



HAL
open science

Diagnostic d'ouvrages en maçonneries : Méthodes Soniques Impact-Echo

Hajer Rezgui Chaabouni

► **To cite this version:**

Hajer Rezgui Chaabouni. Diagnostic d'ouvrages en maçonneries : Méthodes Soniques Impact-Echo. Génie civil. Université de Limoges, 2020. Français. NNT : 2020LIMO0060 . tel-03101755

HAL Id: tel-03101755

<https://theses.hal.science/tel-03101755>

Submitted on 7 Jan 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Limoges

ED 609 - Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique (SIMME)

GC2D Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité

Thèse pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Limoges

Génie Civil

Présentée et soutenue par

Hajer REZGUI CHAABOUNI

Le 26 novembre 2020

**Diagnostic d'ouvrages maçonnés :
Méthodes Soniques
Impact-Echo**

Thèse dirigée par Sylvie YOTTE

JURY :

Sofiane AMZIANE
Beatriz MENENDEZ
Pierre BREUL
Kevin BECK
Mokhfi TAKARLI
Sylvie YOTTE

Professeur, Université Clermont Auvergne
Maitre de Conférences HDR, Université Cergy-Paris
Professeur, Université Clermont Auvergne
Maitre de Conférences, HDR, Polytech Orléans
Maitre de Conférences, Université de Limoges
Professeur, Université de Limoges

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Co-Encadrant
Directrice

Je dédie ce travail à mon époux **Mohamed Mehdi Chaabouni..**

Whenever you find yourself on the side of the majority, it is time to pause and reflect.

Mark Twain

Remerciements

Pour leurs contributions à l'aboutissement de ces travaux de recherche je souhaite remercier :

- Ma directrice de thèse, Sylvie Yotte, Professeur de l'Université de Limoges, pour la confiance qu'elle m'a accordée, pour tout le temps qu'elle a pu consacrer au suivi de ces travaux. Les nombreuses discussions que nous avons eues ainsi que sa capacité d'analyse et sa vision optimiste à l'égard de ce sujet y sont pour beaucoup dans le résultat final de ce travail,
- Mokhfi Tkarali, Maître de Conférences de l'Université de Limoges, pour avoir Co-encadré ces travaux de thèse,
- Sofiane AMZIANE, Professeur de l'Université de Clermont Auvergne pour avoir accepté de présider mon jury de thèse. Beatriz MENENDEZ, Maître de Conférences-HDR de l'Université de Cergy-Paris et Pierre BREUL, Professeur de l'Université de Clermont Auvergne pour d'avoir accepté de relire cette thèse et pour l'intérêt qu'ils ont porté au travail réalisé. Et Kevin BECK, Maître de conférences-HDR, de Polytech Orléans pour avoir bien voulu examiner mon travail.
- L'ensemble des membres du centre universitaire de génie civil et l'équipe du laboratoire de Génie Civil Développement et Durabilité (GC2D) à savoir Hamidou Sebbah pour les compétences qu'il a apporté en traitement de signal et en programmation ; Rémi Tautou, pour ses conseils et ses connaissances Cast3m ; Jérôme Dopeux et Mickael Métrope pour leurs contributions à un environnement expérimentale propice,
- Ema Pop et Cynthia Cherpin pour tous nos échanges matinaux, pour leurs présences et leurs mots encourageant dans les moments difficiles,
- Mes collègues doctorants, ceux qui sont partie et ceux qui sont encore là, pour la bonne ambiance de travail mais également pour les nombreux moments passés ensemble et en particulier les pauses café,
- Mes parents Mohamed Ali Rezgui et Basma Lamouchi, qui ont suivi de très près le déroulement de ces travaux de thèse et pour tous les échanges scientifiques qu'on a pu avoir et pour leurs disponibilités inconditionnelles,
- Enfin, je souhaite remercier mon époux Mohamed Mehdi Chaabouni, pour sa patience, sa compréhension tout au long de ces années et surtout pour m'avoir sans cesse encouragée et soutenue surtout dans les moments difficiles.

Droits d'auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :

« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »

disponible en ligne : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>



Table des matières

Remerciements	4
Droits d'auteurs	5
Table des matières	7
Table des figures	10
Table des tableaux	16
Introduction générale.....	20
Contexte	20
Problématique.....	21
Objectif.....	22
Structure de la thèse.....	23
Chapitre I. Etat de l'art.....	24
Introduction	24
I.1. Généralités autour des ponts en maçonnerie	25
I.1.1. Morphologie d'un pont en maçonnerie	25
I.2. Pathologies des ponts en maçonnerie	32
I.2.1. Les désordres visibles	33
I.2.2. Les désordres non visibles	34
I.3. Méthodes d'auscultation des ouvrages.....	35
I.3.1. Les contrôles destructifs (CD)	36
I.3.2. Les contrôles semi-destructifs (CSD)	36
I.3.3. Les contrôles non destructifs (CND).....	36
I.4. Les contrôles non destructifs et leurs applications.....	39
I.4.1. Les méthodes soniques et ultrasoniques.....	39
I.4.2. Méthodes électromagnétiques.....	41
I.4.3. Les méthodes électriques	42
I.4.4. Conclusion sur les contrôles non destructifs	42
I.5. Les méthodes soniques.....	45
I.5.1. Principes théoriques.....	45
I.5.2. Comportement des ondes aux interfaces	49
I.5.3. Divergence et Atténuation.....	50
I.5.4. Génération et réception des ondes mécaniques	50
I.5.5. Conclusion sur les méthodes soniques	53
I.6. La méthode Impact-Echo	54
I.6.1. Introduction.....	54
I.6.2. Principe de fonctionnement de la méthode Impact-Echo	55
I.6.3. Applications de l'impact-Echo.....	61
I.6.4. Conclusion	70
Chapitre II. Simulation numérique	72

II.1. Introduction.....	72
II.2. Simulation par Elément Finis.....	74
II.2.1. Hypothèses de calculs.....	74
II.2.2. Types d'éléments.....	75
II.2.3. Discrétisations spatio-temporelles.....	76
II.2.4. La géométrie.....	77
II.2.5. Les matériaux.....	79
II.2.6. Chargement et mesures.....	79
II.2.7. Frontières absorbantes.....	81
II.2.8. Notion d'amortissement.....	83
II.2.9. Conditions aux limites.....	88
II.2.10. Algorithme implicite vs explicite.....	91
II.3. Premiers résultats.....	92
II.3.1. Comportement d'une plaque monocouche.....	93
II.3.2. Comportement d'une plaque bicouche saine.....	99
II.3.3. Comportement d'une plaque bicouche contenant un défaut.....	119
II.4. Conclusion.....	133
Chapitre III. Plan d'expériences numériques.....	134
III.1. Introduction.....	134
III.2. Généralités sur les plans d'expériences.....	136
III.3. Plan d'expériences : Facteurs d'entrée.....	137
III.3.1. Coefficient de réflexion R	137
III.3.2. Epaisseur de la première couche e_1	139
III.3.3. Profondeur du défaut d	140
III.3.4. Coefficient d'amortissement ξ	141
III.3.5. Conclusion sur les facteurs d'entrée.....	141
III.4. Plan d'expériences : Variables de sortie.....	143
III.4.1. Variables de sortie : Domaine temporel.....	143
III.4.2. Variables de sorties : Domaine fréquentiel.....	144
III.5. Analyse du plan d'expériences factoriel numériques.....	146
III.5.1. Analyse de la variance.....	147
III.5.2. Exploitation de la réponse temporelle.....	149
III.5.3. Exploitation de la réponse fréquentielle.....	155
III.5.4. Conclusion.....	158
III.6. Interprétation de l'essai Impact-Echo.....	158
III.6.1. Facteurs d'entrée.....	158
III.6.1.1. Epaisseur de la première couche e_1	160
III.6.2. Vérification sur les simulations du Chapitre II.....	169
III.7. Conclusion et discussion.....	171
Chapitre IV. Approche expérimentale.....	173
IV.1. Introduction.....	173
IV.2. Géométrie de la structure.....	174
IV.3. Caractérisation de la première couche de la structure.....	175
IV.3.1. Mesure de la vitesse de propagation des ondes dans les éprouvettes.....	176

IV.3.2. Essais de compression mécanique sur les éprouvettes.....	178
IV.3.3. Mesure de la vitesse de propagation des ondes dans la structure en béton	179
IV.3.4. Détermination de l'épaisseur des murs de la structure avec l'Impact-Echo	180
IV.3.5. Validation de la simulation pour la première couche de la structure	183
IV.4. Caractérisation de la couche de sol.....	184
IV.4.1. Essai Proctor	184
IV.4.2. Mesure de la vitesse de propagation des ondes dans les éprouvettes de sol.....	184
IV.5. Etude de la propagation des ondes dans un bicouche (béton/sol)	186
IV.5.1. Pundit bicouche	187
IV.5.2. Impact-Echo.....	188
IV.6. Caractérisation de la Brique en terre crue.....	190
IV.7. Etude de la propagation des ondes dans un bicouche (béton/brique)	193
IV.7.1. Pundit bicouche	193
IV.7.2. Impact-Echo.....	193
IV.8. Discussion	197
IV.8.1. Normalisation des données expérimentale	197
IV.8.2. Détermination des facteurs d'entrée $e1$ et R	203
IV.8.3. Interprétation des résultats	206
IV.9. Conclusion.....	206
Conclusion et perspectives.....	208
Notations	211
Références bibliographiques	212

Table des figures

Figure 1. (a) Répartition des ouvrages sur le réseau ferroviaire européen. (b) Types de maçonnerie sur le réseau ferroviaire européen.....	21
Figure 2. (a) Age des ponts en maçonnerie sur le réseau ferroviaire européen (b) Etat des ponts en maçonnerie sur le réseau ferroviaire Européen.....	21
Figure 3. Terminologie relative aux ponts en maçonnerie (SETRA, 1996).....	26
Figure 4. Coupe d'une voûte de pont en maçonnerie (Image internet)	26
Figure 5. Elégissements longitudinaux des voûtes (Proske and Gelder, 2009).....	27
Figure 6. Types de voûtes surhaussées et surbaissées.....	27
Figure 7. Différents types d'appareillage de la maçonnerie (Stablon, 2011).....	28
Figure 8. (a) Appareil en panneresse (b) l'appareil à la française (c) Appareil en boutisse (d) Appareil sur chant (Image internet).....	30
Figure 9. Caractéristiques des briques (Delbecq, 1982).....	30
Figure 10. Typologie des joints (Stablon, 2011).....	31
Figure 11. Cycle de la chaux aérienne.....	32
Figure 12. Figure en trois dimensions éclatée d'un pont en maçonnerie (SETRA, 1996)	35
Figure 13. Classification des méthodes soniques en fonction de la longueur d'onde λ et de et de l'épaisseur d	39
Figure 14. Schéma de principe de propagation des ondes de volumes (a) Onde P (b) Onde S (Kearey et al., 2002).....	47
Figure 15. Schéma de principe de propagation l'onde de Rayleigh (Mouton et al., 2007)	47
Figure 16. Différentes ondes mécaniques générées suite à un impact sur la surface d'une plaque en béton.....	48
Figure 17. Configuration directe	52
Figure 18. Configuration semi-directe.....	53
Figure 19. Configuration indirecte.....	53
Figure 20. Schéma de la méthode Impact-Echo (Carino, 2015)	56
Figure 21. Différents chargements pouvant correspondre à un impact d'une sphère sur un solide (a) Domaine temporel. (b) Domaine fréquentiel.....	58
Figure 22. Spectre d'amplitude correspondant à la partie exploitable pour l'interprétation	58
Figure 23. Disposition d'un essai Impact-Echo.....	59
Figure 24. La zone de Fresnel pour une onde sphérique qui se propage dans un milieu à une vitesse VP (Mari et al., 2001)	63
Figure 25. Influence de la taille du défaut sur la réponse d'Impact-Echo (Carino, 2015)	64

Figure 26 .Comparaison d'une réponse d'un essai Impact-Echo pour une plaque solide saine (a, b, c) et une plaque solide contenant des défauts (d, e ,f) (Sansalone et Streett, 1997)	65
Figure 27. Comparaison de la réponse d'un essai Impact-Echo d'une plaque solide (a, b, c) sans défaut et (d, e, f) avec défaut (Sansalone and Streett, 1997)	67
Figure 28. Réponse d'un essai Impact-Echo d'une plaque contenant une délamination (a, b) et d'une plaque contenant un défaut (c, d) (Sansalone et Streett, 1997)	68
Figure 29 .Spectres de fréquences obtenus en fonction de la zone non liée à l'interface dans une plaque en béton avec un revêtement en béton : (a) 0%, (b) 20%, (c) 50%, (d) 80%, (e) 100% (Sansalone et Streett, 1997)	69
Figure 30. Structure d'un pont en maçonnerie	70
Figure 31. Eléments de maillage parallélépipédiques CUB8.....	76
Figure 32. (a) Un cycle d'onde sinusoïdale (b), (c) et (d) sont des représentations numérisées avec respectivement 3,5 et 10 échantillons par longueur d'onde	77
Figure 33. Maillage de structure sous forme de plaque (a) Plaque monocouche (b) Plaque bicouche.....	78
Figure 34. Un essai Impact-Echo sur une barre rectangulaire.....	78
Figure 35. Chargement sous forme de demi-sinus carré au pont d'impact. (a) Chargement en fonction de temps (b) Spectre de fréquence correspondant au chargement.....	80
Figure 36. Schématisation du point de chargement et des différents points de mesures de la simulation	81
Figure 37. Vue de haut de l'implémentation des frontières absorbantes sur les bords latéraux d'un maillage Cast3M©	83
Figure 38. Représentation schématique du modèle de Kelvin–Voigt	85
Figure 39. Evolution de l'amortissement réduit en fonction de la pulsation pour le modèle d'amortissement de Rayleigh (Combescure, 2006).....	86
Figure 40. Amortissement hystérétique (Combescure, 2006).....	87
Figure 41. Conditions aux limites pour une structure sous forme de plaque monocouche (a) CL1 : Blocage des déplacements de la surface inférieure (b) CL2 : Blocage des déplacements en trois points.....	88
Figure 42. Réponse de la simulation d'une structure sous forme de plaque monocouche pour les conditions aux limites CL1 et CL2 dans le domaine fréquentiel – en médaillon le même graphique en utilisant la même échelle pour les deux amplitudes	89
Figure 43. Réponse de la simulation d'une structure sous forme de plaque monocouche pour les conditions aux limites CL1 et CL2 dans le domaine temporel.....	90
Figure 44. Conditions aux limites pour une structure sous forme de plaque bicouche CL1 : Blocage des déplacements de la surface inférieure (b) CL2 : Blocage des déplacements en trois points.....	91
Figure 45. Réponse de la simulation d'une structure sous forme de plaque bicouche pour les conditions aux limites CL1 et CL2 dans le domaine fréquentiel.....	91

