasonores : écart numérique/expérimental

L'effet de l'ITZ sur la propagation des ondes ultrasonores dans le béton a été très peu étudié. Ainsi, les simulations numériques ne la considéraient pas. Or, des écarts importants ont été relevés entre les paramètres ultrasonores expérimentaux et numériques dans ces conditions. Par exemple, dans le cas d'un béton « ordinaire » à 500kHz [Ramaniraka et al., 2019] [Ramaniraka et al., 2022] :

- Dans ces simulations, la part de l'atténuation due à la diffusion multiple ne dépasse pas 5Np/m pour les ondes longitudinales, tandis que dans les mesures expérimentales, elle n'est jamais en dessous de 12Np/m.
- Dans ces simulations, la diffusivité dépasse 100m2/s, tandis que dans les mesures expérimentales, elle est de l'ordre de quelques dizaines de m^2/s au maximum.

La variabilité des propriétés des matériaux n'a pu expliquer ces écarts. Des simulations considérant des contacts « imparfaits » au niveau des interfaces granulats/mortier ont permis de les compenser.

III. COMMENT CONSIDERER L'ITZ ?

A. Simulations numériques de propagation d'ultrasons dans le béton

Les simulations sont réalisées avec le code Prospero développé au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA). Ce logiciel libre, codé en différences finies, permet des simulations temporelles de propagation d'ondes en milieu hétérogène 2D. Le béton simulé consiste en un milieu biphasique : des granulats de diamètre 12mm aléatoirement placés dans un mortier à un taux surfacique de 40%. Les propriétés mécaniques des deux milieux ont été prises parmi les plus utilisées dans la littérature.

B. Modélisation de l'ITZ

L'épaisseur de l'ITZ dans un béton ordinaire avoisinant les quelques dizaines de µm, il est quasi-impossible de modéliser entièrement et de mailler suffisamment une telle couche pour des simulations à l'échelle du béton à ausculter. Une solution simple est proposée dans nos travaux : considérer l'ITZ comme un contact « imparfait » à l'interface granulat/mortier sans la modéliser. Ceci est implémenté dans Prospero par des conditions de saut aux interfaces - de type « masse-ressort » - déjà largement utilisées dans les problèmes de collages et de composites :

$$[u_N(A,t)] = \frac{1}{K_N}\sigma_{N0}(A,t)\,; \quad [\sigma_N(A,t)] = M_N\frac{\partial^2}{\partial t^2}u_{N0}(A,t)$$
$$[u_T(A,t)] = \frac{1}{K_T}\sigma_{T0}(A,t)\,; \quad [\sigma_T(A,t)] = M_T\frac{\partial^2}{\partial t^2}u_{T0}(A,t) \qquad (1)$$

Où $[u_N(A,t)]$, $[u_T(A,t)]$, $[\sigma_N(A,t)]$, $[\sigma_T(A,t)]$ sont les sauts de déplacements et de contraintes à l'interface au point A et au temps t. Et $K_N > 0$, $K_T > 0$, $M_N \geq 0$, $M_T \geq 0$ sont les raideurs et les masses de l'interface.

Les masses ont été négligées dans ces premières phases de l'étude, et un seul paramètre CL (contact level) regroupant deux principales caractéristiques de l'ITZ (épaisseur et module d'Young) a été défini pour être intégré dans les expressions des raideurs du modèle :

$$CL = \frac{E(ITZ)/E(mortier)}{\text{épaisseur (ITZ)}} \qquad (2)$$

$$K_N = CL \times \rho_0 {C_0^P}^2;\ K_T = CL \times \rho_0 {C_0^S}^2 \qquad (3)$$

Où ρ_0, C_0^P, C_0^S sont respectivement la masse volumique et les vitesses des ondes P/S dans le mortier.

IV. QUELS RESULTATS OBTENUS ?

A. Jusqu'à maintenant

Le modèle numérique (béton avec ITZ) développé dans le cadre de ces travaux a été validé pour différents scénarios en acoustique linéaire :

- Une comparaison absolue numérique/expérimental des atténuations sur bétons sains [Ramaniraka et al., 2019].
- Une comparaison relative numérique/expérimental de l'évolution des vitesses sur des bétons endommagés thermiquement [Ramaniraka et al., 2019].
- Une comparaison absolue numérique/expérimental des diffusivités sur des bétons endommagés thermiquement [Ramaniraka et al., 2022].

En reprenant l'exemple du béton à 500kHz cité précédemment : les simulations ont donné des valeurs d'atténuations et de diffusivités identiques aux mesures expérimentales, en considérant des caractéristiques physiques « réalistes » d'ITZ à travers le paramètre *CL* du modèle.

