

ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE DE LA QUALITÉ DE L'ADHÉRENCE ENTRE DEUX BÉTONS PAR UNE NOUVELLE APPROCHE D'ANALYSE DÉVELOPPÉE DE LA MÉTHODE DE LA RÉPONSE IMPULSIONNELLE

Mihindou Mbina ^{A, B}, R. Gagné ^A, P. Masson ^B, J. Rhazi ^C, N. Quaegebeur ^B,

^A Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Université de Sherbrooke, Québec, Canada

^B Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS), Université de Sherbrooke, Québec, Canada

^C AusculTECH Inc., Sherbrooke, Québec, Canada

RÉSUMÉ : L'évaluation de la qualité de l'adhérence entre deux bétons fait souvent appel à l'utilisation des techniques dites conventionnelles, ponctuelles et destructives dont la plus utilisée est la méthode de pull-off. Les mesures ne permettent pas l'évaluation de grandes surfaces de béton et peuvent affecter l'intégrité des structures auscultées d'où l'utilisation croissante aujourd'hui des méthodes dites non destructives. De nombreux travaux réalisés ont particulièrement montré la pertinence et la sensibilité de la technique de la réponse impulsionnelle (RI) à détecter les défauts d'interface. Cependant, l'approche actuelle ne permet pas d'évaluer les caractéristiques des défauts (diamètre et profondeur) dans le cas des structures de type plaques minces. Dans cet article, nous présentons le principe de la technique de la RI, la nouvelle approche d'analyse développée basée sur l'analyse modale et sur l'étude de la RI qui vise à cartographier, localiser et à estimer les paramètres d'un défaut. Nous présenterons la méthodologie ainsi que les résultats de validation numérique et expérimentale de la nouvelle approche développée.

1. INTRODUCTION

La méthode de la RI est l'une des techniques non destructives les plus prometteuses et les mieux adaptées pour la localisation et la caractérisation de l'étendue des défauts (les fissurations, les vides, les nids-abeilles). Elle permet l'évaluation de la consolidation du béton, de la délamination du béton ainsi que l'évaluation de la perte de capacité de support des dalles, principaux facteurs qui contribuent à la perte de la rigidité précoce des dalles de béton. Les avantages de la RI sont sa simplicité, sa rapidité de sa mise en œuvre, la possibilité de faire des mesures sur de larges structures en béton et la capacité d'obtenir des résultats en temps réel.

L'analyse et l'interprétation des données reposent encore sur les lois empiriques décrites dans la norme ASTM C1740 [1]. L'approche conventionnelle est basée sur le calcul des paramètres définis à partir de la courbe de mobilité spectrale. Cette démarche reste purement empirique (Davis A. G., Dunn C.S., 1975). Cette approche ne permet pas de déterminer le diamètre des défauts avec précision, d'évaluer l'épaisseur et la profondeur des défauts. Elle ne permet pas également de dissocier, dans une courbe de mobilité spectrale, les modes propres et les fréquences propres de résonance associés à la vibration d'un défaut à

ceux associés à la vibration globale de la dalle. Ainsi, pour améliorer notre compréhension et approfondir les connaissances sur la détection, la localisation et la caractérisation des défauts d'interface à l'origine de la perte d'adhérence dans les structures en réparation ou en service, un programme de recherche original et innovant a été développé. Le programme vise à développer un outil de traitement et d'analyse fiable et efficace basé sur la technique vibratoire de la RI pour la localisation et la caractérisation de la perte de la qualité d'adhérence entre deux bétons. Le développement de l'approche de traitement des données de la RI est basé sur l'analyse modale et sur l'étude de la réponse forcée ou de la RI.

2. PRINCIPE DE LA TECHNIQUE DE LA RÉPONSE IMPULSIONNELLE (ASTM C1740-10)

La technique de la RI est basée sur l'interprétation de la réponse d'une structure sous l'effet d'une excitation par ondes mécaniques. Le principe (Figure 1) consiste à créer une vibration mécanique à la surface de la structure à ausculter à l'aide d'un marteau muni d'un capteur de force qui mesure la force d'impact appliquée et la durée de contact entre le marteau et la structure. L'excitation mécanique créée génère une onde qui se propage à travers le matériau et réfléchit sur les discontinuités, les interfaces ou sur les défauts (vides, nids d'abeille, fissures...). Un capteur de vitesse ou géophone dont la gamme de fréquences s'étend jusqu'à 2,5 kHz enregistre les vibrations à la surface du matériau.

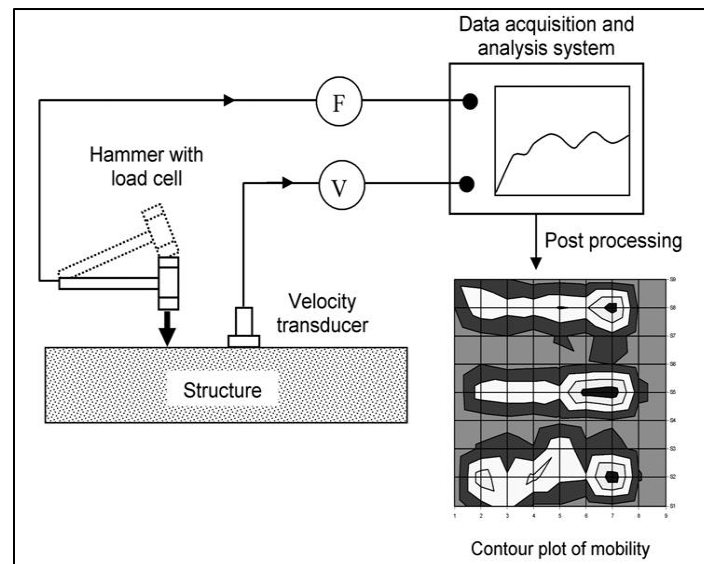


Figure 1 : Principe de la technique de la RI (ASTM C1740-10) [1].

Les signaux temporels de vitesse et de force d'impact sont amplifiés à l'aide d'un amplificateur. L'analyse des données est effectuée dans le domaine fréquentiel bien que les données de vitesses acquises peuvent aussi être analysées dans le domaine temporel comme dans le cas de la technique d'essai sonique. Pour convertir les signaux de la force d'impact et de vitesse du domaine temporel vers le domaine fréquentiel, on applique la Transformée de Fourier rapide (FFT). Le résultat du traitement consiste à représenter graphiquement la courbe de mobilité spectrale, ou courbe d'admittance (Figure 2), du matériau au point d'impact qui est la variation du rapport entre la vitesse de vibration spectrale et la force spectrale exprimée en fonction de la fréquence, généralement comprise entre 0 et 2000 Hz (Davis A. G., 1998) [3].

La mobilité est définie par l'équation 1 :

$$\frac{V_0}{F_0} = \text{mobilité} \quad (1)$$

Dans l'évaluation des structures de type plaque (dalles de chaussées, ponts...), la mobilité est un critère qui permet de mesurer la flexibilité relative des matériaux. Cette flexibilité dépend de l'épaisseur de la plaque, du module élastique du béton, de l'état du support et de la présence des défauts dans la structure. Ainsi, une forte mobilité correspond à une flexibilité du matériau relativement forte au point d'impact. L'interprétation des résultats est basée principalement sur le calcul à partir de la courbe de mobilité des paramètres suivants (Davis A. G., 2003) [4] :

- La mobilité moyenne [100 – 1000 Hz] ;
- La rigidité dynamique de la dalle [0 – 100 Hz] ;
- La pente de la mobilité [100 – 1000 Hz] ;
- Le rapport entre le pic maximal de mobilité [0 – 100 Hz] et la mobilité moyenne [100 – 1000 Hz].