Figure 46. Maillage d'une plaque monocouche d'épaisseur $e1$ simulé sur Cast3M©.....	94
Figure 47. MSDs obtenues à partir des simulation 1 et 2.....	95
Figure 48. MSDs obtenues à partir des simulation 3 et 4.....	96
Figure 49. Représentation de l'estimation de l'épaisseur $e1lin$ en fonction du rapport de la vitesse $VP1$ et la fréquence f pour les simulations des plaques monocouches	97
Figure 50. Maillage d'une plaque bicouche simulée sur Cast3M©.....	100
Figure 51. Superposition des MSDs obtenues à partir de la simulation 1 sur la plaque monocouche et la simulation 1 sur plaque bicouche	101
Figure 52. Superposition des MSDs obtenues à partir de la simulation 1 sur la plaque monocouche et de la simulation 2 sur plaque bicouche.....	103
Figure 53. Superposition des MSDs obtenues à partir de la simulation 1 et de la simulation 2 sur des plaques bicouches.....	103
Figure 54. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 2 sur la plaque monocouche et de la simulation 3 sur plaque bicouche.....	104
Figure 55. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 2 sur la plaque monocouche et de la simulation 4 sur plaque bicouche.....	105
Figure 56. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 3 et 4 sur des plaques bicouches.....	106
Figure 57. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 3 sur la plaque monocouche et 5 sur plaque bicouche.....	107
Figure 58. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 3 sur la plaque monocouche et 6 sur plaque bicouche.....	107
Figure 59. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulation 5 et simulation 6 sur des plaques bicouches.....	108
Figure 60. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 4 sur la plaque monocouche et 7 sur plaque bicouche.....	109
Figure 61. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 4 sur la plaque monocouche et 8 sur plaque bicouche.....	109
Figure 62. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 7 et 8 sur des plaques bicouches	110
Figure 63. Récapitulatif des MSDs obtenues à partir des simulations réalisées sur des structures sous forme de bicouches saines	111
Figure 64. Représentation de l'estimation de la profondeur $e1lin$ en fonction du rapport de la vitesse $VP1$ et la fréquence f pour les simulations des plaques bicouches.....	113
Figure 65. Représentation de l'estimation du logarithme népérien de l'amplitude lnA des pics en fonction de la profondeur P pour les simulations des plaques bicouches.....	114
Figure 66. Représentation de l'estimation de la profondeur $e1lin$ en fonction du rapport de la vitesse $VP1$ et la fréquence f pour les simulations des plaques bicouches.....	117

Figure 67. Géométrie de la structure bicouche contenant un défaut, simulée sur Cast3M©	119
Figure 68. Dimensions du défaut intégrées dans la simulation	120
Figure 69. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 1 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut	121
Figure 70. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 2 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut	122
Figure 71. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 3 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut	123
Figure 72. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 4 d'une structure bicouche saine et une simulation contenant un défaut	124
Figure 73. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 5 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut	125
Figure 74. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 6 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut	126
Figure 75. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 7 d'une structure bicouche saine et une simulation contenant un défaut	127
Figure 76. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 8 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut	128
Figure 77. Représentation de l'estimation de la profondeur de l'interface e_1 en fonction du rapport de la vitesse VP_1 et la fréquence f pour les simulations des différentes configurations	131
Figure 78. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut (Goupy, 2006).....	136
Figure 79. Parcours d'une onde générée par impact dans une structure composée de deux couches en mettant en évidence les phénomènes de réflexion et de réfraction	139
Figure 80. Coupe longitudinale de la géométrie d'épaisseur e_1 simulée sur Cast3M©	140
Figure 81. Coupe longitudinale de la géométrie simulée sur Cast3M© contenant le défaut à une profondeur d de l'interface	141
Figure 82. Représentation des variables de sortie du domaine fréquentiel (a). $AirFFT_{NF}$ (b). $AirFFT$ (c). $AirMSD_{NF}$. (d). $AirMSD_F$	146
Figure 83. Exemple de lien entre l'accélération et la distance relative à la source pour l'accélération minimal ϵ_{min} correspondant aux facteurs d'entrées suivants : $R=0,45$, $e_1=0,375$; $d=0,105$ et $z=0,0001$	159
Figure 84. Géométrie de la structure bicouche simulée sur Cast3m© contenant un défaut	174
Figure 85. Géométrie de la structure en U : (a). Dimensions de la structure. (b) Structure coulée au laboratoire	174
Figure 86. Système d'Impact avec une bille de 2 cm de diamètre élaboré au laboratoire GC2D	175
Figure 87. Coulage de la première couche constituant la structure en U.....	176
Figure 88 .Dispositif du Pundit PL-200 Proceq : (a) Principe de mesure du temps de parcours en configuration directe. (b) Dispositif du Pundit PL-200.....	177

Figure 89. Essai de compression sur les échantillons d'éprouvettes prélevées lors du coulage de la structure	178
Figure 90. Les différents points de mesure des temps de parcours des ondes de compression avec le Pundit PL-200 en configuration directe.....	179
Figure 91. Capteur d'accélération ICP®.....	180
Figure 92. Emplacement des accéléromètres et des différents points d'impact	181
Figure 93. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessus du premier point de mesure sur le mur de 25cm d'épaisseur.....	182
Figure 94. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessous du premier point de mesure sur le mur de 25 cm d'épaisseur.....	182
Figure 95. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessus du deuxième point de mesure sur le mur de 25 cm d'épaisseur.....	182
Figure 96. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessous du deuxième point de mesure sur le mur de 25 cm d'épaisseur.....	182
Figure 97. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessus du troisième point de mesure sur le mur de 25 cm d'épaisseur.....	182
Figure 98. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessous du troisième point de mesure sur le mur de 25 cm d'épaisseur.....	182
Figure 99. Superposition des spectres expérimentale et numérique	183
Figure 100. Exemple d'éprouvette d'arène granitique humidifié à 7,5% et compactée dans le moule Proctor	185
Figure 101. Mesure du temps de parcours de l'onde en configuration directe avec le Pundit	185
Figure 102. Couche de rugosité pour assurer le contact entre l'éprouvette en béton et l'éprouvette de sol	186
Figure 103. Éprouvette d'épaisseur 4,5 cm constituant la deuxième couche.....	187
Figure 104. Disposition de l'éprouvette en béton sur l'éprouvette de sol	188
Figure 105 .Impact-Echo sur une éprouvette 11x22 posée sur sable et sur une éprouvette 11x22 placée sur une éprouvette de sol	189
Figure 106. Spectre de fréquence obtenu à partir d'un essai Impact-Echo appliqué sur la longueur de la brique (Configuration 1)	191
Figure 107. Spectre de fréquence obtenu à partir d'un essai Impact-Echo appliqué sur la largeur de la brique (Configuration 2)	192
Figure 108. Spectre de fréquence obtenu à partir d'un essai Impact-Echo appliqué sur l'épaisseur de la brique (Configuration 3)	192
Figure 109. Disposition de la brique en terre crue sous l'éprouvette béton.....	193
Figure 110. Disposition des briques en terre crue par rapport l'éprouvette béton	194
Figure 111. Impact-Echo sur une éprouvette en béton 15x15x15 cm ³ sur deux briques de terre crue	195

Figure 112. Impact-Echo sur une éprouvette en béton 15x15x15cm ³ sur une brique de terre crue (Conf2) et sur 2 briques en terre crue (Conf1) et posée directement sur un sable non compacté (Conf3)	196
Figure 113. Fréquences cumulées des amplitudes de la simulation 4.....	198
Figure 114. Fréquences cumulées des amplitudes de l'essai 1 béton/terre crue (Essai 35)	198
Figure 115. Fréquences cumulées des amplitudes de l'essai 1 béton/terre crue, avec une coupure (Essai 35)	199
Figure 116. Spectre de fréquence d'une simulation numérique et sa transformation en graphique d'amplitudes en fonction de leurs distributions cumulées	200
Figure 117. Spectre de fréquence d'une mesure expérimentale et sa transformation en graphique d'amplitudes en fonction de leurs distributions cumulées	201
Figure 118. Organigramme résumant la méthode de normalisation	202

Table des tableaux

Tableau 1. Données globales sur la gestion des ponts dans quelques pays d'Europe montrant le rapport entre le coût de la maintenance annuel du patrimoine et sa valeur de remplacement (Godart, 2005).....	22
Tableau 2. Caractéristiques des roches (Delbecq, 1982).....	29
Tableau 3. Résumé des méthodes d'auscultation (Orbán and Gutermann, 2009)	36
Tableau 4. Evaluation des méthodes de contrôle par rapport à leur applicabilité pour l'évaluation des ponts en voûtes maçonnées (Orbán and Gutermann, 2009).....	38
Tableau 5. Capacités et limitations des méthodes d'essai non destructives (Haack et al., 1995; Kashif Ur Rehman et al., 2016; Orbán and Gutermann, 2009)	44
Tableau 6. Vitesse des ondes mécaniques et masse volumique dans les roches (Sansalone and Carino, 1986).....	48
Tableau 7. Impédance Acoustiques Spécifique (Sansalone and Carino, 1986)	50
Tableau 8. Facteurs géométriques en fonction de la géométrie (Sansalone and Streett, 1997)	56
Tableau 9. Paramètres d'acquisition (Carino, 2015)	60
Tableau 10. Gamme de profondeur réelle pour $VP = 4000m/s^2$ et différents intervalles de fréquence	61
Tableau 11. Relations approximatives entre le diamètre des billes et la profondeur minimale mesurable pour une vitesse de propagation $VP = 4000m/s$ pour le béton et $VP = 3500m/s$ la maçonnerie	62
Tableau 12. Facteurs géométrique β en fonction de la géométrie de la structure (Sansalone et Streett, 1997)	79
Tableau 13. Paramètres correspondant aux différents matériaux des structures sous formes de plaques bicouches.....	79
Tableau 14. Paramètres d'entrée du chargement.....	80
Tableau 15. Données des simulations numériques réalisées sur les plaques monocouches.....	94
Tableau 16. Variables d'entrée et de sortie des simulations des structures sous formes de plaques monocouches saines	96
Tableau 17. Coefficients de corrélations entre les variables d'entrée et de sortie des simulations sur la plaque monocouche	97
Tableau 18. Coefficient de pondération des paramètres A , f et $VP1f$	98
Tableau 19. Comparaison des différentes profondeurs obtenue à partir des différentes méthodes	98
Tableau 20. Matrice d'analyse comparant divers paramètres utilisés dans l'étude	100
Tableau 21. Récapitulatif des taux d'erreur dans l'identification des épaisseurs de la première couche dans les structures sous forme de plaques bicouches.....	111
Tableau 22. Paramètres et résultats des simulations des structures sous formes de plaque bicouche saine.....	112
Tableau 23. Corrélation des variables d'entrée et de sorties des simulations	113

Tableau 24. Coefficient de pondération des paramètres $A, f, VP1f$ et $VP2f$	115
Tableau 25. Comparaison des différentes profondeurs obtenue à partir des différentes méthodes	115
Tableau 26. Paramètres et résultats des simulations des structures sous forme de plaques monocouches et bicouches saines	116
Tableau 27. Corrélations des variables d'entrée et de sorties des simulations	116
Tableau 28. Coefficient de pondération des paramètres $A, f, VP1f$ et $VP2f$	118
Tableau 29. Comparaison des différentes profondeurs obtenue à partir des différentes méthodes	118
Tableau 30. Matrice d'analyse comparant divers paramètres utilisés dans l'étude pour une structure sous forme de plaque bicouche contenant un défaut.....	120
Tableau 31. Paramètres et résultats des simulations des structures sous formes de plaque monocouche saine, bicouche saine et bicouche contenant un défaut.....	129
Tableau 32. Corrélations des variables d'entrée et des variables de sorties des différentes simulations.....	130
Tableau 33. Coefficients de pondération des paramètres $A, f, VP1f$ et $VP2f$	131
Tableau 34. Comparaison des différentes profondeurs d'interfaces $e1$ obtenue à partir des différentes méthodes.....	132
Tableau 35. Facteurs du plan d'expériences factoriel.....	137
Tableau 36. Paramètres correspondants aux différents matériaux constituant les bicouches dans le cas des deux niveaux du facteur 'coefficient de réflexion'	138
Tableau 37. Plan d'expérience factoriel numérique.....	142
Tableau 38. Variables de sorties propres au domaine temporel.....	144
Tableau 39. Variables de sorties propres au domaine fréquentiel.....	145
Tableau 40. Effet de la variation des facteurs et leurs interactions sur les niveaux d'accélération maximale du signal ϵ_{max} et minimale ϵ_{min}	150
Tableau 41. Valeurs relatives aux variances par niveau	150
Tableau 42. Effet de l'interaction de d et $e1$ sur ϵ_{max1}	151
Tableau 43. Résultats finaux du plan d'expérience.....	152
Tableau 44. Effet des facteurs et leurs interactions sur l'amortissement du signal temporel α	153
Tableau 45. Effet de la variation des facteurs et leurs interactions sur l'aire de la valeur absolue de la réponse temporelle (AirAccABS)	155
Tableau 46. Effet de la variation des facteurs et leurs interactions sur l'aire située sous la transformée de Fourier Non fenêtrée et l'aire située au de la transformée de Fourier fenêtrée	156
Tableau 47. Effet de la variation des facteurs et leurs interactions sur les aires au-dessous des MSD NF et MSD F	157
Tableau 48. Effet de la variation des facteurs et de leurs interactions sur les variables $NbMSD_{NF}$ et $NbMSD_F$	158
Tableau 49. Variables de sorties retenues pour la suite de l'étude	160

Tableau 50. Coefficient de pondération des variables de sorties	161
Tableau 51. Estimation de l'épaisseur de la première couche $e1_{reg}$ à partir du modèle de régression.....	162
Tableau 52. Coefficient de pondération des variables de sorties	163
Tableau 53. Estimation du coefficient de réflexion R_{reg} à partir du modèle de régression	164
Tableau 54. Coefficients de pondération des variables de sorties.....	165
Tableau 55. Estimation de l'amortissement numérique ξ_{reg} à partir du modèle de régression .	166
Tableau 56. Coefficient de pondération des variables de sorties	167
Tableau 57. Estimation de la profondeur du défaut d_{reg} à partir du modèle de régression.....	168
Tableau 58. Estimation de l'épaisseur de la première couche $e1$ et du Coefficient de réflexion R	170
Tableau 59. Estimation du coefficient d'amortissement ξ et de la profondeur du défaut d	171
Tableau 60. Dimensions des trois murs constituant la structure en U.....	175
Tableau 61. Temps de parcours et vitesse de propagation des ondes de compression dans les éprouvettes 16x32	177
Tableau 62. Résistance mécanique, module d'Young et vitesse de propagation des ondes de compression dans les éprouvettes 16x32cm	178
Tableau 63. Temps de propagation et vitesses moyenne dans les différents murs de la structure en U	179
Tableau 64. Récapitulatif des vitesses de propagation des ondes de compression obtenues selon les différents essais sur le béton	181
Tableau 65. Récapitulatif des paramètres et résultats obtenues à l'issue des essais Impact-Echo réalisées sur le mur de 25cm d'épaisseur.....	183
Tableau 66. Vitesse de propagation dans l'éprouvette de sol de différentes épaisseurs	185
Tableau 67. Temps et vitesses de propagation calculés de l'onde P sur une éprouvette 11x22 avec une face de contact rugueuse.....	187
Tableau 68. Temps et vitesses de propagation calculés de l'onde P sur une éprouvette de sol ...	187
Tableau 69. Temps et vitesses de propagation calculés dans l'onde P pour une disposition de l'éprouvette en béton sur l'éprouvette de sol.....	188
Tableau 70. Temps et vitesses de propagation calculés de l'onde P sur la longueur, la largeur et l'épaisseur de la brique de terre crue.....	191
Tableau 71. Temps et vitesses de propagation calculés de l'onde P sur une éprouvette de béton posée sur la brique de terre crue	193
Tableau 72. Valeur caractéristique de la loi donnant les centiles choisis en fonction de la distance du point de mesure à l'impact.....	199
Tableau 73. Récapitulatif des taux d'erreurs moyens dans l'estimation de $e1$ obtenues partir des différents centiles.....	204

Tableau 74. Récapitulatif des taux d'erreurs moyens dans l'estimation de R obtenues partir des différents centiles.....	205
Tableau 75. Niveaux du facteur des facteurs d'entrées R et $e1$	206

Introduction générale

Contexte

Une enquête menée par le projet Européen Sustainable Bridges (Bell, 2004), un projet qui réunit les plus grandes compagnies européennes de transport ferroviaire, a comptabilisé et examiné plus de 220 000 ponts à travers l'Europe. Cette enquête a montré que 41% de ces ponts sont construits en maçonnerie, 23% en béton, 21% en construction métallique, et 14% sont en construction mixte. Il apparaît aussi que 52% des ponts en maçonnerie sont construits en brique, contre 33% en pierre (Figure 1).