B. Et prochainement ?

Le modèle a permis de mettre en place les bases d'un outil d'inversion paramétrique. Des travaux d'amélioration de la robustesse sont en ours, notamment :

- L'effet de la masse pourrait ne pas être négligeable pour certains types de béton : bétons « sains » mais avec une forte épaisseur d'ITZ due à la nature et la forme des granulats.
- A partir d'un certain niveau, l'endommagement (thermique ou mécanique) ne se limite plus à l'ITZ : fissuration de la matrice cimentaire, cassure des granulats, …

Il est admis que l'ITZ est à la base de la propriété non-linéaire du béton (contacts au niveau des interfaces). Des effets non-linéaires sur la diffusion des ondes ultrasonores ont été observés en

agissant sur l'amplitude de l'onde source : la diffusivité augmente avec l'amplitude. Du point de vue théorique, une forte amplitude refermerait les interfaces et diminuerait le pouvoir diffusant du milieu. Or, la diffusivité est une grandeur inversement proportionnelle au pouvoir diffusant.

Du point de vue numérique, le modèle a été utilisé pour lier ces mesures avec des caractéristiques d'ITZ (Figure 1). Les premiers résultats obtenus, réalistes, sont prometteurs.

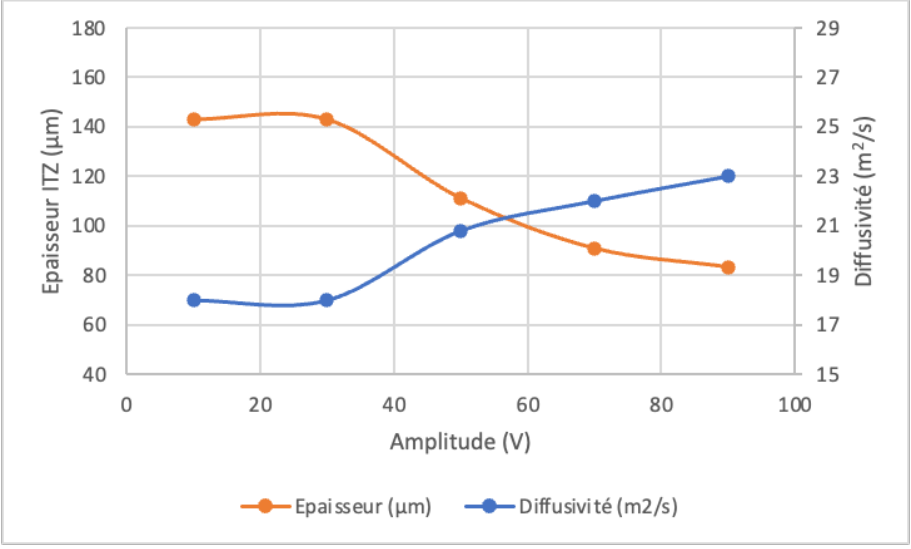

FIGURE 1. Évolution de la diffusivité ultrasonore et de l'épaisseur de l'ITZ en fonction de l'amplitude.

V. CONCLUSION

Ces travaux montrent clairement l'importance de l'ITZ dans les simulations de propagation d'ultrasons dans le béton, notamment pour les applications END. Un modèle simple de béton a été développé avec le logiciel Prospero. Il s'affranchit de la modélisation complète de la couche d'ITZ en adoptant des conditions de saut aux interfaces granulats/mortier. Il a livré des résultats probants en collant avec les mesures expérimentales de paramètres ultrasonores tels que la vitesse, l'atténuation ou encore la diffusivité. Une amélioration du modèle est en cours, en considérant des conditions extrêmes : masse non négligeable, fissuration en dehors de la couche, … mais aussi en considérant la non-linéarité du béton aux interfaces. Un premier lien diffusion multiple non-linéaire et propriétés d'ITZ a été établi. L'acoustique non-linéaire, ayant connu un fort développement, s'est en effet montré plus sensible dans les applications d'END du béton.

REFERENCES

Ramaniraka, M., Rakotonarivo, S., Payan, C., Garnier, V. (2019). Effect of the Interfacial Transition Zone on ultrasonic wave attenuation and velocity in concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 124, no. 105809. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105809

Ramaniraka, M., Rakotonarivo, S., Payan, C., Garnier, V. (2022). Effect of the Interfacial Transition Zone on diffuse ultrasound in thermally damaged concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 152, no. 106680. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106680