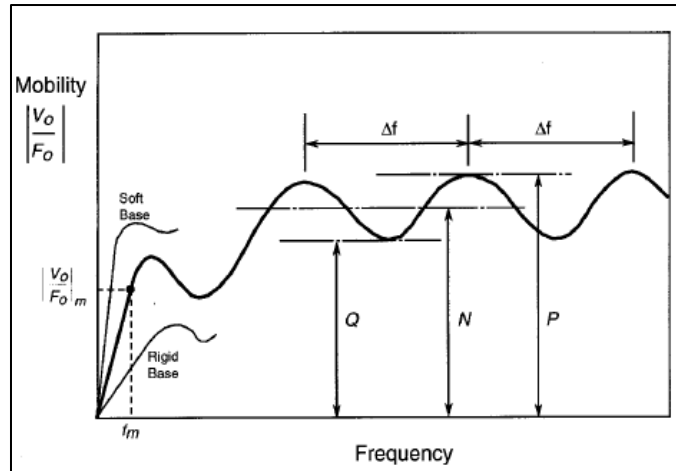


Figure 2 : Exemple de courbe théorique de la mobilité d'un pieu parfait reposant sur un sol homogène [2].

3. APPROCHE D'ANALYSE DÉVELOPPÉE

3.1. Description de l'approche d'analyse développée

En basant l'analyse sur les courbes de mobilité spectrale issues de la revue bibliographique (exemple de la courbe de mobilité de la figure 2), il a été question de savoir si, parmi les différentes fréquences de résonance de vibration obtenues sur une gamme de fréquences donnée, il était possible de déterminer et de dissocier les fréquences propres associées aux modes de vibrations globaux de la dalle et les fréquences propres qui seraient associées aux modes de vibrations locaux c'est-à-dire les modes qui concernent uniquement la vibration du défaut dans le cas de la perte de l'adhérence entre deux dalles. En partant de cette hypothèse, une approche d'analyse des données de la RI a été développée. Cette approche combine l'analyse modale et l'étude de la réponse forcée ou de la RI.

L'approche développée consiste à :

- Implanter une approche d'analyse sur Matlab à partir des données issues de chaque point de mesure de la structure ;
- Définir les paramètres d'analyse ;
- Exploiter le programme pour séparer les modes de vibrations globaux (associés à la structure) des modes locaux (associés aux défauts) afin d'extraire les déformées modales associées aux modes de résonance du défaut ;
- Élaborer les cartographies. Les résultats attendus sont les cartographies de localisation et d'estimation des paramètres des défauts des modes et des fréquences propres ;

- Estimer les paramètres des défauts (taille et profondeur). Les cartographies donnent des informations sur l'étendue des défauts. Connaissant la fréquence propre associée au premier mode de vibration des défauts, on sera en mesure d'estimer la profondeur des défauts sous l'hypothèse de vibration en flexion de plaques minces.

Si l'on considère une dalle de béton caractérisée par un défaut, les mesures de la RI sur l'ensemble de la structure sont faites point par point selon un maillage bien défini. Le traitement et l'analyse des données à travers le programme informatique sont faits selon les étapes suivantes :

- Lecture des données numériques ou expérimentales, point de mesure par point de mesure ;
- Détection des pics de mobilités sur toutes les courbes de mobilité spectrale et définition d'un seuil de détection de ces pics ;
- Regroupement des fréquences propres semblables issues de toutes les courbes de mobilité obtenues à chaque point de mesure de la structure à ausculter et définition du paramètre de résolution.
- Réalisation des cartographies des modes propres (modes globaux et locaux) et définition du paramètre d'émergence des modes propres ;
- Estimation des caractéristiques du défaut à partir des modes locaux et définition du paramètre de seuil d'affichage d'images.

Le programme d'analyse est résumé en cinq principales étapes (Figure 3).

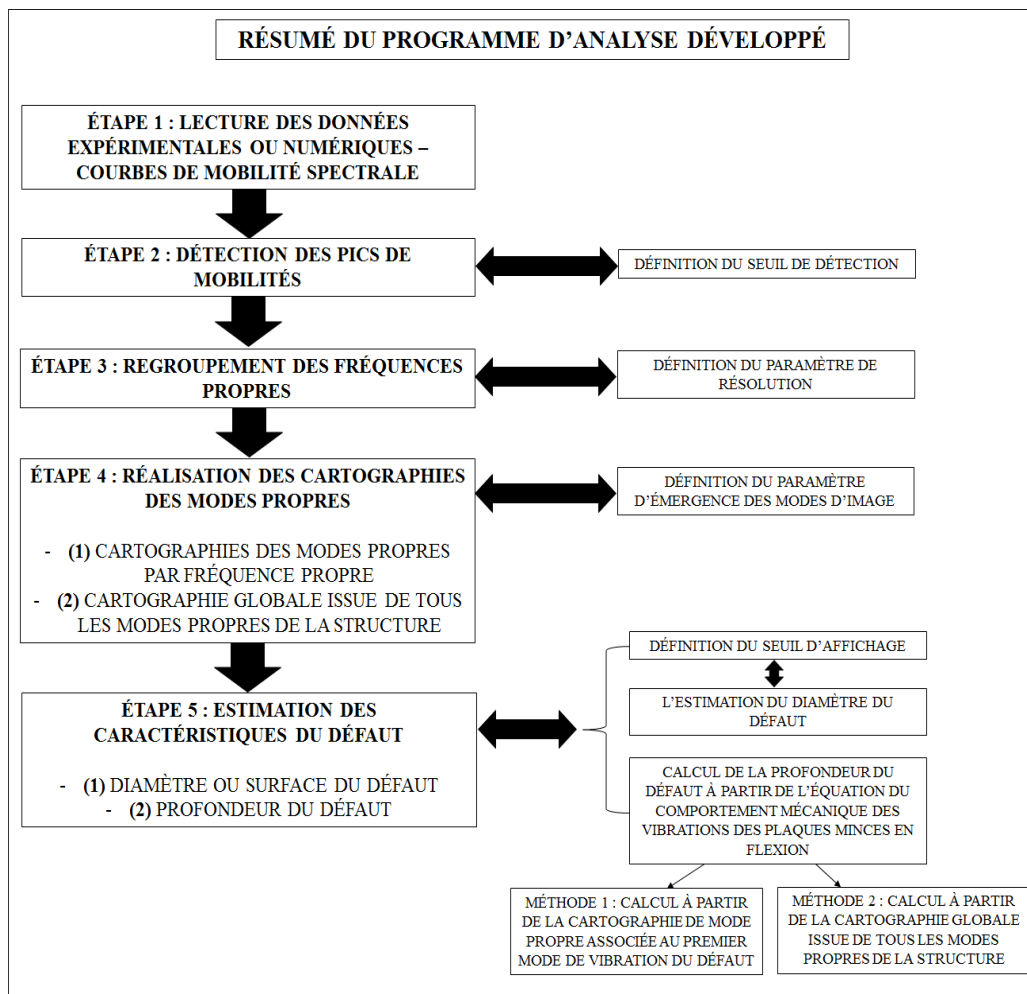


Figure 3 : Schéma de synthèse du programme d'analyse.