Une autre enquête menée par l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC) sur 200 000 ponts ferroviaires en maçonnerie, a montré que le nombre le plus élevé de ces ponts est retrouvé en France, avec 78 000 ponts (ce qui représente 77% de la totalité des ponts ferroviaires en France). Suivie par l'Italie avec 56 888 ponts (95%), l'Allemagne avec 35 000 ponts (39%), l'Inde avec 20 967 (18%), le Royaume Uni avec 17 867 (47%) et le Portugal avec 11 746 (90%) (Orbán, 2007). Ainsi, on peut considérer que les ponts en maçonnerie représentent une partie importante du patrimoine d'ouvrages d'art européens et en particulier, Français. Leur maintenance est donc un enjeu socio-économique important à l'échelle nationale et internationale.

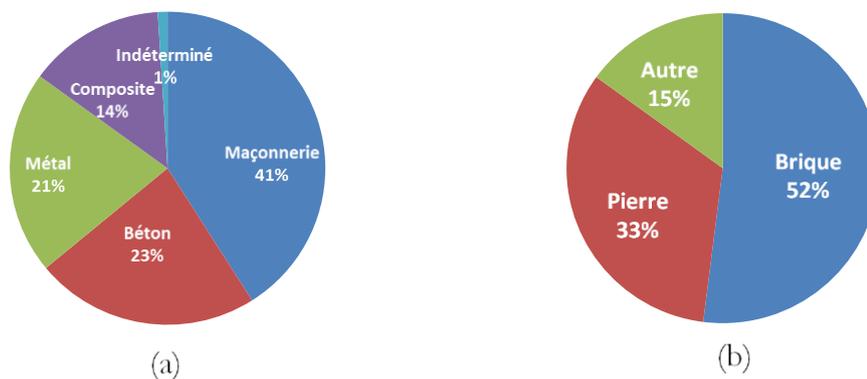


Figure 1. (a) Répartition des ouvrages sur le réseau ferroviaire européen.
(b) Types de maçonnerie sur le réseau ferroviaire européen.

Problématique

La majorité des ponts en maçonnerie du réseau ferroviaire européen ont été construits il y a plus d'un siècle. En effet, l'enquête menée par le projet Européen Sustainable Bridges (Bell, 2004) montre que 64% des ponts en maçonnerie sur le réseau ferroviaire européen ont plus de 100 ans, 34% ont entre 50 et 100 ans et 2% ont moins de 50 ans (Figure 2.(a)). Une étude menée par l'UIC en 2004 (Orbán, 2004) sur les ponts ferroviaires en maçonnerie d'Europe, montre que moins de la moitié, à savoir 42% des ouvrages sont en bonne condition, tandis que 43% sont dans un état moyen et que 15% sont dans un mauvais état (Figure 2.(b)).

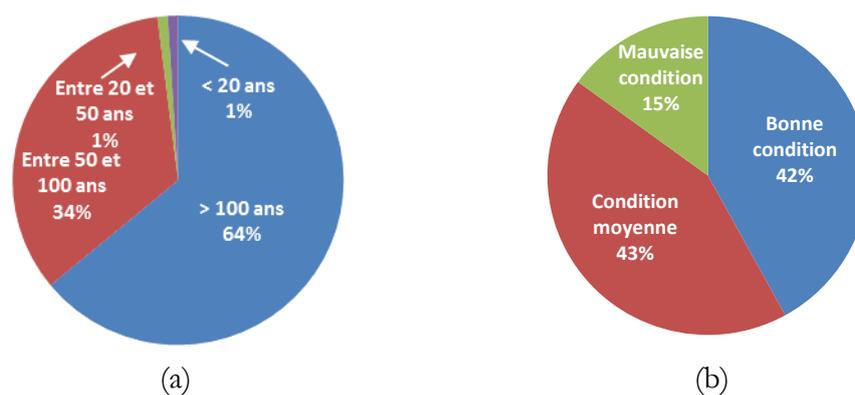


Figure 2. (a) Age des ponts en maçonnerie sur le réseau ferroviaire européen
(b) Etat des ponts en maçonnerie sur le réseau ferroviaire Européen.

En considérant l'âge avancé de la majorité des ponts en maçonnerie (64% de la totalité des ouvrages en maçonnerie ayant plus de 100 ans) et l'état moyen à dégradé de 58% des ouvrages, on

pourrait être amené à se poser la question suivante : les ponts construits il y a plus d'un siècle, derrière leur allure massive et solide, sont-ils encore suffisamment résistants pour supporter l'accroissement continu du trafic routier et ferroviaire, la hausse des charges permanentes et les caprices du temps ?

Pour pouvoir répondre à cette question il est nécessaire d'établir un 'état de santé' des ponts aux moyen de méthodes, qui ne dégraderaient pas ou dégraderaient très faiblement les ouvrages en question. Cet 'état de santé' permettrait dans un premier temps de renseigner sur l'état du pont, afin de pouvoir assurer une maintenance adéquate, et ce dans le but de garantir la sécurité des usagers, d'assurer le flux du trafic et de conserver le patrimoine Européen. De plus, une maintenance régulière et adéquate peut aussi être très bénéfique pour le portefeuille Européen. En effet, une enquête menée par le projet BRIME (BRIDGE Management in Europe) (Godart, 2005) sur une dizaine de pays Européens a montré que le remplacement d'un patrimoine (tous types de ponts confondus) peut coûter jusqu'à 99% plus cher qu'un entretien annuel. Le Tableau 1 résume quelques données globales sur la gestion des ponts collectées à partir de pays Européens partenaires du projet BRIME, sur le coût de maintenance annuel du patrimoine contre le coup de son remplacement.

Tableau 1. Données globales sur la gestion des ponts dans quelques pays d'Europe montrant le rapport entre le coût de la maintenance annuel du patrimoine et sa valeur de remplacement (Godart, 2005)

Gestionnaires	Nombre de Ponts	Maintenance coût annuel (MEuro)	Valeurs de remplacement du patrimoine (MEuro)	Ratio %
Belgique	5 000	10	3800	0,3
Finlande	15 000	30	2 900	1,0
France	22 000	50	10 800	0,5
Allemagne	34 600	318	30 000	1,0
Grande Bretagne	9 500	225	22 500	1,0
Irlande	> 1 800	2.5	450	0,6
Norvège	17 000	37	6 000	0,6
Espagne	13 600	13	4 100	0,3
Suède	15 000	92	5 300	1,7

Objectif

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre de l'évaluation des ouvrages en maçonnerie, et en particulier les ponts en maçonnerie, au moyen des méthodes soniques. Les types de défauts qui attirent notre attention dans cette étude, sont les défauts qui peuvent être situés dans les ponts en maçonnerie. Plus précisément, les défauts ou les vides dans le remplissage des ponts situés au-delà

de la voûte ou du mur de tête. La détérioration ou la perte de matériaux dans ce remplissage peut affecter directement ou indirectement le comportement et la sécurité de la structure du pont. L'une des principales difficultés rencontrées lors de l'auscultation de tels ouvrages est la possibilité d'inspecter le remblai situé au-delà de la voûte et des murs de tête sans dégrader la structure en cours d'inspection. Pour ce faire, nous allons nous intéresser à une méthode sonique en particulier, que nous présenterons à la fin du chapitre bibliographique. L'objectif de cette étude sera d'étudier la capacité de la méthode choisie à identifier les défauts pouvant être situés dans le remplissage des ponts en maçonnerie sans dégrader la structure.

Structure de la thèse

Ce mémoire de thèse est subdivisé en quatre chapitres principaux. Un premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur les pathologies des ponts en maçonneries ainsi que sur les contrôles non destructifs appliqués aux matériaux solides tels que le béton ou la maçonnerie. Une attention particulière est accordée aux méthodes se basant sur la propagation des ondes mécaniques. L'ensemble des hypothèses permettant de décrire la propagation des ondes dans les matériaux solides sera abordé. Enfin, on présente la méthode retenue pour la suite de nos travaux ainsi que ses principes de fonctionnement. Le deuxième chapitre présente les principes de base de la simulation par éléments finis de la propagation des ondes mécaniques dans les matériaux solides. Cette partie constitue la base des simulations par éléments finis réalisées pendant tous nos travaux de recherches. Dans une première partie, les hypothèses de calculs, la géométrie du problème, le maillage, le chargement ainsi que les différents paramètres considérés lors des simulations sont présentés. Dans une deuxième partie, les premiers résultats obtenus à partir des différentes simulations sont présentés et discutés. Le troisième chapitre vise à étudier les variations du comportement du spectre de fréquences issues des simulations par éléments finis de l'essai Impact-Echo appliqué à une structure sous forme de plaque bicouche contenant un défaut, en fonction des différents facteurs considérés et de leurs interactions. La nécessité d'introduire de nouvelles variables de sortie autres que la position du pic de fréquence afin d'élargir l'approche permettant d'interpréter la réponse d'un essai Impact-Echo sera discutée. Le dernier chapitre est consacré aux essais expérimentaux réalisés en vue de la validation des résultats obtenus à partir des simulations par éléments finis, développées au deuxième et troisième chapitre, qui ont porté sur la propagation des ondes mécaniques dans une structure bicouche contenant un défaut. Un protocole expérimental a été mis en place pour mener une campagne d'essais de validation. Ce document se terminera par la conclusion et les perspectives liées à ces travaux.

Chapitre I.

Etat de l'art

Introduction

Ce premier chapitre bibliographique constitue la base des travaux de thèse et s'articule autour de six grandes parties. La première et la deuxième partie présentent les généralités autour des ponts en maçonnerie ainsi que les pathologies pouvant les affecter. Dans la troisième partie, les différentes méthodes d'auscultation des ouvrages sont détaillées. Ensuite, la quatrième partie est consacrée aux différents contrôles non destructifs étudiés dans la littérature. Dans la cinquième partie, une attention particulière est accordée aux méthodes se basant sur la propagation des ondes mécaniques. L'ensemble des hypothèses permettant de décrire la propagation des ondes dans les matériaux solides y sont présentées. En dernière partie, on introduit la méthode d'auscultation adoptée pour ces travaux de thèse et on présente l'état de l'art de cette dernière appliquée à l'auscultation des ponts en général, et des ponts en maçonnerie en particulier.

I.1. Généralités autour des ponts en maçonnerie

I.1.1. Morphologie d'un pont en maçonnerie

Un pont à voûtes en maçonnerie habituellement appelé pont en maçonnerie ou pont en pierres ou encore pont voûté, désigne une technique de fabrication des ponts et constitue surtout une des grandes familles de ponts qui a été mise en œuvre depuis l'antiquité jusqu'au début du XX^e siècle. Au vocabulaire classique utilisé pour décrire les ponts et viaducs, s'ajoute un vocabulaire très spécifique réservé aux ouvrages en maçonnerie comme on peut le voir sur la Figure 3 :

- L'*arche* est constituée d'une voûte, reposant sur les *piles* et les *culées*, surmontée d'un *remplissage* ou remblai supportant la chaussée et soutenu par les *murs de tête* ;
- La *voûte* est la partie dite active de l'ouvrage, elle est comprise entre deux surfaces courbes, la surface extérieure appelée *extrados*, la surface intérieure appelée *intrados* ;
- Le commencement de la courbure de la voûte est appelé *naissance*, le point le plus haut est la *clé*. La partie moyenne d'une voûte entre les naissances et la clé s'appelle les *reins* ;
- Le *remplissage* est le matériau de comblement de l'espace compris entre les murs de tête et la voûte, son rôle est de répartir les charges sur la voûte et pousse sur les tympans. Il participe à la portance de l'ouvrage par ces effets répartiteurs ;
- Le *bandeau* est la surface vue des extrémités de la voûte. C'est l'élément de jonction entre les murs de tête et l'intrados ;
- *Culée* : c'est un massif de maçonnerie, qui soutient la voûte de la première et la dernière arche d'un pont ;
- Les *piles*, supports intermédiaires de l'ouvrage, sont constituées de 4 murs d'enceinte en maçonnerie appareillées ; dont l'intérieur est rempli de remblai en matériaux divers (reste de chantier, sable, etc.)
- L'*ouverture* ou la *portée* est la longueur libre horizontale sous une voûte ;
- La *flèche* est la distance verticale qui sépare la ligne d'intrados de la ligne des naissances, mesurée au milieu de celle-ci (Figure 4) ;
- Afin d'alléger les voûtes, des *élégissements* sont parfois présents situés à l'intérieur même de l'ouvrage. Leur présence n'est détectable que sur les plans de l'ouvrage (Figure 5) ;

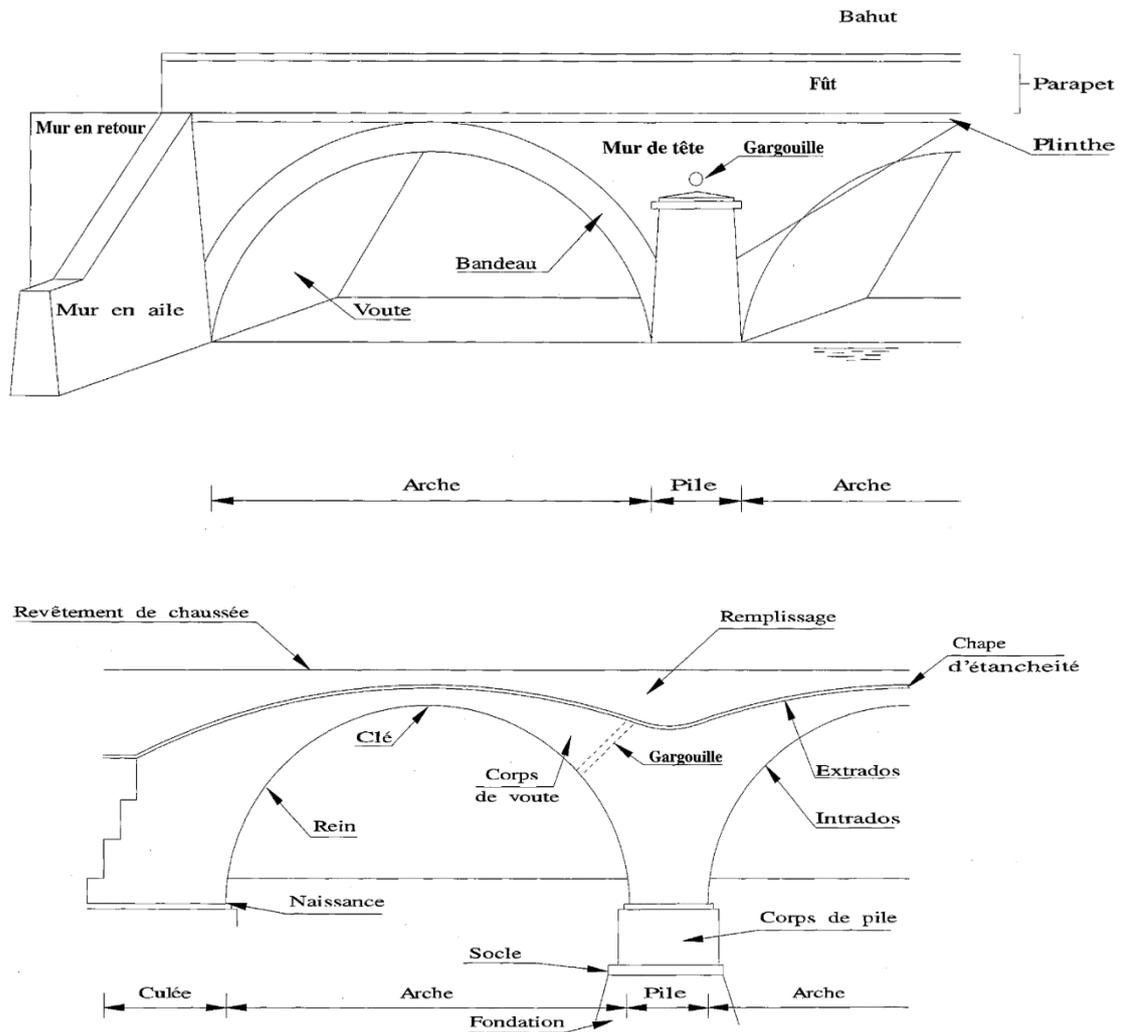


Figure 3. Terminologie relative aux ponts en maçonnerie (SETRA, 1996)