3.2 Évaluation des caractéristiques du défaut : Diamètre et profondeur

Pour évaluer la largeur ou le diamètre et la profondeur du défaut, nous sommes partis de l'hypothèse qu'un défaut dans une dalle (Figure 4) vibre indépendamment de l'ensemble de la dalle. La vibration du défaut serait directement associée à la vibration de l'épaisseur de la dalle située au-dessus du défaut. Cette épaisseur e_{def} constituerait donc une plaque mince à part entière.

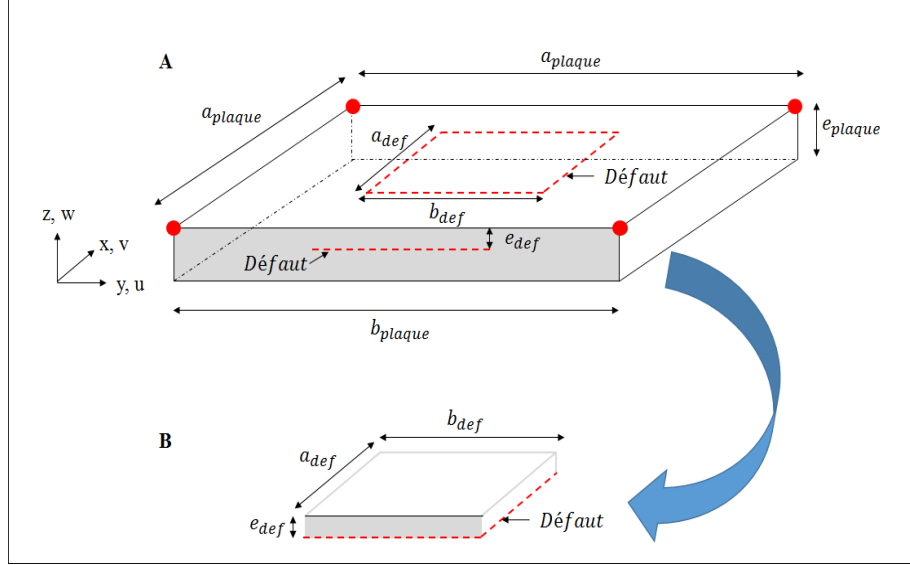


Figure 4 : A - Schématisation d'une plaque constituée d'un défaut, B – Plaque mince vibrante constituée du défaut à sa base.

Connaissant la fréquence de vibration de cette plaque mince f_{ij} , on applique l'équation fondamentale (Équation 2) de vibration mécanique pour déduire l'épaisseur ou la profondeur e_{def} de la plaque telle que :

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi A} \left[\frac{E(e_{def})^3}{12\gamma(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

On considère que les autres paramètres de la structure sont connus : le module élastique E , la densité γ , le coefficient de Poisson ν , la surface du défaut A est directement déterminée sur la cartographie.

Nous considérerons également deux cas de conditions aux limites. On supposera le cas d'une vibration en flexion d'une plaque encastree pour tous les bords et le cas d'une plaque simplement supportée sur les quatre côtés pour les plaques de forme carrée ou rectangulaire.

Considérant un modèle de plaque encastree pour un défaut donné, les bords de la plaque sont fixés, en conséquence le déplacement vertical et la rotation sont nuls. Ce cas donnerait des informations sur le calcul de la profondeur maximale du défaut, car la plaque et par conséquent le défaut vibre faiblement. C'est le cas le plus réaliste pour l'évaluation de la profondeur des défauts dans les dalles, car on suppose que les déplacements verticaux et les rotations sont nuls. Considérant un modèle de plaque simplement supportée pour un défaut donné, les déplacements verticaux et la rotation ne sont pas nuls. Ce cas donnerait des informations sur la profondeur minimale du défaut, car la plaque et par conséquent le défaut est supposé vibrer avec de fortes amplitudes.

Pour simplifier l'analyse de l'approche à développer, nous allons considérer à priori le calcul de la profondeur ou de l'épaisseur de la plaque en nous basant sur des défauts de dimensions carrées et ayant des fréquences propres correspondant au premier mode vibration du défaut c'est-à-dire les modes m (1,1) (tableau 1).

3.2.1 Évaluation de la largeur ou le diamètre du défaut ou de la surface du défaut

Le diamètre ou la surface du défaut sera directement évalué à partir des cartographies de mobilités établies correspondant à la fréquence propre associée à la vibration locale de ce défaut, en comptant simplement le nombre de pixels présents sur ces cartographies.

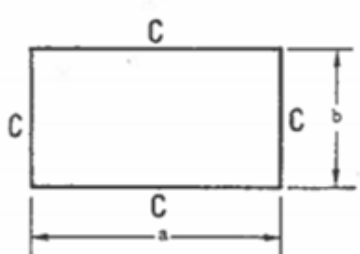
3.2.2 Évaluation de la profondeur du défaut

Connaissant la fréquence propre du défaut f_{ij} et sa surface A , on peut calculer sa profondeur e_{def} , à partir de l'équation 2. La profondeur e_{def} recherchée donc égale à l'équation 3 :

$$e_{def} = \left(\frac{(2\pi)^2 12\gamma A^2 (1 - \nu^2) f_{ij}^2}{\lambda_{ij}^4 E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Par rapport aux conditions aux frontières des plaques définies, on calcule la profondeur minimale du défaut, en supposant le cas d'une plaque encastree (Tableau 1) et sa profondeur maximale pour le cas d'une plaque simplement supportee. Si l'on considere que la plaque est une plaque de forme carree, c'est-à-dire vibrant selon le premier mode de deformation $\mathbf{m} (1,1)$, alors la valeur de $\lambda_{ij}^2 = 19,74$. Cette valeur sera utilisee pour le calcul de la profondeur dans le cas d'une plaque simplement supportee. Dans le cas d'une plaque supposee encastree, si on considere que la plaque est de forme carree, c'est-à-dire que $a = b$ vibrant selon le premier mode de deformation $\mathbf{m} (1,1)$, alors la valeur de $\lambda_{ij}^2 = 35,99$ (Tableau 1). Cette valeur sera utilisee pour le calcul de la profondeur.

Tableau 1 : Fréquences propres, cas d'une plaque encastree [5].

Natural Frequency (hertz), $f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi a^2} \left[\frac{Eh^3}{12\gamma(1 - \nu^2)} \right]^{1/2}$; $i=1,2,3,\dots$; $j=1,2,3,\dots$						
Description	λ_{ij}^2 and (ij)					
1. Clamped-Clamped - Clamped-Clamped 	Mode Sequence					
	$\frac{a}{b}$	1	2	3	4	5
	0.4	23.65 (11)	27.82 (12)	35.45 (13)	46.70 (14)	61.55 (15)
	2/3	27.01 (11)	41.72 (12)	66.14 (21)	66.55 (13)	79.85 (22)
	1.0	35.99 (11)	73.41 (21)	73.41 (12)	108.3 (22)	131.6 (31)
	1.5	60.77 (11)	93.86 (21)	148.8 (12)	149.74 (31)	179.7 (22)
	2.5	147.80 (11)	173.9 (21)	221.5 (31)	291.9 (41)	384.7 (51)
λ is independent of ν .						

4. VALIDATION NUMÉRIQUE DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE

L'étude de validation est basée sur l'analyse modale et sur l'analyse de la réponse forcée ou de la réponse impulsionnelle en utilisant un programme de modélisation par éléments afin d'identifier clairement les modes associés à la vibration globale de la dalle et ceux associés à la vibration locale du défaut.