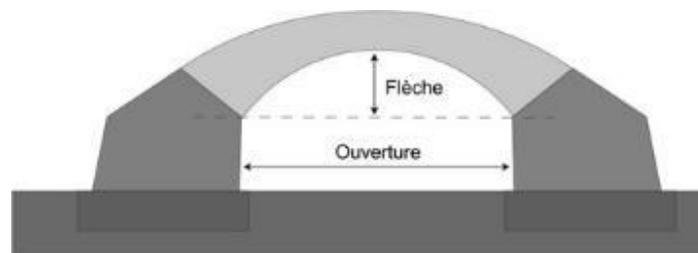


Figure 4. Coupe d'une voûte de pont en maçonnerie (Image internet)

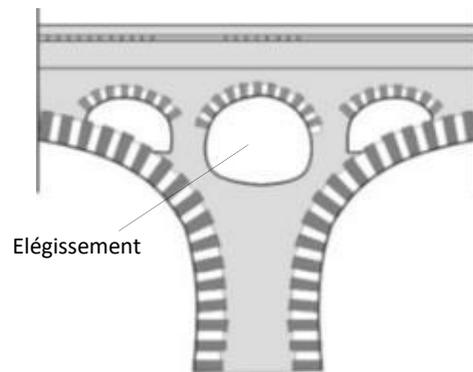


Figure 5. Elégissements longitudinaux des voûtes (Proske and Gelder, 2009)

I.1.1.1. Typologie des voûtes

La voûte est l'élément constitutif principal des ponts en maçonnerie supportant toutes les charges appliquées sur l'ouvrage. Sa géométrie, caractérisée par la forme de son intrados, permet de différencier les ouvrages comme l'indique la Figure 6 (Stablon, 2011) :

- Voûte plein cintre : elle est simplement définie par un demi-arc de cercle ;
- Voûte plein cintre surhaussée : c'est une voûte dont la clef a été surhaussée par rapport à une voûte plein cintre ;
- Voûte plein cintre cambrée : c'est une voûte plein cintre dont le rein a été surhaussé ;
- Voûte surbaissée : elle est définie par un arc de cercle dont le centre est plus bas que les naissances ;
- Voûte surbaissée-cambrée : c'est une voûte surbaissée dont le rein a été surhaussé ;

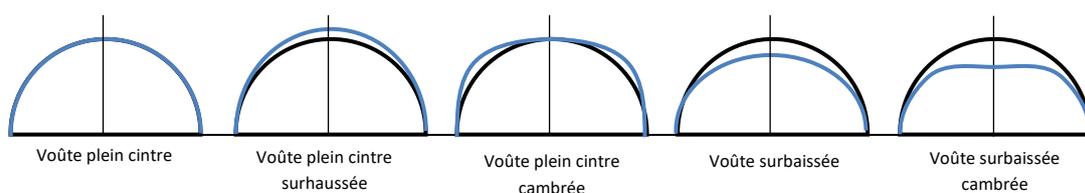


Figure 6. Types de voûtes surhaussées et surbaissées

I.1.1.2. Typologie des maçonneries

La maçonnerie est un mode d'assemblage des moellons, de pierres ou de briques se différenciant par leur appareillage, c'est-à-dire le détail de la forme des pierres ou des briques dans un ouvrage. L'appareillage des maçonneries diffère selon les époques et les lieux comme l'indique la Figure 7:

- La **maçonnerie assisée** : est une technique de maçonnerie où les pierres sont taillées et tirées au cordeau, pour obtenir des lits réguliers ; les joints sont d'épaisseur constante.
- La **maçonnerie en opus incertum** : est une technique de maçonnerie qui consiste à construire des murs à l'aide des petits moellons de pierre qui sont généralement de formes et de dimensions complètement différentes. Ces moellons bruts sont généralement tous empilés sur une épaisseur conséquente de mortier, afin de consolider l'opération.

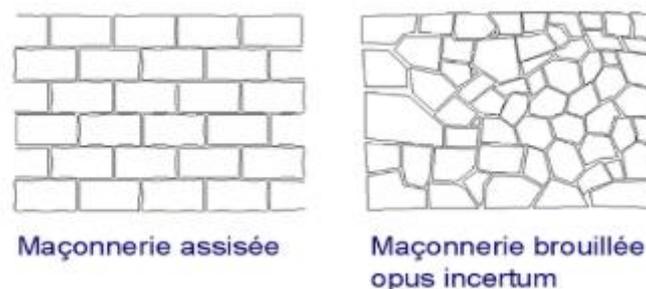


Figure 7. Différents types d'appareillage de la maçonnerie (Stablon, 2011)

I.1.1.2.1. Les pierres

Toutes les pierres naturelles (sauf les plus tendres) ont été utilisées dans la construction des ponts. Les pierres naturelles sont hétérogènes et anisotropes, en particulier celles d'origine sédimentaire dont la texture présente des strates. Les propriétés mécaniques des différentes roches sont présentées dans le Tableau 2. Delbecq, (1982) propose de caractériser les pierres à l'aide des éléments suivants :

- *La structure* : compacte, oolithique, caverneuse, schisteuse.
- *La forme et l'aspect de la surface des cassures* : plane, arrondie, granuleuse, esquilleuse, feuilletée...
- *Le lit* : les pierres sédimentaires et en particulier les pierres calcaires présentent des stratifications. Dans les constructions, on dispose les pierres de manière à avoir les lits normaux à la résultante des efforts.
- *L'homogénéité* : présence de parties tendres, de fentes, de cavités remplies d'une matière étrangère pulvérulente... On ne peut pas compter sur la résistance d'une pierre dont la constitution n'est pas régulière. Une bonne pierre a une contexture (assemblage organisation) compacte, serrée et uniforme : elle rend un son clair sous le choc du marteau.
- *La dureté* : dont on peut se faire une idée avec la lame d'un couteau. La profondeur de la trace laissée par le couteau peut être reliée à la résistance de la pierre, l'entaille devant alors être faite dans des conditions précises.

Tableau 2. Caractéristiques des roches (Delbecq, 1982)

Roche	Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la traction (MPa)		Module d'Young (GPa)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Craie	2	12	0,1	1,5	2	10
Calcaire Ordinaire	7	40	0,5	5	5	30
Calcaire compacte	40	100	4	15	30	60
Granite	60	180	6	15	15	70
Grès	7	60	0,5	5	7	50
Quartzite	80	300	7	20	25	80
Schiste	15	70	0	10	7	60

I.1.1.2.2. Les briques

Les briques employées en maçonnerie sont obtenues à partir de certaines argiles durcies artificiellement au four (briques cuites). Leurs résistances à la compression simple sont plus faibles que la pierre. La brique pleine, par la régularité de ses dimensions, peut se prêter à des dispositions variées, par exemple appareil en panneresse, appareil en boutisse, appareil à la française, appareil sur chant, etc. (Figure 8). Delbecq, (1982) propose de caractériser les briques à l'aide des éléments suivants :

- *L'homogénéité de composition et de structure* : une bonne brique doit avoir une structure massive et ne doit contenir aucune inclusion de matériaux étrangers.
- *La régularité des formes et des dimensions.*
- *L'altérabilité*, fonction de *la porosité* et de la cohésion de la brique : risques de délitage sous l'action du gel et de l'humidité. La présence de nodules de chaux et de magnésie fait gonfler et éclater la brique sous l'action de l'humidité, une bonne brique doit rendre un son clair sous le choc du marteau ; sa cassure doit être homogène, à grain fin ou serré ; elle doit être difficilement rayable par le fer ou l'acier.
- *La densité* : les valeurs courantes sont données dans le Figure 9.

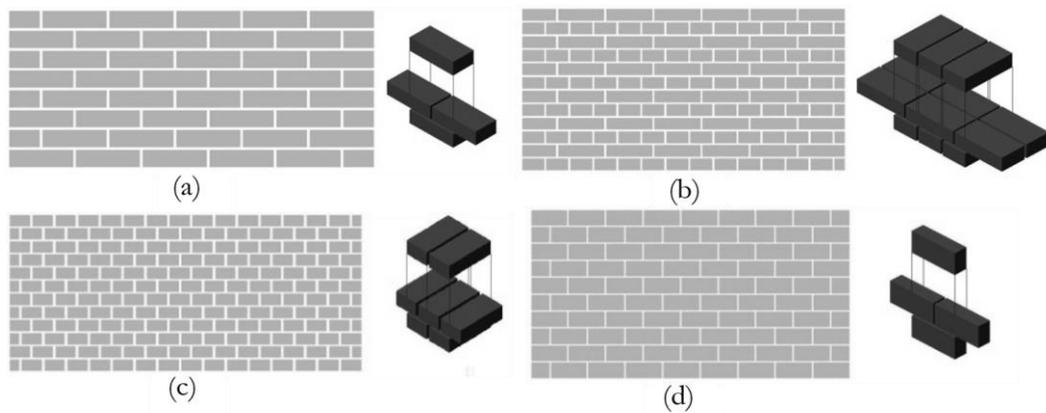


Figure 8. (a) Appareil en panteresse (b) l'appareil à la française (c) Appareil en boutisse (d) Appareil sur chant (Image internet)

Figure 9. Caractéristiques des briques (Delbecq, 1982)

Qualité Brique de	Masse volumique (kg/m ³)		Résistance à la compression (MPa)		Module d'Young (GPa)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Tendre	1700	1900	4	8	1	5
Moyennement dure	1900	2100	8	15	5	10
Dure	2000	2200	15	30	10	15
Clinker	2100	2300	30	50	15	20

I.1.1.2.3. Joint de mortier

Dans un mur ou un ouvrage en maçonnerie, un joint désigne généralement un intervalle qu'on maintient entre deux pierres naturelles ou artificielles (brique, bloc de béton, etc.). Le joint est déterminant dans la stabilité, dans l'apparence d'un mur et dans son étanchéité à l'humidité. L'épaisseur du joint est souvent variable d'un ouvrage à un autre : elle dépend du type de maçonnerie. La forme du joint (Figure 10) dépend de la localisation de l'ouvrage et de l'époque de construction. Dans le cas des ponts ferroviaires, l'épaisseur du joint était imposée par le cahier des charges des compagnies ferroviaires. (Stablon, 2011)

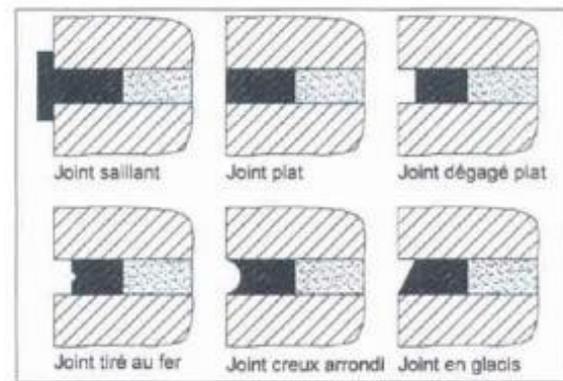


Figure 10. Typologie des joints (Stablon, 2011)

Les joints sont constitués de mortier de chaux ou de mortier de ciment. Ces derniers peuvent être classés selon leur indice d'hydraulicité, mais de façon plus pratique on distingue les chaux aériennes et les chaux hydrauliques (Delbecq, 1982) :

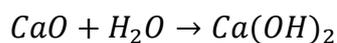
Les chaux aériennes

Les chaux aériennes proviennent de la calcination d'un calcaire pur :



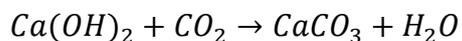
Calcaire + Chaleur → chaux vive + gaz carbonique

La chaux vive est ensuite hydratée (éteinte) et réduite en poudre :



Chaux vive + eau → chaux éteinte + chaleur

En fonction de la pureté, on obtient des chaux grasses (calcaire pur) à maigres (calcaire avec sables ou argiles). Le durcissement des mortiers de chaux aérienne se fait au contact de l'air : c'est une réaction lente de carbonatation qui s'accompagne d'une augmentation de volume.



Chaux éteinte + gaz carbonique → Calcaire + eau

La Figure 11 résume clairement le cycle de la chaux aérienne. La maçonnerie hourdée en mortier de chaux aérienne est souvent assujettie aux dégradations des joints, car lors de la pose du mortier la carbonatation ne peut atteindre le cœur des joints et donc, l'extinction de la chaux vive ne peut être parfaite ce qui rend ces joints vulnérables à la présence d'eau, la chaux non éteinte se dissout lentement et disparaît par lixiviation (La lixiviation est la mise en solution de certains constituants du béton) (Zanaz, 2016).

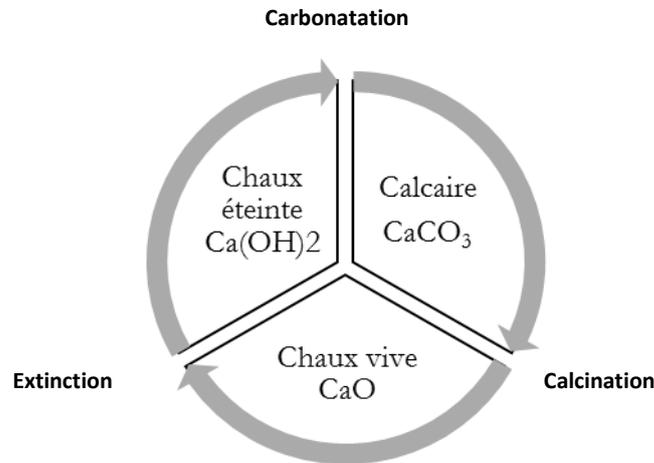


Figure 11. Cycle de la chaux aérienne

Les chaux hydrauliques

La chaux hydraulique provient des pierres calcaires contenant des argiles en proportions variables (10 à 20% d'argile). Elle est appelée hydraulique parce qu'elle durcit en présence d'eau. Les mortiers de chaux hydraulique sont moins altérables par l'eau, l'hydratation est plus homogène et la lixiviation est moins importante.

I.2. Pathologies des ponts en maçonnerie

Les ponts en maçonnerie sont généralement des ouvrages anciens (âgés de plus de 100 ans pour la plupart), qui ont subi les caprices du temps et l'accroissement du trafic, et à cause desquels des pathologies sont apparues. Les pathologies peuvent causer des désordres importants qui peuvent nuire de manière directe ou indirecte au comportement et à la sûreté de la structure en maçonnerie. Le SETRA (1996) propose pour les ouvrages relevant de l'état, une méthode de suivi appelée ITSEOA (Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art). Chaque ouvrage du patrimoine national doit faire l'objet d'un contrôle annuel systématique, lorsqu'aucune autre action de surveillance n'est prévue. Ce contrôle donne lieu à un constat, qui doit mentionner l'identification de l'ouvrage, la date du contrôle, ainsi que les anomalies ou les signes d'évolution manifeste observés. L'ensemble des observations permet d'attribuer à l'ouvrage une note globale. En fonction du résultat de cette inspection visuelle on peut décider de faire une inspection complémentaire. Cette inspection sera le plus souvent locale (on cherche des informations en un point précis du pont), mais elle peut être aussi globale (on cherche des informations sur toute la structure du pont). Tous les six ans au plus, une inspection détaillée est réalisée. L'inspection détaillée consiste à établir un 'bilan de santé' de l'ouvrage. Il s'agit en général d'un examen visuel rapproché des parties observables avec les moyens d'accès nécessaires pour y accéder, pouvant être

complété par des auscultations et des mesures. L'inspection peut aussi être approfondie par des contrôles non destructifs ou destructifs. Cette inspection va permettre d'obtenir des informations non visibles, ou bien d'évaluer l'ampleur des désordres observés lors de l'inspection visuelle. On en déduit une image globale du pont avec des informations sur l'intérieur de la structure enrichie. Dans ce qui suit, nous avons choisi de citer les désordres les plus courants qui peuvent affecter les ponts en maçonnerie et les classer ensuite en désordres visibles et désordres non visibles.