4.1 Exploitation du modèle numérique pour la validation de l'approche développée

Considérons une dalle de béton de dimensions 4 m * 2 m * 0,2 m, de densité = 2500 kg/m³, de module élastique = 30 GPa et de coefficient de Poisson = 0,2. La dalle est caractérisée par un défaut (vide rempli d'air) de dimensions de 100 cm * 100 cm * 0,2 mm situé au centre de la dalle à une 5 cm de profondeur. La position du défaut dans la dalle est présentée par le carré rouge dans la figure 5.

4.1.1 Analyse modale

L'analyse modale a pour but, pour une structure donnée, d'étudier les différents modes propres de vibration (les modes propres locaux associés aux défauts, les modes globaux associés à la vibration globale de la dalle et ses composantes) ainsi que leurs fréquences propres. L'étude permet de montrer qu'une dalle saine ou affectée par des défauts vibre selon plusieurs modes de déformation. Après l'analyse modale par le logiciel d'éléments finis COMSOL Multiphysics, nous présentons ici quelques modes propres du modèle étudié (Figure 5). D'après les résultats de l'étude, on peut distinguer deux types de modes de vibrations, les modes globaux (Figures 5 A, B, E, F, G, I) et les modes locaux (Figures 5 C, D, H, J).

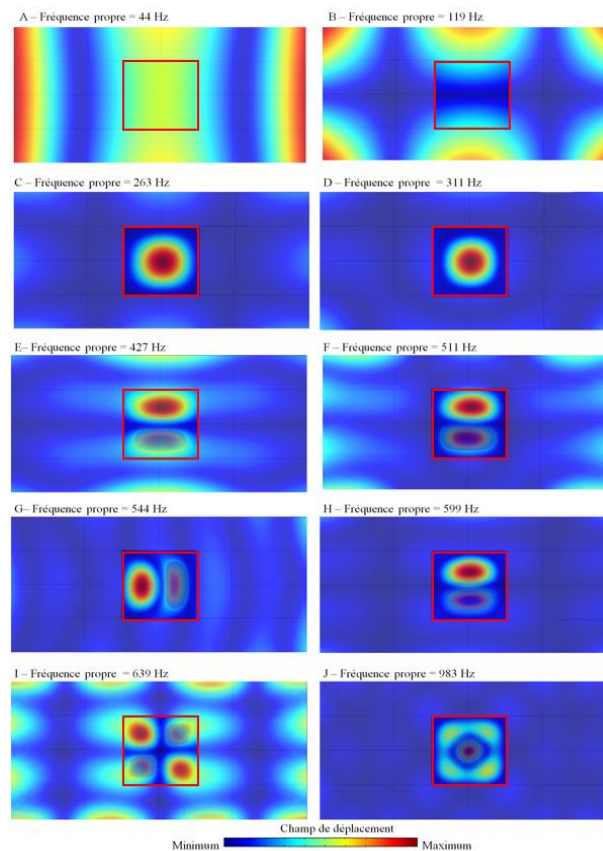


Figure 5 : Quelques modes de vibration (Analyse modale) – Modèle étudié.

Dans le cas des modes globaux, c'est toute la dalle qui vibre y compris le défaut. Par contre, dans le cas des modes locaux, seul le défaut rentre en vibration. Le champ de déplacement dans ce dernier cas est maximal uniquement dans la zone de défaut. L'étude montre également que plusieurs modes locaux peuvent vibrer en fonction de la gamme de fréquences choisie et notamment le premier mode m (1,1). Ce mode vibre à une fréquence de 263 Hz (Figure 5 C).

L'étude modale nous aide à mieux détecter et à situer la position du défaut dans la dalle. On possède également des informations sur les modes propres et les fréquences propres de vibration des défauts.

4.1.2 Étude comparative entre l'analyse modale et l'analyse de la réponse forcée

La Figure 6 présente les résultats combinés de courbe de mobilité spectrale et les cartographies des analyses modales du modèle étudié. Ces résultats ont été obtenus en considérant un impact au centre du défaut, c'est-à-dire dans la position de la plus forte amplitude de la mobilité maximale du défaut.

L'analyse de la réponse forcée des dalles a pour but de déterminer la courbe de la mobilité spectrale au point d'impact. Elle montre qu'il existe une corrélation entre les modes propres, les fréquences propres associées aux défauts obtenues par l'analyse modale et les différentes fréquences de résonance sur la courbe de mobilité spectrale. En combinant donc l'analyse modale et l'analyse de la réponse forcée, on constate qu'il existe bien une corrélation entre la fréquence propre associée au premier mode de vibration du défaut obtenue par l'analyse modale (263 Hz) et la fréquence de résonance (265 Hz) correspondant au pic de mobilité sur la courbe de mobilité spectrale obtenue par l'analyse de la réponse forcée. Cette fréquence de résonance sur la courbe de mobilité (265 Hz) correspond donc à la fréquence de résonance du défaut et donc à sa fréquence propre de premier mode de vibration. C'est ce mode qui nous intéresse.

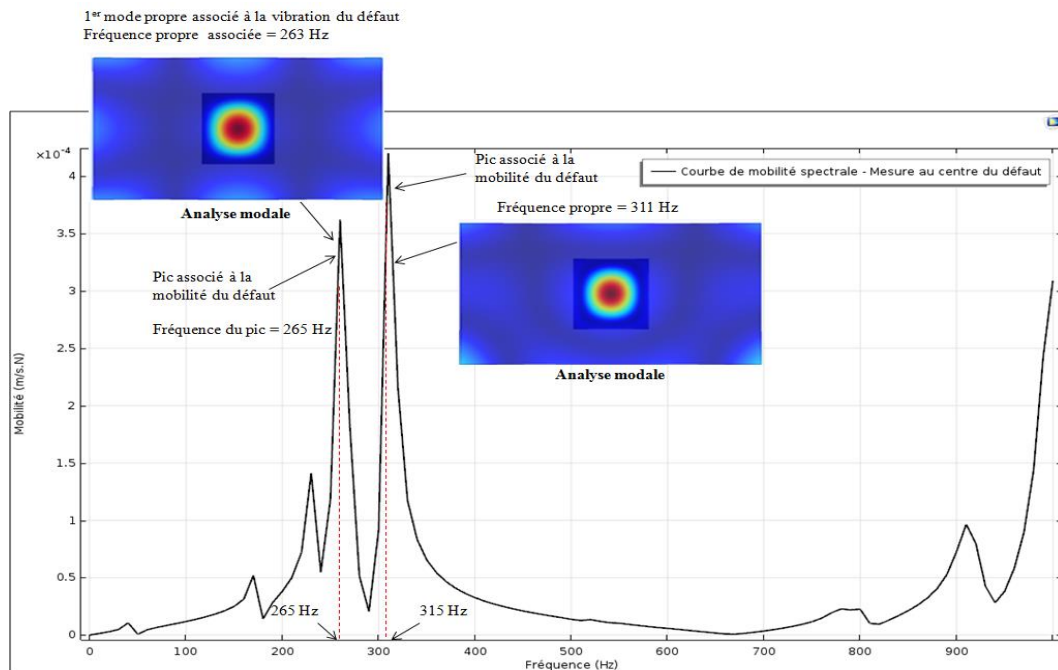


Figure 6 : Comparaison - Analyses modale et Réponse impulsionnelle (modèle étudié).

Après l'analyse des résultats, on peut tirer les conclusions suivantes : une courbe de mobilité spectrale peut être caractérisée, d'une part, par les fréquences de résonance associées à la vibration locale du défaut et d'autre part, par les fréquences de résonance associées à la vibration globale de la dalle. Ainsi, la connaissance des fréquences propres associées à la vibration des défauts dans une dalle de béton peut fournir des informations, du point de vue de la localisation et de la caractérisation des paramètres du défaut, c'est-à-dire l'évaluation de son diamètre et de sa profondeur.

4.2 Localisation et caractérisation des paramètres du défaut : Diamètre, profondeur

Une fois les paramètres d'analyse définis, l'exécution du programme d'analyse permet de fournir les cartographies des modes globaux et des modes locaux en fonction des différentes fréquences de vibration de la structure. Ce sont des cartographies de localisation et d'évaluation du diamètre du défaut (cartographies de modes globaux) ainsi que les cartographies de localisation et d'évaluation de la profondeur du défaut (cartographies de modes locaux).

4.2.1 Résultats d'analyse : Localisation du défaut

La cartographie globale de la vibration (Figure 7) ne permet pas d'évaluer la profondeur des défauts. Elle n'est pas associée à une fréquence propre de vibration mais résulte de la sommation de toutes les fréquences propres de vibration de la structure auscultée. Elle permet donc uniquement l'évaluation du diamètre du défaut. La cartographie globale augmente ainsi la résolution de localisation des défauts.

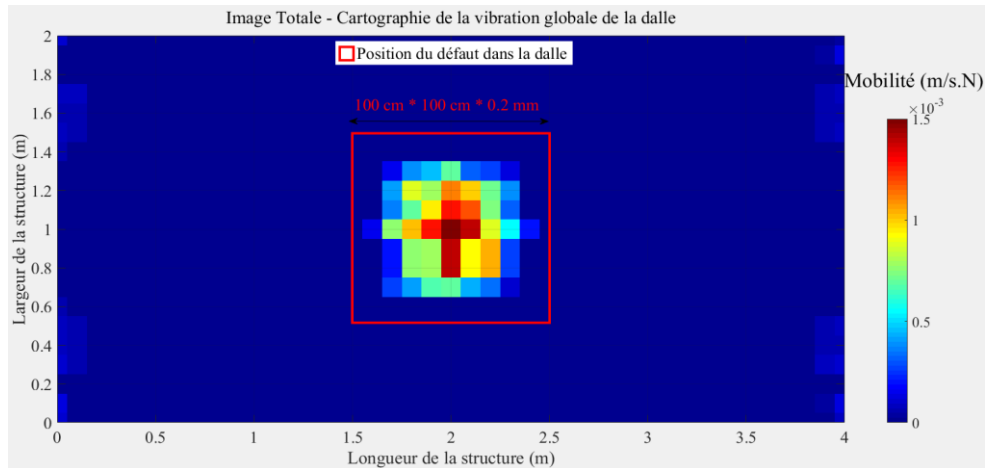


Figure 7: Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la localisation – Cartographie globale de la vibration de la dalle.

4.2.2 Résultats d'analyse : Évaluation du diamètre et de la profondeur du défaut

Le programme évalue le diamètre du défaut en comptant le nombre de pixels correspondant. Le diamètre du défaut fourni par le programme est de 70 cm * 70 cm, ce qui correspond à 70 % de représentation spatiale par rapport à la taille réelle du défaut simulé de 100 cm * 100 cm. D'après l'analyse modale, le défaut vibre à une première fréquence propre égale à 263 Hz (Figure 7). Cette fréquence est sensiblement égale à celle obtenue par l'analyse de l'approche proposée. La première fréquence propre associée à la vibration du défaut est égale à 280 Hz. L'évaluation de la profondeur se fait soit à partir de :

- La méthode 1 : Elle détermine la profondeur du défaut en se basant sur la cartographie correspondant à sa première fréquence propre de vibration. Pour une première fréquence propre du défaut égale à 280 Hz, sa profondeur est estimée entre 53 mm et 93 mm (Figure 9).
- La méthode 2 : Elle détermine la profondeur du défaut à partir des cartographies, correspond aux fréquences propres établies autour de la première fréquence propre du défaut, dont les coefficients de corrélation par rapport à la cartographie globale de vibration (Figure 7) sont élevés. Deux cartographies aux coefficients de corrélation élevés ont été établies. La Figure 8 correspondant à une fréquence propre de 210 Hz, donne une profondeur du défaut comprise entre 42 mm et 79 mm. La Figure 9 correspondant à la première fréquence propre du défaut de 280 Hz, donne une profondeur du défaut comprise entre 53 mm et 93 mm. La cartographie moyenne de ces deux cartographies correspondant à une fréquence propre moyenne de 245 Hz, donne une profondeur du défaut estimée entre 47 mm et 86 mm (Figure 10).

Grâce à un seuil de corrélation défini de préférence supérieur à 50 %, nous parvenons à obtenir des cartographies (Figures 8 à 10) ayant une corrélation forte (50% - 60 %), à plus forte (supérieure à 80 %) ou parfaite (100%) par rapport à l'image globale (Figure 7). Les cartographies aux taux de corrélation les plus élevés, permettent aux utilisateurs d'identifier facilement les cartographies correspondant au premier mode de vibration du défaut (Figures 8 et 10) ainsi que leurs fréquences propres associées à ce mode. Ces cartographies apportent donc plus de précision dans l'analyse de l'évaluation de la taille du défaut et de sa profondeur.

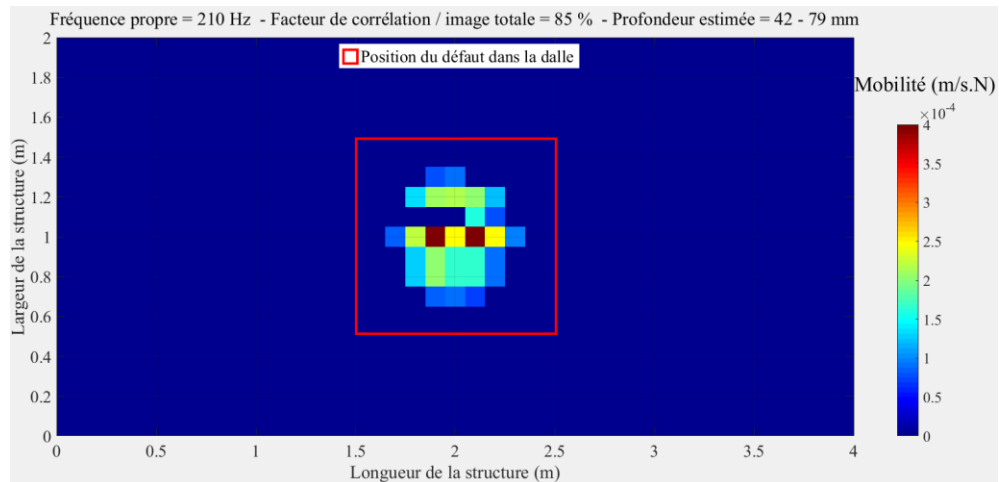


Figure 8 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 210 Hz.