Les désordres pouvant affecter une structure en maçonnerie et en particulier les ponts sont nombreux et d'origines différentes. Certains altèrent les matériaux constituant la maçonnerie, d'autres affectent le comportement de la structure en question. Les désordres peuvent être classés en deux catégories : désordres visibles ou désordres invisibles. Les désordres peuvent être visibles à partir de la surface de la structure et sont, par conséquent, détectables à partir d'une simple analyse visuelle. Mais parfois les désordres peuvent être invisibles depuis l'extérieur et c'est ce type de désordres qui est le plus dangereux pour les structures en maçonnerie ancienne.

I.2.1. Les désordres visibles

Les désordres visibles sont par définition ceux qui peuvent être détectés et identifiés visuellement où aucun moyen d'évaluation n'est nécessaire. Ces désordres peuvent être liés aux matériaux constituant la structure ou à la structure elle-même :

I.2.1.1. Les désordres liés aux matériaux

Les désordres relatifs aux matériaux (pierre, mortier...) peuvent être les suivants :

- Fissures et fractures ;
- Décollement et détachement ;
- Présence de végétation ;
- Altération des joints et des pierres ;
- Désorganisation et dislocation.

Les causes de ces pathologies et leurs illustrations sont présentées en Annexe 1.1. Ces désordres sont principalement dus à la présence et à la circulation de l'eau dans la structure. L'eau acide, (l'acidité due à l'acide carbonique naturellement présent dans l'eau ou à d'autres acides pouvant être liés à la pollution) s'infiltré à cause de la gravité (eau d'origine pluviale) ou de la capillarité et qui circule dans la structure (condensation, passage d'un état gazeux à un état solide) ou qui s'évapore. La désorganisation de la maçonnerie qui peut être liée aux lacunes, ou aux disjointements peut diminuer la résistance globale de la structure en maçonnerie.

I.2.1.2. Les désordres liés à la structure

Les désordres liés à la structure sont toutes sortes de fissures et fractures. L'IQOA (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art) relatif aux ponts recense les désordres suivants :

- Tassement différentiel ;
- Décollement du bandeau et du rouleau ;
- Affouillement de fondations en rivière ;
- Poussées latérales sur les tympans dues aux charges ;
- Hauteur excessive de ballast ;
- Tassement d'appui ;
- Glissement de terrain.

Les causes de ces pathologies et leurs illustrations sont présentées en Annexe 1.2. Les désordres ci-dessus affaiblissent la structure et affectent fortement sa capacité portante. Tous ces désordres sont visibles, mais leur ampleur et leurs causes ne sont pas forcément faciles à déduire. Le catalogue des désordres de l'IQOA, par exemple, peut donner parfois plusieurs causes possibles à un seul désordre observé.

I.2.2. Les désordres non visibles

Certains désordres ne peuvent pas être visibles depuis l'extérieur ou bien un désordre peut être visible mais son ampleur ou sa cause peuvent ne pas être visibles. La Figure 12 illustre la composition intérieure d'un pont en maçonnerie. Les éléments intérieurs les plus importants à surveiller sont les suivants : la chape d'étanchéité, les éléments liés au drainage, le remplissage et l'extrados. Dans ce qui suit, on présente le rôle de chaque élément.

- La chape d'étanchéité : elle sert à protéger la voûte de l'arrivée des eaux d'infiltration. Cette protection est indispensable car l'élément structurel du pont est la voûte. C'est cette dernière qui assure la fonction du pont. Elle est constituée ; soit d'une couche d'argile soit d'une couche de mortier à base d'asphalte (ou de goudron).
- Les éléments de drainage : L'eau dans le pont circule de haut en bas suivant la gravitation, et peut aussi circuler latéralement. Les drains servent à évacuer l'eau de la chape vers l'extérieur et les barbacanes.
- Le remplissage : Il permet de répartir la charge 'ponctuelle' due au passage des véhicules (roues des véhicules) sur la route, et participe ainsi au maintien de la voûte en bon état. Si l'eau circule de manière importante dans le remplissage, ce dernier peut localement perdre de sa densité, allant jusqu'à y créer des vides.
- L'extrados : C'est la partie non visible de la voûte. Il est important pour le calcul de la capacité portante, de connaître l'épaisseur de la voûte ou au moins l'épaisseur maximale

fréquemment appliquées sur les ponts en maçonnerie du réseau ferroviaire sont résumées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Résumé des méthodes d'auscultation (Orbán and Gutermann, 2009)

Les méthodes destructives	Les méthode semi destructives	Les méthodes non-destructives
<ul style="list-style-type: none"> - Essais mécaniques sur des échantillons de carottes - Essais physiques et chimiques sur éprouvettes - Essais standard sur les propriétés du sol et du remblai 	<ul style="list-style-type: none"> - Boroscopie, Endoscopie - Flat-jack test - Mesures de surface (dureté, pénétration, test de retrait) - Analyse d'échantillon carotté de petit diamètre 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthodes de soniques et ultrasoniques - Méthodes électromagnétiques - Méthodes électriques

I.3.1. Les contrôles destructifs (CD)

La plupart des méthodes d'évaluation des ouvrages en maçonnerie exigent, comme paramètres d'entrée, la densité des matériaux, leurs contraintes ultimes, leurs rigidités et d'autres propriétés mécaniques. Les méthodes destructives sont généralement nécessaires pour déterminer certaines de ces propriétés. Mais il convient de noter que les résultats donnés ne constituent que des informations localisées sur quelques parties de l'ouvrage, et ces informations ne peuvent pas être directement généralisées à l'ensemble de la structure (Zanaz, 2016).

I.3.2. Les contrôles semi-destructifs (CSD)

Les méthodes de mesure localisées, en surface ou à faible profondeur dans les matériaux, ne sont plus considérées comme destructives mais semi-destructives (*Minor Destructive Testing MDT*). Parmi les méthodes CSD, une possibilité intéressante est l'extraction de petits échantillons à tester en laboratoire. Ces techniques sont appropriées pour les constructions historiques, puisque les échantillons peuvent être extraits à partir de membres structurels cachés réduisant au minimum la quantité de dommages induits (Marastoni et al., 2016). Ces techniques peuvent être efficaces pour extraire les propriétés locales d'élasticité et de résistance.

I.3.3. Les contrôles non destructifs (CND)

En général, la fiabilité de l'identification et/ou de l'évaluation de la pathologie dépend de la validité des paramètres introduits lors de l'analyse. Cependant, il existe souvent une insuffisance d'information sur les paramètres réels requis pour l'analyse et l'évaluation des ponts en maçonnerie (Orbán and Gutermann, 2009). De tels ponts ont rarement des plans précis et complets de leurs constructions ou des informations sur leurs réparations ou sur leurs maintenances. La structure interne des ponts en maçonnerie peut être difficile à identifier à partir de l'extérieur. De plus, le type et la qualité des matériaux utilisés pour la butée, le bandeau, le tympan et le remblai peuvent

être très variables. Il peut donc être difficile de déterminer les dimensions physiques des principaux éléments structurels du pont en maçonnerie. Une connaissance insuffisante de la géométrie et des matériaux utilisés peut rendre la modélisation structurelle difficile. Une autre complication est ajoutée par la possibilité de présence de défauts cachés tels que la perte d'épaisseur et la non connaissance de la variation d'épaisseur de la voûte, la séparation des rouleaux, les vides dans le remplissage, etc. (Orbán and Gutermann, 2009). En présence d'une ou des situations citées ci-dessus, l'application de techniques de CND a un bon potentiel pour fournir des informations précieuses concernant la structure, les matériaux et les défauts potentiels en profondeur et ne pas nuire au comportement de la construction en maçonnerie. Elle permet également d'aider à établir des paramètres d'entrée pour la méthode d'analyse numérique (Zanaz, 2016). Dans le cas où ces méthodes ne peuvent pas fournir des informations utiles et fiables, les combiner avec des techniques destructives peut s'avérer inévitable. Il existe de nombreuses techniques de CND, basées sur des principes théoriques différents, et produisant ainsi des ensembles d'informations complémentaires concernant les propriétés physiques de la structure. Ces propriétés, telles que les vitesses d'onde de compression et de cisaillement, la résistivité électrique, etc., doivent être interprétées en fonction du matériau composant de la structure et de ses caractéristiques mécaniques et physiques. Inévitablement, cette interprétation implique un certain degré d'hypothèses sur la structure. L'utilisation de mesures d'étalonnage est essentielle dans la plupart des investigations non destructives. McCann et Forde, (2001) ont cité cinq facteurs principaux qui doivent être pris en compte dans la conception d'une enquête CND :

1. La profondeur de pénétration requise dans la structure ;
2. Les résolutions verticale et latérale requises pour les objectifs prévus ;
3. Le contraste des propriétés physiques entre la cible et son environnement ;
4. Le rapport signal sur bruit pour la propriété physique mesurée à la structure étudiée ;
5. Les informations historiques concernant les méthodes utilisées pour la construction de la structure.

Le Tableau 4 élaboré par (Orbán and Gutermann, 2009) résume les différents types de contrôles (CND, CSD et CD) et leur applicabilité pour l'évaluation des ponts en maçonnerie. On peut remarquer que le CND permet de détecter le plus grand nombre de paramètres concernant la géométrie de la structure, ses propriétés mécaniques et ses défauts structurels, tout en étant non destructifs et non traumatisants par rapport à l'ouvrage à évaluer. Tandis que les contrôles destructifs et semi-destructifs sont des méthodes de mesures locales, les CND quant à eux peuvent opérer de façon soit locale soit globale. En effet, les méthodes électromagnétiques comme le radar ou la tomographie infrarouge donnent des réponses globales de la structure. Par contre la radiographie, les méthodes électriques et les méthodes soniques et ultrasoniques sont des méthodes de mesure locale mais peuvent être utilisées en configuration tomographique. Cette configuration va permettre, d'avoir une image globale de l'ouvrage.

Tableau 4. Evaluation des méthodes de contrôle par rapport à leur applicabilité pour l'évaluation des ponts en voûtes maçonnées (Orbán and Gutermann, 2009)

Propriétés	Méthodes Paramètre	CND			CSD		CD				
		Méthodes soniques	Géoradar	Thermographie infrarouge	Mesure de conductivité	Essai Flat-Jack	Carottage et analyse de carotte	Endoscopie	Scliromètre	Essai de pénétration dans le mortier	Teste d'arrachement
Géométrie	Profil de la voûte										
	Epaisseur de la voûte	2	2		3		1	1			
	Géométrie des culées	2	2		3		1	1			
	Géométrie des piles	2	2		3		1	1			
	Epaisseur des fondations	2	2		3						
	Présence et géométrie de calage	3	3		3		1	1			
	Epaisseur des tympans	2	2		3		1	1			
	Présence et géométrie de tympans internes	2	2	3	3		3	2			
	Présence et géométrie des éléments cachés	2	1	3	3		3	1			
Nature et étendue de réparation ou de renforcement antérieur	3	3	3	3		1	1				
Propriétés des Matériaux	Type, résistance et état des éléments solides			3		2	1	2	2	2	2
	Type, résistance et état du mortier			3			2	2		2	
	Densité de la maçonnerie	3	3		3		1	2	3		
	Densité du remplissage	3	3		3		1	2			
	Teneur et distribution de l'humidité dans la maçonnerie		2	2	2		2	3			
	Teneur et distribution de l'humidité dans le remplissage		2		2		2	3			
	Propriétés mécaniques du remplissage	3	3		3		1	2			
Défauts	Déplacement ou perte d'élément solide							3			
	Fissure sur l'intrados de la voûte	2	3					3			
	Fissure sur l'extrados de la voûte	2	3					3			
	Détachement des tympans	2	3				3	2			
	Déformation de la voûte										
	Séparation des rouleaux	3	2				3	2			
	Défauts, cavités dans la maçonnerie et remplissage	2	2	3	3		3	2			
	Décollement de surface	3	3	2			2	2	3		3
	Perte de la matière au niveau des joints	3	2	2	3		3	2		2	
	Décomposition des voussoirs, briques			3			2	2	2		2
	Problèmes des fondations	2	2		3		3	3			

1 Peut fournir des informations très utiles. Les paramètres mesurés sont principalement quantitatifs et fiables

2 Peut fournir des informations utiles. Les paramètres mesurés sont principalement quantitatifs généralement fiables.

3 Ne peut fournir que des informations complémentaires. Les paramètres mesurés sont principalement quantitatifs avec une fiabilité limitée.

4 Ne peut fournir aucune information utile.

I.4. Les contrôles non destructifs et leurs applications

I.4.1. Méthodes soniques et ultrasoniques

Les méthodes soniques et ultrasoniques sont l'ensemble des méthodes non destructives qui se basent sur la propagation des ondes mécaniques, et seront référées aux méthodes soniques. Ces méthodes, se basent donc sur la propagation du son (entre 20 Hz et 20 kHz) ou de l'ultrason (>20 kHz) dans les matériaux. Ces ondes sont sensibles aux propriétés mécaniques du milieu qu'elles traversent, tels que les modules d'élasticité, le coefficient de Poisson, et la masse volumique. En effet, la vitesse de propagation des ondes mécaniques est directement liée aux propriétés du matériau dans lequel elles se propagent. Ces méthodes peuvent être utilisées au travers de plusieurs configurations pour obtenir différentes informations à différentes échelles en fonction de la longueur d'onde utilisée. La Figure 13 illustre les différentes méthodes mécaniques en fonction des longueurs d'onde λ utilisées et de l'épaisseur d caractéristique de l'élément mesuré.

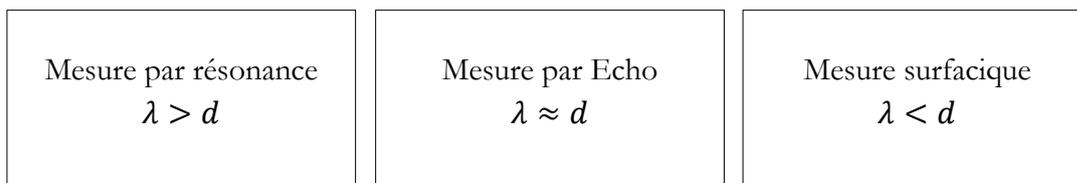


Figure 13. Classification des méthodes soniques en fonction de la longueur d'onde λ et de l'épaisseur d

I.4.1.1. Mesure par Echo

Les mesures par Echo sont des méthodes basées sur la mesure des réflexions des ondes. La plus connue et la plus utilisée à ce jour est la méthode Impact-Echo. Cette méthode non destructive initialement introduite par Sansalone and J. Carino, en (1986) a été développée pour l'auscultation des structures en béton et en maçonnerie. Elle consiste à générer des ondes en appliquant un impact mécanique sur un ouvrage, à mesurer la réponse en surface à proximité de l'impact, et ensuite analyser le spectre de celle-ci. Si un émetteur est utilisé on parle de la méthode Pulse-Echo, par contre si un impact mécanique est utilisé on parle alors de la méthode Impact-Echo. Le principe de cette mesure est la détermination du temps t que met l'onde générée à parcourir le matériau, atteindre l'interface ou le défaut et se réfléchir pour enfin revenir à la surface et être détectée par le récepteur. Ce temps peut être lié à la vitesse de propagation et la profondeur de l'interface réfléchissante.