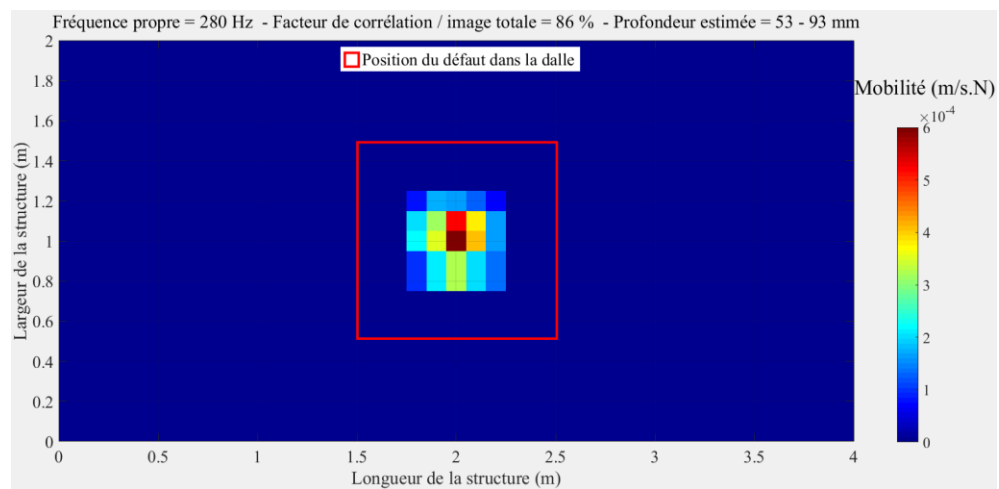


Figure 9 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 280 Hz (premier mode).

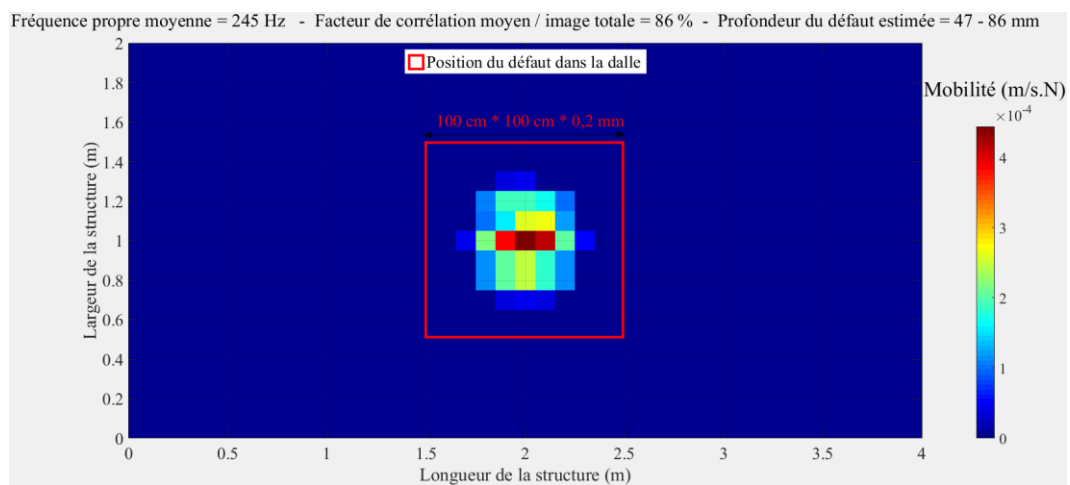


Figure 10 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation moyenne du diamètre et la profondeur du défaut à partir des cartographies des Figures 8, 9.

5. VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE

Pour la validation de l'approche, un programme expérimental a été développé. Il comporte des dalles de béton dans lesquelles des défauts de tailles variables ont été insérés pour caractériser des défauts tels que les fissurations, les vides et la délamination dans les structures en béton (plaques minces, dalles de chaussées, dalles de ponts...).

Quelques résultats des mesures expérimentales sont présentés. Ces résultats sont comparés aux résultats numériques (analyse modale et analyse de la RI), résultats obtenus par la modélisation des dalles expérimentales fabriquées. Il s'agit ici de montrer qu'il existe une corrélation entre les courbes de mobilité expérimentales et numériques. Puis, de montrer par la suite qu'il existe une corrélation entre les différentes fréquences de résonance sur ces courbes de mobilité spectrale (expérimentales et numériques) et les fréquences propres associées aux différents modes de vibration notamment les modes locaux (vibration du défaut) obtenus par l'analyse modale. Ainsi, une fois la corrélation prouvée, l'approche d'analyse développée a été appliquée aux données numériques et expérimentales afin de la valider.

Considérons une dalle de béton de dimensions de 110 cm * 110 cm * 20 cm constituée par un défaut (feuille de polythène) de dimensions de 80 cm * 80 cm * 0,19 mm placé à 5 cm de profondeur (Figure 11). Pour simuler ce défaut, le moule de 20 cm de profondeur est rempli en deux étapes. Une première couche de béton de 15 cm d'épaisseur est d'abord déposée dans le fond. La surface du béton est nivelée puis la feuille de polythène est déposée sur le béton frais. La deuxième étape consiste à combler le moule avec une couche de béton de 5 cm d'épaisseur. La feuille de polythène simulée a des propriétés mécaniques similaires à celles d'un vide rempli d'air.

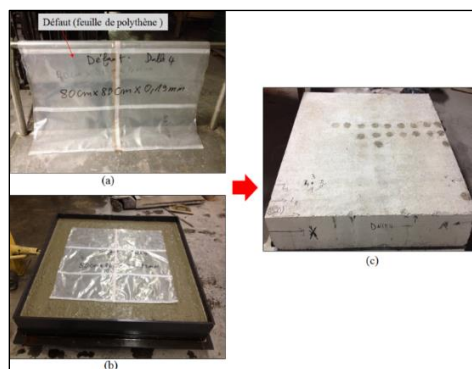


Figure 11 : Dalle expérimentale : (a) Défaut (feuille de polythène), (b) Remplissage du moule, (c) Dalle monolithique finale.

Les mesures expérimentales ont été effectuées à l'aide d'un dispositif constitué d'une source munie d'un capteur de force, d'un géophone, d'un système d'acquisition (HS4 Multichannel). Les mesures de la RI sur la dalle expérimentale sont effectuées suivant un maillage de 10 cm * 10 cm.

5.1 Courbes de mobilité spectrale expérimentales

La Figure 12 présente quelques résultats expérimentaux (courbes de mobilité spectrale) issus des points de mesure le long d'une ligne traversant la zone du défaut. D'après les courbes de mobilité obtenues, on note une nette différence de mobilité entre les points de mesure sur les zones hors de défaut (faible mobilité observée sur les points P1, P2, P11, P12), et les points de mesure situés dans la zone de défaut (forte mobilité observée sur les points P5, P6, P7, P8). En observant les courbes, on identifie l'une des fréquences de résonance (435 Hz) associée au mode de vibration du défaut (Figure 12). Les autres fréquences de résonance sont donc associées à la vibration d'autres modes locaux (modes, 2, 3...) du défaut ou aux modes globaux de la dalle. Pour avoir plus d'information sur la nature des modes et leurs fréquences propres fournis par les courbes de mobilité, une étude numérique (analyse mode et RI) de la dalle a été réalisée. Les résultats numériques sont présentés aux paragraphes suivants.

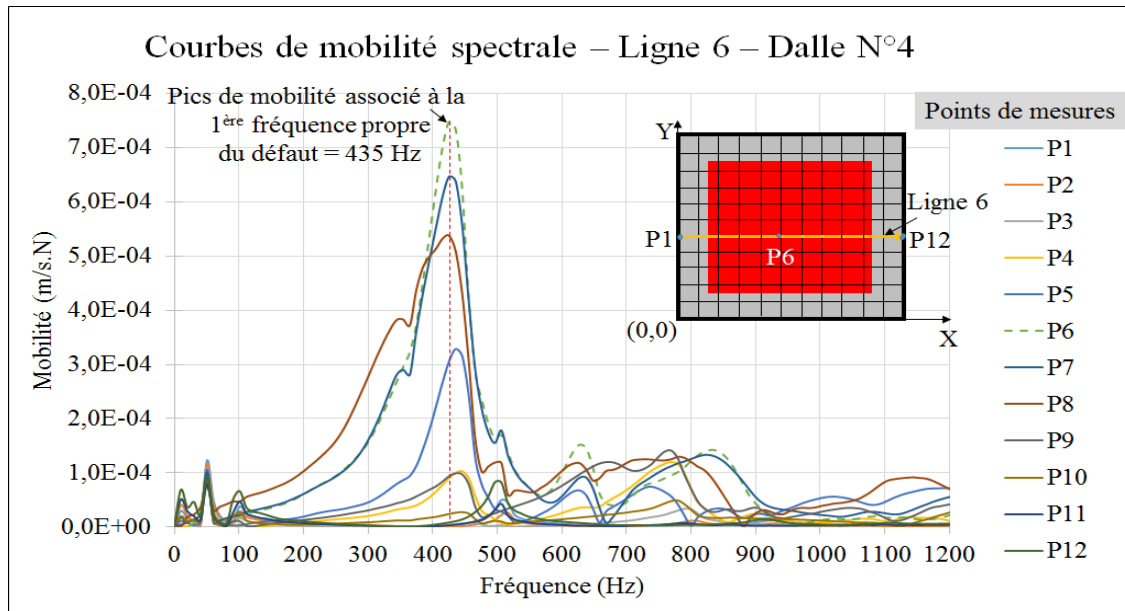


Figure 12 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale – Dalle expérimentale.

5.2 Résultats : Validation du modèle numérique par l'approche expérimentale

La Figure 13 représente les résultats de l'étude comparative entre l'analyse modale, les courbes de mobilité spectrale expérimentale et numérique obtenues en faisant vibrer la dalle en son centre. Les courbes de mobilité expérimentale et numérique se corrélient de façon satisfaisante. L'analyse modale (cartographie à droite de la Figure 13) montre que seul le défaut placé au centre de la dalle vibre (vibration ou déplacement maximal représenté par la couleur en rouge) à la fréquence propre de 445 Hz tandis que pour le reste de la dalle le déplacement est nul (couleur en bleu sur la cartographie de l'étude modale). Le mode de vibration associé à cette fréquence propre est le premier mode (1,1). Cette fréquence propre est proche des fréquences de résonance fournies par les courbes de mobilité spectrale expérimentale et numérique respectivement de 435 Hz et 450 Hz.

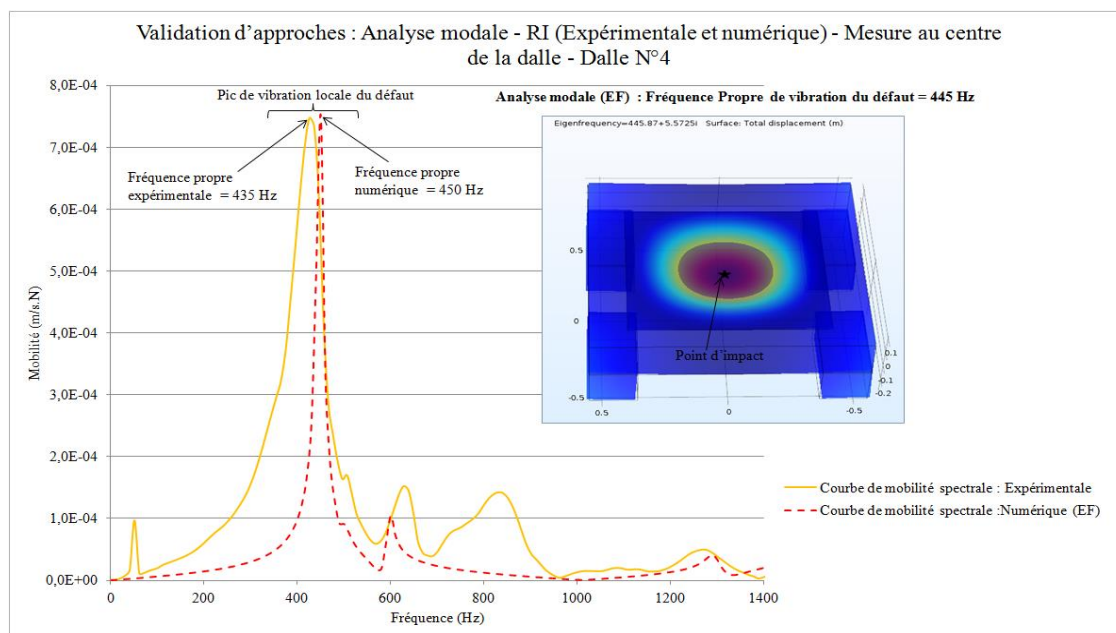


Figure 13 : Validation d'approches : Analyse modale – RI (Expérimentale et numérique) – Mesure au centre de la dalle – Dalle expérimentale.

5.3 Validation de l'approche développée – Résultats expérimentaux et numériques

5.3.1 Résultats d'analyse : Cartographies pour la localisation du défaut

La Figure 14 présente la cartographie de mobilités numériques de la vibration globale issue des données numériques de la dalle expérimentale. La Figure 15 présente la cartographie de mobilité expérimentale de la vibration globale issue des données expérimentales de la dalle étudiée. C'est la cartographie globale de vibration de la dalle. Les cartographies de localisation numérique et expérimentale (Figures 14, 15) obtenues à partir de l'approche développée sont proches. Le défaut est bien localisé.

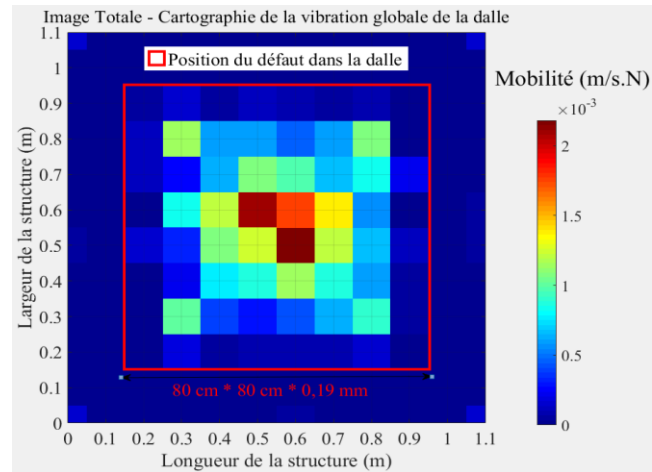


Figure 14 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la localisation – Fréquence propre de vibration de 480 Hz – Approche numérique.

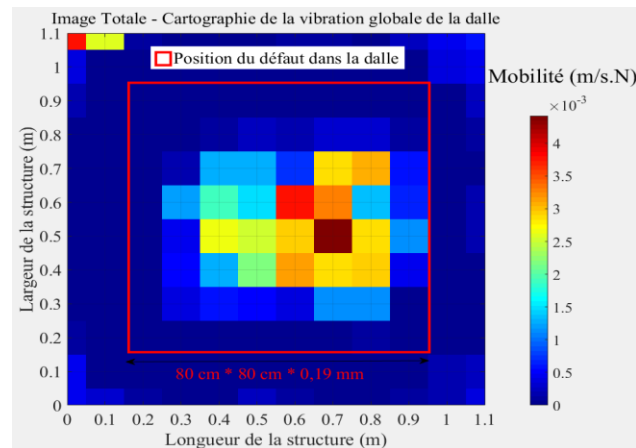


Figure 15 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la localisation – Approche expérimentale.