I.4.1.2. Mesure indirecte d'impact sonique

La méthode indirecte d'impact sonique (Miranda et al., 2012) est assez similaire à la méthode Impact-Echo du point de vue du matériel utilisé et de la configuration (réception et génération des

ondes). Néanmoins, les ondes mesurées ne sont pas celles réfléchies à partir d'une rupture d'impédance mais celles qui se propagent à la surface comme les ondes de Rayleigh ou très près de la surface comme les ondes de compressions ou de cisaillement. Ici on exploite la réponse temporelle et non le spectre de fréquences comme la méthode Impact-Echo. Dans la méthode indirecte d'impact sonore, l'opérateur mesure le temps écoulé entre le début de l'impact et le début du signal reçu. Et connaissant la distance séparant l'impact et la réception, une vitesse de propagation des ondes de Rayleigh ou des ondes de compressions sera mesurée. Cette vitesse servira à caractériser l'état du milieu dans lequel la méthode est appliquée. Cette méthode présente l'avantage d'être opérée en configuration indirecte ce qui facilite l'inspection des grands ouvrages. Néanmoins, l'identification de l'arrivée des ondes dépend fortement de l'expérience de l'opérateur et le signal peut rapidement se retrouver pollué dû aux interférences entre les ondes de surface, les ondes se propageant près de la surface et les différentes ondes réfléchies par différentes interfaces ou par les défauts.

I.4.1.3. Mesure par résonance

Les techniques de résonances, connues sous le nom de méthode d'impédance mécanique, de mobilité (Davis et al., 1998), de réponse impulsionnelle (Davis et al., 2005) ou de réponse dynamique transitoire (Davis et al., 2005), sont des méthodes utilisées pour déterminer l'épaisseur ou la longueur des objets à tester. Des ondes continues sont introduites dans l'objet à tester à partir de transmetteurs ou d'oscillateurs mécaniques. La fréquence des ondes est variée jusqu'à ce qu'une condition de résonance s'installe dans l'objet de test. La résonance apparaît quand la fréquence d'excitation est égale au mode fondamental de vibration de l'objet de test. La réponse de la structure est contrôlée par un récepteur situé à proximité du transmetteur. Quand la résonance est atteinte, une augmentation considérable dans l'amplitude de la réponse est mesurée. Le mode fondamental de vibration est identifié en notant la fréquence f à laquelle cette augmentation apparaît. Si la vitesse de propagation de l'onde P dans la structure est connue, l'épaisseur de la structure testée qui est égale à la moitié de la longueur d'onde de l'onde qui se propage peut être déterminée (Sansalone and Carino, 1986).

I.4.1.4. Mesure par transmission

Dans la méthode de mesure par transmission, on mesure le temps nécessaire à une onde mécanique pour parcourir la distance entre l'émetteur et le récepteur situé sur la face opposée de l'objet à tester. A partir du temps de parcours mesuré et la distance connue entre les transducteurs, une vitesse de propagation apparente est calculée. La vitesse de propagation calculée peut être utilisée pour évaluer l'intégrité du milieu étudié. Cette approche présente toutefois quelques limitations, en effet elle nécessite deux surfaces accessibles et n'offre aucune indication sur les causes possibles de variation de la vitesse de propagation (Sansalone and Carino, 1986).

I.4.2. Méthodes électromagnétiques

I.4.2.1. Radar

Le radar est la méthode électromagnétique la plus utilisée. Les ondes électromagnétiques traversant un milieu sont influencées principalement par deux propriétés du matériau : la conductivité électrique et la constante diélectrique. La position exacte d'un objet réflecteur peut être déterminée par la mesure du temps de transit du signal et la vitesse de diffusion du matériau. La vitesse de diffusion quant à elle est une fonction de la constante diélectrique du milieu ausculté (Stablon, 2011). Le radar s'est avéré être efficace pour l'inspection des ponts en maçonnerie, en effet cette méthode permet de révéler des détails de construction, les modifications et les problèmes subis au cours du temps (Solla et al., 2011). La méthode radar permet aussi d'identifier les différentes couches composant un pont en maçonnerie et les cavités et interfaces présentes dans un mur en brique (Orbán and Gutermann, 2009).

I.4.2.2. Radiographie

Un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou γ) va pénétrer à travers un milieu solide, mais sera partiellement absorbé par le milieu. Le taux d'absorption dépend de la densité et de l'épaisseur du matériau traversé par le rayonnement, ainsi que des caractéristiques du rayonnement. Le rayonnement qui va passer à travers le matériau peut être détecté et enregistré, ce qui permet d'analyser l'image par la suite. La radiographie est capable de détecter tout élément dans une composante ou dans une structure à condition qu'il y ait des différences suffisantes d'épaisseur ou de densité dans l'élément à tester. Les principaux types de défauts qui peuvent être détectés par la radiographie sont la porosité, les vides et les inclusions, quand la densité des inclusions est différente de celle du matériau de base (McCann et Forde, 2001).

I.4.2.3. Thermographie Infrarouge

La thermographie infrarouge est un procédé dans lequel le flux de chaleur (à n'importe quelle température) peut être converti en une image thermique. La diffusion de la chaleur dans le matériau et l'impact qu'elle a sur la distribution de température de surface renseignent sur les propriétés thermo-physiques des matériaux et sur la présence d'éventuels défauts (fissures, délaminage, porosité avec humidité). Les principaux avantages de cette méthode résident dans la possibilité d'effectuer un contrôle sans contact et automatisable. Les limitations sont liées à la lenteur de ce contrôle, au coût de l'équipement et la difficulté à déterminer la profondeur du défaut détecté.

I.4.3. Méthodes électriques

I.4.3.1. Conductivité

La conductivité électromagnétique du béton ou de la maçonnerie est fonction du degré de saturation en eau des matériaux et de leurs propriétés électriques. Les champs électromagnétiques se propagent dans la structure et les variations sont contrôlées et enregistrées, ce qui permet de fournir des informations géométriques et électriques sur les matériaux étudiés et leurs degrés de saturation. Les mesures de conductivité peuvent être utilisées pour évaluer l'humidité contenue dans la maçonnerie, la teneur en sel associée à l'humidité dans la maçonnerie et l'épaisseur des murs en maçonnerie. Elle permet aussi d'identifier les matériaux composant la maçonnerie et la présence de vides ou de discontinuités dans un mur (McCann et Forde, 2001).

I.4.3.2. Méthodes de résistivité électrique

La méthode de résistivité électrique est utilisée pour évaluer la probabilité de présence de corrosion importante dans des structures en béton armé. Les électrodes sont déployées dans une configuration de Wenner à séparation constante et sont utilisées pour cartographier la variation de la résistivité électrique de la surface contrôlée. Ces variations peuvent être reliées à la capacité des courants de corrosion à traverser le béton, qui est fonction du rapport eau/ciment, de la teneur en humidité et de la teneur en sel. Le problème associé à cette méthode est la nécessité de percer des petits trous afin d'assurer un contact optimal entre l'électrode et la surface du béton (McCann et Forde, 2001).

I.4.3.3. Méthode des courants de Foucault

Cette méthode consiste à créer, dans des matériaux conducteurs électriques, des courants induits par un champ magnétique variable, au moyen d'un capteur. Ces courants induits, appelés courants de Foucault, circulent localement dans le matériau et ont une distribution et une répartition qui dépendent du champ magnétique d'excitation, de la géométrie et des caractéristiques de conductivité électrique et de perméabilité magnétique de la pièce examinée. En présence d'une anomalie dans la pièce contrôlée, leurs déplacements sont perturbés, entraînant ainsi une variation de l'impédance apparente du capteur qui dépend de la nature de l'anomalie et de sa dimension en volume. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournit les indications exploitables pour effectuer le contrôle.

I.4.4. Conclusion sur les contrôles non destructifs

Le Tableau 5 résume les différentes méthodes non destructives utilisées pour évaluer les ponts en béton (Rehman et al., 2016), les ponts en maçonnerie (Orbán and Gutermann, 2009) et les revêtements des tunnels (Haack et al., 1995). Pour l'évaluation des ponts en maçonnerie, la

méthode radar et les méthodes soniques et ultrasoniques semblent les plus prometteuses. En effet, les deux méthodes permettent une pénétration importante de l'onde, la détection des vides et des défauts et l'estimation de la profondeur des matériaux auscultés. Néanmoins, le contrôle par le Radar est limité par la nature des matériaux, car la propagation des ondes électromagnétiques est fortement atténuée dans les matériaux hydrauliques et les bétons.

L'application des méthodes soniques et ultrasoniques à l'auscultation des structures en maçonnerie apparaît donc être la méthode qui répond le plus à nos attentes, surtout que la vitesse de propagation des ondes mécaniques à travers un milieu est directement proportionnelle aux propriétés mécaniques de la maçonnerie (Orbán and Gutermann, 2009), tel que le module d'Young, le coefficient de Poisson et la masse volumique. En raison de leur importante pénétration dans les matériaux structurels, les méthodes soniques seront privilégiées.

Tableau 5. Capacités et limitations des méthodes d'essai non destructives
(Haack et al., 1995; Kashif Ur Rehman et al., 2016; Orbán and Gutermann, 2009)

Méthodes		Application/Avantages	Inconvénients
Méthodes soniques		<ul style="list-style-type: none"> • Détection des vides/défauts et des fissures • Informations sur la géométrie cachée • Informations sur l'intégrité structurelle • Mesures de la vitesse de propagation des ondes mécaniques • Détermination de la profondeur d'un défaut ou d'une discontinuité • Pénétration en profondeur importante 	<ul style="list-style-type: none"> • Couplage avec d'autres méthodes nécessaires • Spécialiste requis pour l'étalonnage et l'interprétation • Méthode particulièrement lente • Manque de précision à cause de la non-homogénéité des matériaux (surtout la maçonnerie) • Difficulté à coupler le capteur pour les surfaces rugueuses
Les Méthodes Electromagnétiques	Radar	<ul style="list-style-type: none"> • Détection des vides • Géométrie cachée • Distribution de l'humidité dans la maçonnerie et le remplissage • Pénétration en profondeur importante 	<ul style="list-style-type: none"> • Un spécialiste est requis pour l'interprétation • Ne s'applique pas dans un environnement conducteur • Ne permet pas de détecter les défauts de petite taille • Méthode coûteuse par rapport aux autres CND
	Radiographie	<ul style="list-style-type: none"> • Détection de la porosité • Détection des vides et des inclusions • Détection des fissures internes 	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition à la radiation • Ne permet pas une pénétration importante • Un spécialiste est requis pour l'interprétation
	Conductivité	<ul style="list-style-type: none"> • Fourniture des informations géométriques sur les matériaux • Détermination du degré de saturation des matériaux • Evaluation de l'épaisseur des murs 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne permet pas une pénétration importante
Les Méthodes Electriques	Les méthodes électriques	<ul style="list-style-type: none"> • Détection de la présence de corrosion • Détection de l'humidité 	<ul style="list-style-type: none"> • La surface doit être préalablement mouillée • Ne permet pas une pénétration importante
	Thermographie infrarouge	<ul style="list-style-type: none"> • Détection des cavités et du délaminage • Identification à distance des matériaux • Détection des zones humides 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible profondeur de pénétration • Spécialiste requis pour l'interprétation • Sensible aux conditions de surface

I.5. Les méthodes soniques

Il existe une variété de techniques basées sur la propagation des ondes mécaniques pour l'évaluation non destructive des structures. La différence principale entre ces méthodes réside dans la manière de positionner les transducteurs, et la façon de générer et recevoir les ondes mécaniques. On rappelle dans ce qui suit le principe théorique de la propagation des ondes et on présente les différentes ondes susceptibles de se propager dans un matériau.

I.5.1. Principes théoriques

Le terme *onde* représente la propagation des perturbations d'un milieu par rapport à sa position d'équilibre. Pour les ondes mécaniques, la perturbation est un déplacement d'une particule du milieu autour de sa position d'équilibre, cette dernière reprendra sa position initiale une fois l'onde passée. Dans un milieu élastique, et en l'absence de force extérieure, la relation fondamentale de la dynamique s'écrit :

$$\operatorname{div} \sigma + \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{I-1})$$

La *loi de Hooke* reliant les contraintes aux déformations avec les coefficients de lamé (λ et μ) est:

$$\sigma = \lambda \cdot \operatorname{tr}(\vec{u})I + 2\mu(\vec{u}) \quad (\text{I-2})$$

En appliquant la *loi de Hooke* en milieu isotrope, élastique et homogène à l'équation fondamentale de la dynamique on obtient :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\operatorname{div}(\vec{u})) + \mu \overrightarrow{\operatorname{rot}}(\overrightarrow{\operatorname{rot}}(\vec{u})) \quad (\text{I-3})$$

Pour résoudre cette équation, on décompose le \vec{u} en un potentiel scalaire ($\overrightarrow{\operatorname{grad}}(\varphi)$) et un potentiel vectoriel ($\overrightarrow{\operatorname{rot}}(\psi)$) suivant la décomposition de *Helmholtz* :

$$\vec{u} = \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\varphi) + \overrightarrow{\operatorname{rot}}(\psi) \quad (\text{I-4})$$

L'Eq.(I-3) devient :

$$\overrightarrow{grad} \left[(\lambda + 2\mu)\Delta\varphi - \rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right] + \overrightarrow{rot} \left[\mu\Delta\psi - \rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \right] = 0 \quad (I-5)$$

Le potentiel scalaire φ décrit la loi de propagation d'une onde de compression (appelée également onde P, onde Primaire ou onde longitudinale), dont le déplacement se fait parallèlement à la direction de propagation (Figure 14.(a)). Le potentiel vectoriel ψ décrit la loi de propagation d'une onde de cisaillement (appelée également onde S, onde Secondaire ou onde transversale), dont le déplacement se fait perpendiculairement à la direction de propagation (Figure 14.(b)). L'Eq.(I-5) conduit aux deux équations de propagation d'Alembert :

$$\begin{cases} V_P^2 \Delta\varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \\ V_S^2 \Delta\psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (I-6)$$

V_P et V_S sont respectivement les vitesses de propagation des ondes P et S dans le matériau. La propagation des ondes dans un milieu élastique homogène isotrope infini peut donc se faire selon deux modes S et P, donc les vitesses dépendent des propriétés mécaniques des matériaux (les coefficients λ et μ). Il est également possible d'exprimer ces coefficients en fonction d'autres constantes élastiques comme le module d'Young E ou le coefficient de Poisson ν :

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (I-7)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 + \nu)}} \quad (I-8)$$

Malgré les fortes hypothèses ayant été faites lors du calcul (élasticité, isotropie, milieu infini et homogène) ces expressions restent plus ou moins valables dans le cas de matériaux réels. (Chekroun, 2008). Il est donc possible de remonter aux propriétés mécaniques des matériaux.

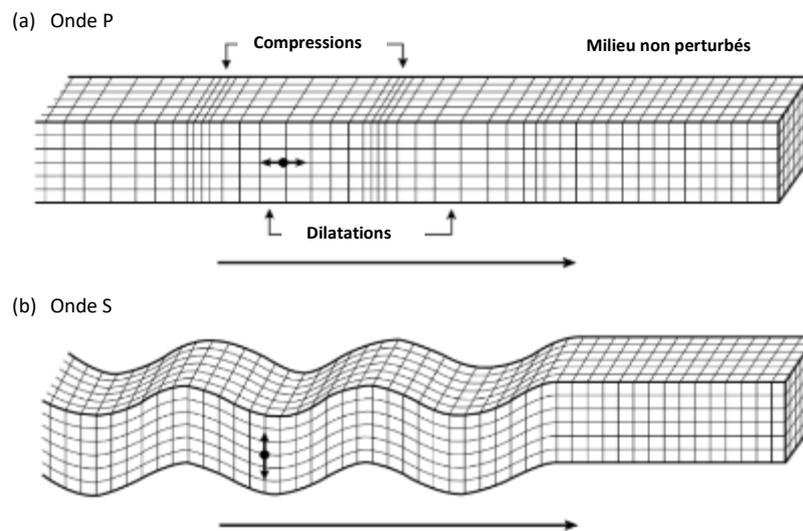


Figure 14. Schéma de principe de propagation des ondes de volumes (a) Onde P (b) Onde S (Kearey et al., 2002)

Ondes de Rayleigh

Les modes de propagation P et S sont appelées ondes de volume. Elles se propagent dans tout le matériau et sont définies pour un milieu infini. En présence de conditions aux limites liées au caractère fini du milieu (présence d'interfaces), d'autres types d'ondes apparaissent. L'onde de Rayleigh (couramment appelée l'onde R) est l'onde de surface la plus couramment utilisée (Kim et al., 2006; Miranda et al., 2015, 2012). Elle a été introduite par *John William Strutt Rayleigh* en 1885. Son déplacement est assez complexe (Figure 15), assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, constituant un mouvement à la fois horizontal et vertical, appelé mouvement Rétrograde elliptique (Sansalone and Carino, 1986).