5.3.2 Résultats d'analyse : Localisation et évaluation de la profondeur du défaut

La Figure 16 présente la cartographie de mobilité numérique de la vibration locale du défaut. La fréquence de vibration du défaut correspondant au premier mode de vibration est de 450 Hz. En appliquant ainsi la formule mathématique de la vibration des plaques minces, et en utilisant le diamètre du défaut estimé par l'approche développée, on obtient une profondeur du défaut estimée entre 52 mm (profondeur minimale) et 83 mm (profondeur maximale). La profondeur moyenne estimée est égale à 68 mm. Ce qui paraît réaliste, car le défaut a été placé à 50 mm de profondeur.

La Figure 17 présente la cartographie de mobilité expérimentale de la vibration locale du défaut. La fréquence de vibration du défaut correspondant au premier mode de vibration est de 432 Hz. En appliquant la formule mathématique de la vibration des plaques minces et en utilisant le diamètre du défaut estimé par l'approche développée, on obtient une profondeur du défaut estimée entre 41 mm (profondeur minimale) et 65 mm (profondeur maximale). La profondeur moyenne estimée est égale à 53 mm. Ce qui paraît réaliste, car le défaut a été placé à 50 mm de profondeur.

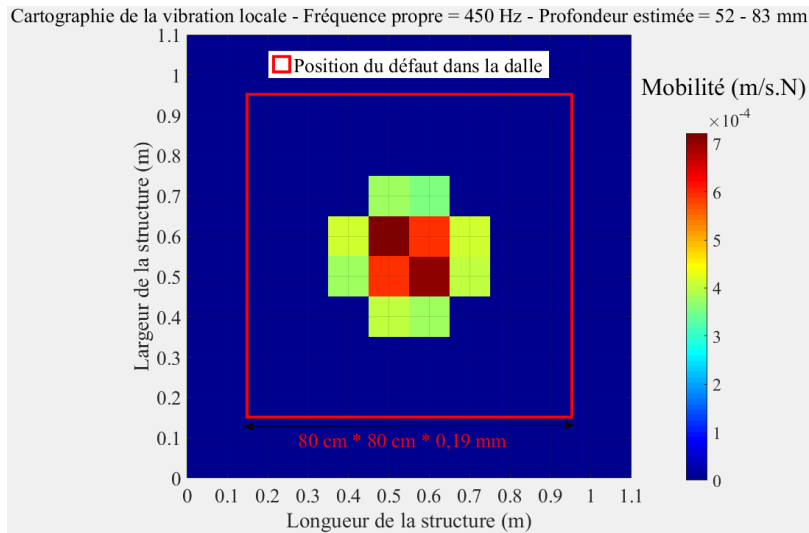


Figure 16 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 450 Hz – Approche numérique.

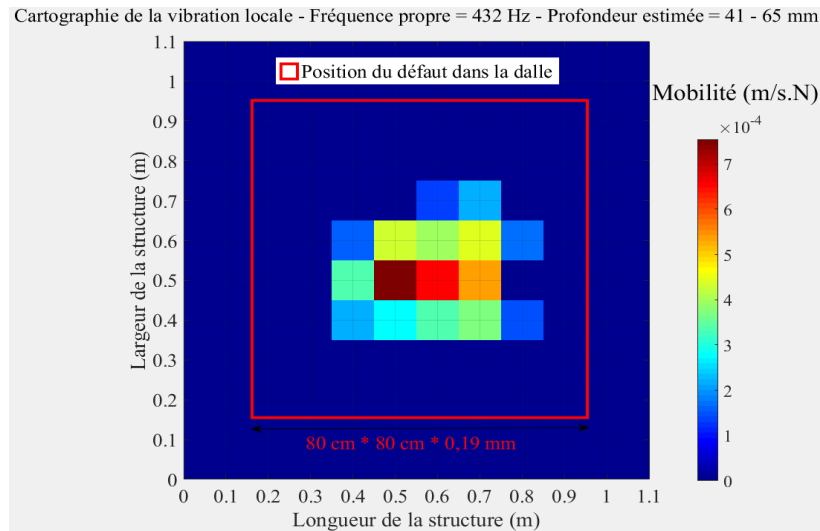


Figure 17 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 432 Hz – Approche expérimentale.

Les résultats expérimentaux et les résultats numériques concordent de façon satisfaisante. Les courbes de mobilité spectrale numérique corrélient bien avec les courbes de mobilité expérimentale. Les fréquences de résonance sur les courbes de mobilité des dalles avec défaut correspondent aux modes de vibration associés au défaut (mode local) et aux modes de vibration associés à la vibration d'autres composantes de la dalle. Ces fréquences de résonance ont été ainsi validées par l'étude modale. Les résultats expérimentaux valident bien les résultats numériques.

6 CONCLUSION

La méthode de la Réponse Impulsionnelle vibratoire aux basses fréquences [0 - 1000 Hz] est l'une des techniques non destructives parmi les plus prometteuses et la mieux adaptée pour la localisation et la caractérisation de l'étendue des défauts (les microfissurations, les vides, les nids d'abeille). Cependant, l'approche de traitement fournie par la méthode de la RI conventionnelle ne permet pas de déterminer la taille ou l'épaisseur des défauts et d'en évaluer la profondeur dans le cas des plaques minces (dalles des tabliers de ponts ou de chaussées ...).

Nous avons proposé une autre approche de traitement et d'analyse des données de la RI. Une approche dont l'originalité repose sur la localisation et surtout sur la caractérisation des défauts à l'origine des décollements dans les structures de dalles minces. L'approche innovante proposée est une combinaison de l'analyse modale et l'étude de la réponse forcée ou de la réponse impulsionnelle. L'analyse modale par éléments finis (Comsol MultiPhysics) a permis de montrer que, pour une dalle de béton en vibration avec un défaut :

- Il existe des modes locaux et des modes globaux associés à des fréquences propres de vibration respectives ;
- Les modes de vibration locaux sont associés à la vibration locale du défaut ;
- Les modes de vibration globaux sont associés à la vibration de l'ensemble de la structure (dalle, poutres, défauts ...) ;
- En combinant les études modales et RI, nous avons montré qu'il existait une corrélation entre les deux études : les résultats obtenus à partir des modèles numériques ;
- Les fréquences de résonance sur la courbe de mobilité correspondent aux fréquences propres de vibration (locales et globales) ;
- Les différents modes propres (mode 1, 2...) ainsi que leurs fréquences propres de vibration du défaut sont détectables.

7 REMERCIEMENTS

Les auteurs reconnaissent le support technique et financier du Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologies (FRQNT), du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et Génie du Canada (CRSNG) et de l'entreprise AusculTECH Inc., pour la réalisation de ce projet de recherche.

8 RÉFÉRENCES

- [1] ASTM C1740 (10), Standard Practice for Evaluating the Condition of Concrete Plates Using the Impulse Response.
- [2] Davis A.G., Dunn C.S., «From theory to field experience with the non-destructive vibration testing of piles», Proceedings Part 2, 1975.
- [3] Davis A. G., « Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures », 1998.
- [4] Davis A.G., « *The nondestructive impulse response test in North America: 1985 – 2001* », *NDT&E International*, 36 185 – 193, 2003.
- [5] Meirovitch, L., « Analytical methods in vibration », MacMillan Publishing, 1967.