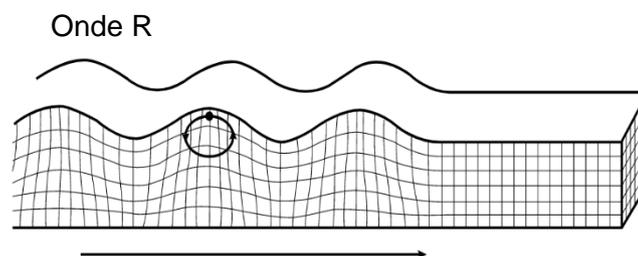


Figure 15. Schéma de principe de propagation l'onde de Rayleigh (Mouton et al., 2007)

L'onde R est plus énergétique que l'onde P et l'onde S au voisinage de la surface, ce qui la rend plus facile à observer et à mesurer. Sa profondeur de pénétration est de l'ordre de la demi-longueur d'onde. La vitesse d'onde de Rayleigh en milieu semi-infini élastique homogène et isotrope est :

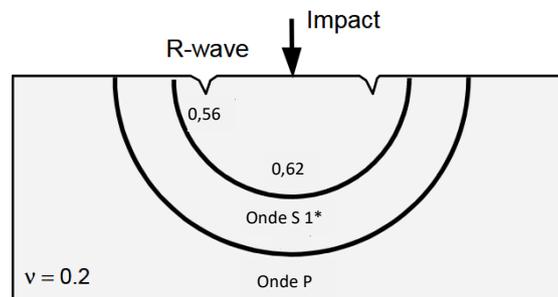
$$V_R = \frac{0,87 + 1,2\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 + \nu)}} = \frac{0,87 + 1,2\nu}{1 + \nu} V_S \quad (I-9)$$

Les ondes de Rayleigh sont les ondes au contenu énergétique le plus élevé, en effet elles contiennent 67,35% de l'énergie totale contre 6,89% pour les ondes P et 27,76% pour les ondes S (Carino, 2015; Miranda et al., 2015; Sánchez-Sesma et al., 2011). Il convient aussi de mentionner que l'onde P est plus rapide que les ondes S et R ($V_S = 0,61V_P$ et $V_R = 0,56V_P$ pour des matériaux ayant un coefficient de Poisson de 0,2 comme par exemple le béton). Le Tableau 6 résume les vitesses des ondes (P, S et R) et les densités volumiques pour différentes roches. La Figure 16 illustre la propagation des ondes P (compression) et des ondes S (cisaillement) le long du front d'onde sphérique et celle de l'onde R qui se propage en surface.

Tableau 6. Vitesse des ondes mécaniques et masse volumique dans les roches (Sansalone and Carino, 1986)

Matériaux	Masse volumique (kg/m ³)	V _P (m/s)	V _S (m/s)	V _R (m/s)*
Granite	1800-2500	5000-6000	2500-3300	2325-3096
Basalte	2700-3100	5400-6400	2700-3500	2511-3255
Gneiss	2500-2700	4400-5200	2700-3200	2500-3000
Marbre	2650-2750	3700-7000	-	-
Quartzite	2620	5600-6100	3400-3700	3100-3400
Grès	1600-1900	1400-4300	-	-
Calcaire	2000-2800	5900-6100	2800-3100	2604-2883
Sable Humide	1900-2100	1500-2000	400-600	370-550
Sable Sec	1500-1700	400-1200	100-500	90-460
Brique	2000	2700	1650	1500

*Vitesse approximative $V_R = 0.93V_S$



*Nombre indiquent les vitesses relatives des ondes

Figure 16. Différentes ondes mécaniques générées suite à un impact sur la surface d'une plaque en béton

Autres types d'ondes

En plus des types d'ondes mentionnées ci-dessus, on peut distinguer d'autres types d'ondes en fonction de la nature de la surface. Lorsque le milieu semi-infini est surmonté d'une couche d'épaisseur finie, on peut avoir une onde de *Love*, dont le déplacement est un cisaillement horizontal. On peut notamment citer l'onde *Stoneley* qui se propage le long de l'interface entre deux milieux semi-infinis. Lorsqu'il s'agit d'une interface entre un milieu solide et un milieu liquide, on parle d'onde de *Scholte* (Chekroun, 2008). Enfin, les ondes de *Lamb* font référence aux ondes guidées par deux surfaces libres parallèles (Simonin, 2005).

I.5.2. Comportement des ondes aux interfaces

Une interface est définie comme une limite entre deux matériaux ayant différentes propriétés acoustiques. La propriété qui détermine le comportement de l'onde mécanique à l'interface est l'impédance acoustique (Eq.(I-10)), plus précisément la différence relative d'impédance acoustique entre deux matériaux.

$$Z = \rho V \quad (\text{I-10})$$

avec ρ la masse volumique du milieu et V la vitesse de propagation des ondes P ou S selon l'objectif de l'étude. Quand une onde mécanique atteint une interface entre deux milieux ayant des propriétés acoustiques différentes, une partie va être réfléchiée et une autre partie va être réfractée. Les amplitudes des ondes réfléchiées et réfractées sont données par :

$$A_{\text{réfléchiée}} = A_i \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad (\text{I-11})$$

$$A_{\text{réfractée}} = A_i \frac{(2Z_2)}{(Z_2 + Z_1)} \quad (\text{I-12})$$

avec Z_1 l'impédance acoustique du milieu 1 et Z_2 l'impédance mécanique du milieu 2. La mesure de la profondeur d'une interface entre deux matériaux n'est possible que si la réflexion des ondes au niveau de cette dernière est suffisante, une valeur absolue du coefficient de réflexion R (Eq.(I-13)) doit être supérieure à 0,24 (Simonin, 2005). Dans le cas contraire une interface n'est a priori pas détectable. Le Tableau 7 donne les impédances acoustiques spécifiques de quelques matériaux.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{I-13})$$

Tableau 7. Impédance Acoustiques Spécifique (Sansalone and Carino, 1986)

Matériaux	Z [kg/(m ² .s)]
Air	0,413
Béton	6,9 - 10,4 × 10 ⁶
Granite	15,1 - 16,8 × 10 ⁶
Calcaire	7,5 - 18,8 × 10 ⁶
Marbre	9,8 - 18,3 × 10 ⁶
Quartzite	14,7 - 18,0 × 10 ⁶
Sols	0,28 - 4,3 × 10 ⁶
Acier de construction	46,6 10 ⁶
Eau	1,48 10 ⁶

I.5.3. Divergence et Atténuation

Au fur et à mesure que l'onde P se propage dans le milieu solide, l'amplitude du mouvement des particules et donc l'énergie associée à l'onde diminue avec la distance parcourue à cause de la divergence et de l'atténuation. La divergence résulte de la diffusion des fronts d'onde lorsqu'elles se propagent. Pour les ondes sphériques générées par impact, l'énergie diminue inversement proportionnelle à la distance de la source d'impact. L'atténuation est causée par l'absorption et la dispersion. L'absorption résulte de la friction interne et la production de chaleur. La dispersion quant à elle résulte des réflexions, des réfractions et de la conversion des ondes aux discontinuités ou aux interfaces dans le milieu.

I.5.4. Génération et réception des ondes mécaniques

I.5.4.1. Génération par choc

La génération d'ondes mécaniques peut être obtenue en appliquant une déformation locale, à l'aide d'un choc, sur la surface du matériau. Les fréquences obtenues par ce type de source augmentent avec la diminution de la surface de contact entre l'impacteur et le matériau. En effet l'utilisation d'un marteau d'impact permet d'exciter en basse fréquence (<1,5 kHz) (Chekroun, 2008) et l'impact d'une petite bille en acier permet d'obtenir des fréquences plus importantes de l'ordre de 20kHz. Les avantages de ce type de source résident dans leur ponctualité, leur faible coût et la simplicité de leur utilisation. Cependant leurs principaux défauts c'est d'être très peu énergétiques, ce qui limite les distances de propagation étudiées. En plus, elles excitent tous les

types d'ondes possibles ce qui rend assez difficile l'exploitation des résultats et la répétitivité n'est pas assurée.

I.5.4.2. Utilisation des transducteurs

Contrairement aux impacteurs mécaniques, l'utilisation des transducteurs permet de contrôler la durée et la forme de l'impulsion afin d'avoir une source répétitive et énergétique. Les transducteurs sont les moyens de génération et de détection les plus couramment utilisés dans le contrôle non destructif des matériaux. Les inconvénients majeurs des transducteurs sont leurs dimensions parfois imposantes pouvant aller jusqu'à plusieurs centimètres de diamètre. De plus on ne peut pas déterminer de manière exacte le point d'émission ou le point de réception. Enfin un couplant (gel ou colle) doit être utilisé entre le transducteur et le matériau à ausculter, ce qui peut dégrader la répétabilité des mesures et allonger le temps de mise en place de la mesure (Chekroun, 2008).

I.5.4.3. Configuration des méthodes mécaniques

Les méthodes mécaniques diffèrent en fonction du positionnement relatif de l'émetteur ou du capteur. Chaque positionnement permet de détecter des ondes différentes et chaque type de transducteur (émetteur ou récepteur) permet de générer et recevoir des ondes à différentes fréquences. Il existe trois types de configurations : la configuration directe, la configuration semi-directe et la configuration indirecte.

La configuration directe

On parle de configuration directe (Figure 17) quand l'émetteur et le récepteur sont placés sur les deux faces opposées de l'élément testé. Cette configuration est conseillée pour accéder aux vitesses des ondes P. En effet ces ondes se propagent principalement le long de la direction de l'impact causant des déplacements longitudinaux et donc, les vibrations des particules sont mesurées sur le côté opposé de l'impact (Miranda et al., 2015). A travers cette méthode on peut mesurer le temps que met l'onde de compression, initiée sur un côté de la structure, pour parcourir la distance entre l'émetteur et le récepteur localisés sur la face opposée à la surface du test. A partir du temps de parcours mesuré t et connaissant la distance entre les transducteurs d , une vitesse de pulsion apparente est mesurée V_P (Eq.(I-14)) (Sansalone and Carino, 1986).

$$V_P = \frac{d}{t} \quad (\text{I-14})$$

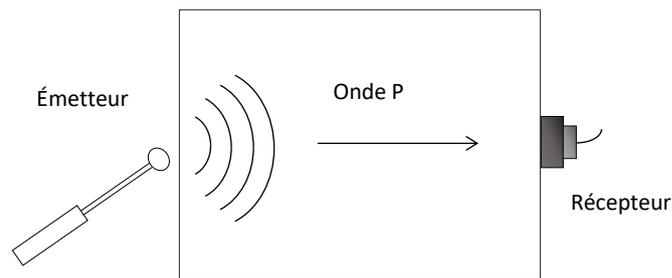


Figure 17. Configuration directe

Cette configuration a été utilisée avec succès pour évaluer l'homogénéité du matériau, détecter la présence de vides et déterminer les propriétés mécaniques du matériau. La détection des défauts est aussi possible, en effet les ondes mécaniques ne peuvent être transmises à travers un vide contenant de l'air, qui peut être dû à une fissure, à des pores ou un à délaminage à l'interface entre briques (ou pierres) et mortier. L'onde devra donc contourner le vide ce qui induira une atténuation et une augmentation dans le temps de transit du signal (McCann et Forde, 2001) et par conséquent diminuera la vitesse de propagation.

Cette méthode présente néanmoins des limitations. Premièrement, elle nécessite deux faces accessibles. Deuxièmement, la vitesse d'onde résultante est une moyenne de la vitesse locale le long du trajet et enfin, il n'est pas possible d'établir la position et l'étendue de toute inhomogénéité possible (Sansalone and Carino, 1986). Binda et al., (2001) ont utilisé la configuration directe sur des murs et des piliers anciens en maçonnerie afin de qualifier leur état et éventuellement localiser les dommages. Ceci était obtenu en mesurant la vitesse de propagation des ondes et en évaluant sa variation avec l'état d'endommagement du matériau. Miranda et al., (2015) ont utilisé cette configuration pour calculer les vitesses de propagation des pierres constituant des murs en maçonnerie de manière individuelle sans prendre en compte l'influence des joints pour remonter ensuite au module d'Young à partir de la formule Eq.(I-7).

La configuration semi-directe

On parle de configuration semi-directe (Figure 18) quand l'émetteur et le récepteur sont placés sur des faces adjacentes de l'élément testé. Cette configuration est utilisée pour accéder aux vitesses des ondes S. Comme mentionné précédemment, les ondes S provoquent des déplacements normaux à la surface d'impact, et par conséquent à la direction de propagation (Miranda et al., 2015). Les ondes S n'ont pas été beaucoup utilisées en comparaison des ondes P et R, essentiellement à cause du type de configuration, en effet l'accessibilité à deux surfaces adjacentes n'est pas toujours évidente dans des ouvrages tels que les ponts ou les tunnels à moins d'être placés dans des extrémités des ouvrages. C'est pour cette raison que les configurations indirectes sont les plus utilisées.

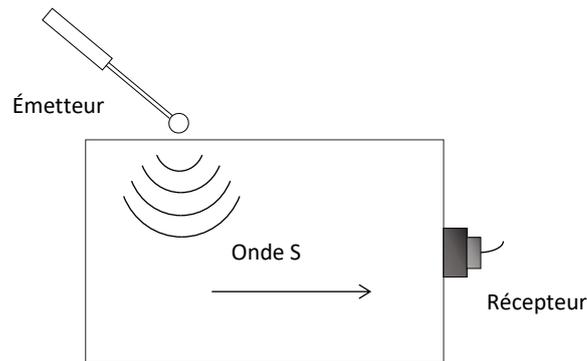


Figure 18. Configuration semi-directe

La configuration indirecte

On parle de configuration indirecte quand deux transducteurs (émetteur et récepteur) sont placés sur la même surface (Figure 19). Cette configuration est la plus utilisée pour l'évaluation des ouvrages d'art parce qu'elle ne nécessite qu'une seule surface accessible pour effectuer l'essai. Contrairement aux autres configurations, celle-ci la permet d'accéder aux ondes R, car ce type d'onde diffuse le long de la surface d'impact. Il est possible de détecter différentes ondes dans une même configuration, en effet dans la configuration indirecte, à part les ondes R, le récepteur va aussi détecter les ondes P et S réfléchies à partir d'un défaut, d'une interface ou d'une surface externe présente dans l'objet testé. Cette méthode est connue sous le nom de la méthode d'Impact-Echo (ou la méthode Pulse-Echo dépendant du type d'émetteur) qui est une méthode de contrôle non destructive initialement développée pour l'auscultation des structures en béton armé et en maçonnerie (Sansalone and Carino, 1986).

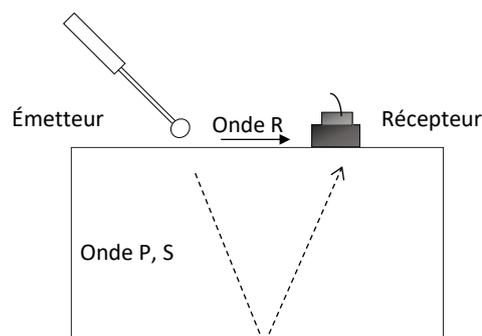


Figure 19. Configuration indirecte

I.5.5. Conclusion sur les méthodes soniques

Il existe différentes méthodes mécaniques qui se basent sur différentes configurations. La configuration qui a retenu notre attention est la configuration indirecte. Dans ce travail nous nous

intéressons à l'évaluation des grandes structures, les ponts en maçonnerie par exemple, qui ne sont généralement accessibles que d'un seul côté, d'où le choix de cette configuration. Les méthodes mécaniques pouvant être effectuées en configuration indirecte sont :

- La mesure par Echo (Sansalone and Streett, 1997) connue aussi sous le nom de méthode d'Impact-Echo où l'on s'intéresse aux réflexions des ondes générées par Impact ;
- La mesure des ondes se propageant à la surface (les ondes R) ou près de la surface (ondes P et S), connue sous le nom de méthode Indirecte d'Impact Sonique (Miranda et al., 2012)
- La mesure par résonance (Sansalone and Carino, 1986) connue aussi sous le nom de méthode d'impédance mécanique.

Ces méthodes utilisent certes les mêmes configurations mais ne donnent pas les mêmes informations. En effet, la méthode Indirecte d'Impact Sonique permet de calculer une vitesse de propagation localisée près de la surface pour remonter ensuite à un module d'Young qui permettra de caractériser l'état de la matière se situant près de la surface. Cette méthode dépend fortement de l'observation et de l'expérience de l'opérateur et ne permet d'évaluer que les premiers centimètres au-dessous de la surface. La méthode d'impédance mécanique, a été développée pour tester principalement les fondations profondes et permet essentiellement de déterminer les longueurs des piles et leurs raideurs dynamiques (Davis, 2003). Cette méthode, opère essentiellement en très basses fréquences < 1 kHz pour des épaisseurs correspondant aux éléments fondations. La méthode d'Impact-Echo quant à elle, est une méthode qui permet d'opérer à des fréquences qui correspondent aux grandeurs des éléments de structures des ponts (par opposition à la méthode d'Impédance mécanique). Contrairement à la méthode Indirecte d'Impact Sonique, elle permet de renseigner sur l'état du milieu en profondeur et pas seulement en surface ou près de cette dernière.

Dans ces travaux de thèse nous avons choisi de travailler avec la méthode mécanique d'Impact-Echo dont on présente l'état de l'art dans le paragraphe suivant.

I.6. La méthode Impact-Echo

I.6.1. Introduction

Sansalone et Street (1997) définissent l'Impact-Echo comme étant une méthode d'évaluation non destructive des structures en béton et en maçonnerie, basée sur l'utilisation des ondes de compression générées par impact, qui se propagent à travers le béton ou la maçonnerie et se réfléchissent par les interfaces, les défauts internes ou les surfaces externes de la structure. L'Impact-Echo peut être utilisée pour déterminer des épaisseurs et/ou localiser les défauts dans les structures en béton et en maçonnerie. Pour réussir un essai sur des structures et déterminer ce qu'il y a en profondeur, une maîtrise du fonctionnement de la méthode et une connaissance de la structure auscultée sont primordiales et indispensables.

I.6.2. Principe de fonctionnement de la méthode Impact-Echo

L'Impact-Echo est basée sur l'utilisation des ondes de compression générées par un impact mécanique. La Figure 20 illustre bien le principe de cette méthode. Un impact mécanique de courte durée, produit en tapant (cognant) une bille métallique sur une surface en béton ou en maçonnerie, est utilisé pour générer des ondes de compression généralement à basses fréquences. Ces ondes vont se propager dans la structure et se réfléchir sur les défauts internes, les interfaces et les surfaces externes. Les déplacements de surface causés par ces réflexions sont mesurés par un transducteur, adjacent au point d'impact. Les signaux résultants en fonction du temps sont transformés dans le domaine fréquentiel. Les réflexions multiples des ondes de compression entre la surface d'impact, les défauts, les interfaces et les surfaces extérieures donnent lieu à des résonances transitoires (Sansalone and Streett, 1997), qui peuvent être identifiées à partir des spectres de fréquences et utilisées pour évaluer l'intégrité de la structure et pour localiser les défauts. La fréquence f de l'arrivée de l'onde P, qui est inverse au temps écoulé entre l'impact et l'arrivée de l'onde à la surface est donnée par l'équation suivante :

$$f = \frac{V_p}{nP} \quad (\text{I-15})$$

Avec V_p la vitesse de propagation des ondes P, P l'épaisseur de la structure auscultée et n un facteur constant égal à 2 ou à 4 et qui dépend des impédances acoustiques des milieux de part et d'autre de l'interface réfléchissante. Soient Z_1 et Z_2 les impédances acoustiques des milieux 1 et 2 respectivement. Si $Z_1 > Z_2$ alors $n = 2$ dans le cas contraire $n = 4$. L'Eq.(I-15) a été introduite par Sansalone et J. Carino en 1986 et a été utilisée jusqu'en 1996. En 1997, et après une série intensive d'essais en laboratoire et des simulations numériques par éléments finis sur la propagation des ondes mécaniques dans des structures en béton de différentes formes géométriques, Sansalone et Street (1977) concluent que l'équation est incomplète et introduisent un coefficient β appelé 'facteur géométrique', qui dépend de la forme géométrique de la structure, comme son nom l'indique. L'équation (I-15) devient alors :

$$f = \frac{\beta V_p}{nP} \quad (\text{I-16})$$

Dans le cas des structures en forme de plaques, le facteur géométrique $\beta = 0,96$. Le Tableau 8 résume les différentes valeurs du facteur géométrique β pour les formes géométriques les plus courantes dans le domaine du génie civil. Ces valeurs dépendent de la forme géométrique et non de la matière, par conséquent elles seraient valables aussi bien pour le béton que pour la maçonnerie.

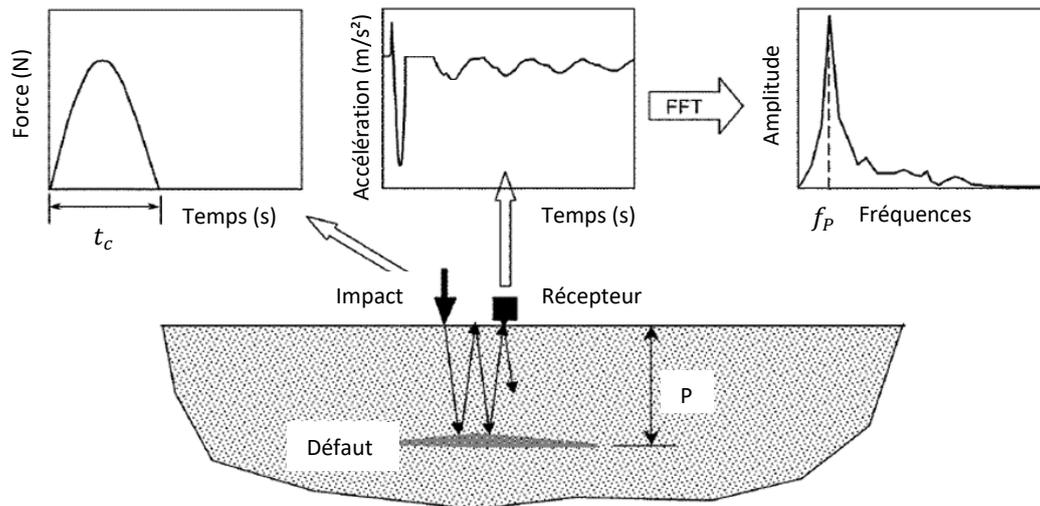


Figure 20. Schéma de la méthode Impact-Echo (Carino, 2015)

Tableau 8. Facteurs géométriques en fonction de la géométrie (Sansalone and Streett, 1997)

Forme géométrique	Facteur géométrique β
Plaque	0,96
Barre carrée	0,89
Colonne circulaire	0,92
Barre rectangulaire	0,75-0,96*

*Les valeurs de β pour une barre rectangulaire dépendent des dimensions caractéristiques de la section transversale du rectangle

I.6.2.1. Génération des ondes mécaniques

Les ondes mécaniques peuvent être générées par n'importe quel mécanisme capable de produire une force qui varie rapidement avec le temps. Dans l'Impact-Echo les ondes mécaniques sont générées par un impact qui consiste généralement à cogner avec une petite bille métallique sur la surface d'une structure (en béton ou en maçonnerie). Les paramètres les plus importants qui peuvent caractériser l'impact sont sa durée t_c et le diamètre de la bille D . La relation entre ces paramètres est expliquée par la théorie de Hertz de l'impact élastique. L'impact est défini comme la collision de deux solides. Dans un Essai Impact-Echo, cette collision est représentée par l'impact élastique d'une bille en acier sur une surface solide. La durée de cet impact est courte et varie approximativement de 20 à 90 μs . Pendant l'impact une partie de l'énergie potentielle de la sphère est transférée dans le solide sous forme d'énergie de l'onde élastique.

Le temps de contact t_c est une fonction linéaire du diamètre de la sphère, et a une très faible dépendance vis-à-vis de l'énergie cinématique. Pour une bille en acier tombée sur une dalle en béton d'une hauteur h , le temps t_c est approximé par :

$$t_c = 0,00858 \frac{D}{h^{0,1}} \quad (\text{I-17})$$

avec D le diamètre de la bille en acier et h la hauteur de chute.

En pratique, la bille en acier n'est généralement pas 'lâchée', mais attachée à une tige en acier et mécaniquement impactée sur la surface solide. La hauteur équivalente h de cet impact varie typiquement de 0,2 à 4 m ce qui correspond à une variation de $h^{0,1}$ de 0,85 à 1,15 (Sansalone and Streett, 1997). La dépendance du temps de contact sur la hauteur de chute (sur l'énergie cinétique de l'impact de la sphère) est faible et peut être négligé, ce qui conduit à une relation très simple entre le temps de contact et les diamètres de la sphère.

$$t_c = 0,0043D \quad (\text{I-18})$$

Les ondes mécaniques générées par impact sont composées d'une large distribution de fréquences, qui peut être déterminée à partir de la fonction temps-force de l'impact. Cette distribution d'amplitude produite par l'impact d'une sphère sur un solide avec un temps de contact t_c est représentée sur la Figure 20. Cette distribution est obtenue en calculant la *Transformée de Fourier* de l'impact. L'expérience a montré que la fréquence maximale utile f_{max} comme on peut le voir sur la Figure 20 peut être calculée comme suit (Sansalone and Streett, 1997) :

$$f_{max} = \frac{1,25}{t_c} \quad (\text{I-19})$$

En combinant les équations (I-19) et (I-20) on obtient une équation reliant directement f_{max} (Hz) et le diamètre D (m) :

$$f_{max} = \frac{291}{D} \quad (\text{I-20})$$

La variation de la force d'impact en fonction du temps peut être représentée par un demi-sinus Eq.(I-21) (Sansalone and Carino, 1986), un demi-sinus carré ou un demi-sinus cube (Pradhan, 2014) (Figure 21). Les durées d'impact entre la bille en acier et la surface d'impact peuvent aller de 20 à 90 μs . La Figure 22 présente le spectre d'amplitude correspondant à la partie exploitable ou utile à l'interprétation.

$$F = F_{max} \sin\left(\pi \frac{t}{t_c}\right) \quad (\text{I-21})$$

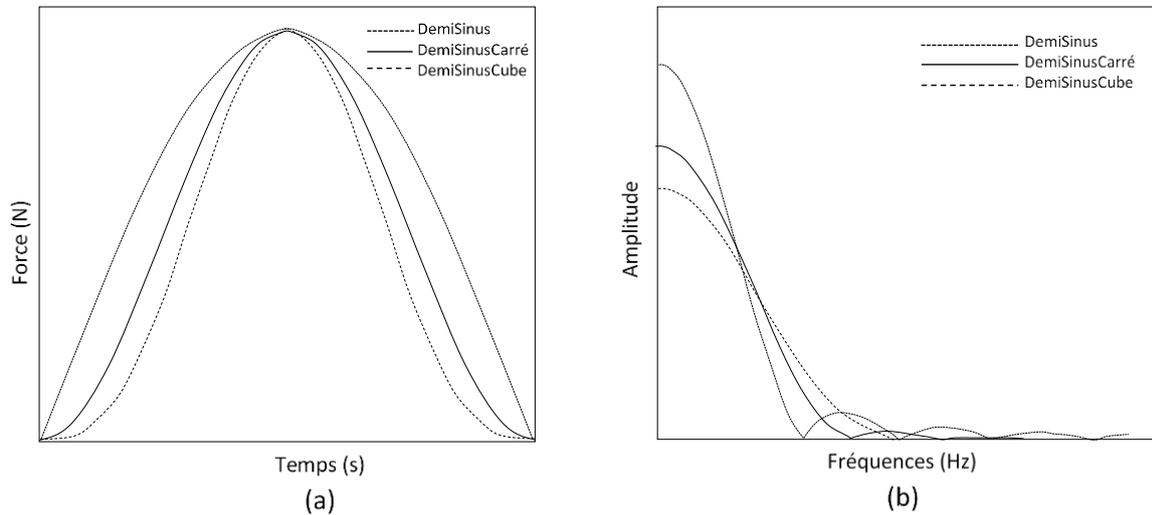


Figure 21. Différents chargements pouvant correspondre à un impact d'une sphère sur un solide
(a) Domaine temporel. (b) Domaine fréquentiel

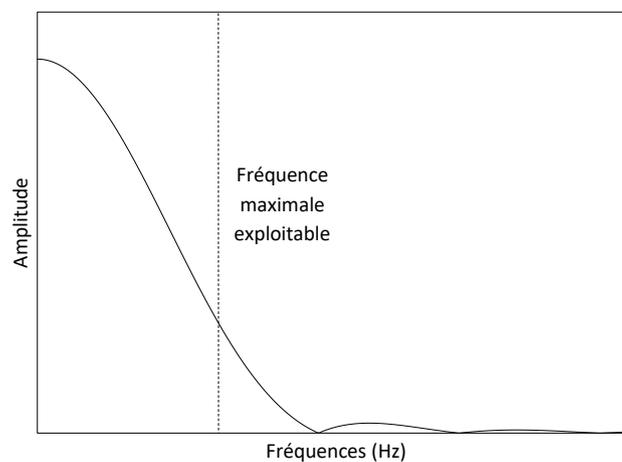


Figure 22. Spectre d'amplitude correspondant à la partie exploitable pour l'interprétation

I.6.2.2. Réception des ondes mécaniques

La réponse est généralement mesurée à proximité de l'impact à l'aide d'un transducteur capable de mesurer un déplacement, une vitesse ou une accélération. Sansalone and Carino, (1986)

recommandent une distance H/P comprise entre 0,2 et 0,5, où H est la distance entre le point d'impact et le point de mesure et P l'épaisseur de la plaque comme l'indique la Figure 23.

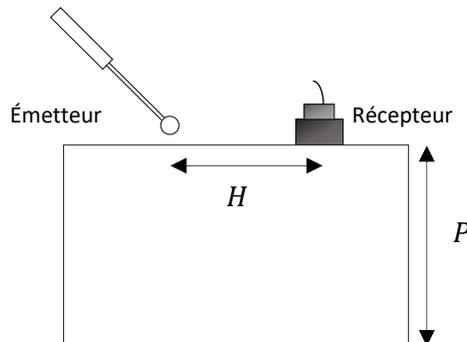


Figure 23. Disposition d'un essai Impact-Echo

I.6.2.3. Paramètres d'acquisition des données

Dans l'Impact-Echo, l'onde mesurée dans le domaine temporel est obtenue en échantillonnant les données de sortie à des petits pas de temps. Ainsi la forme d'onde obtenue sera composée d'une série de points discrets plutôt qu'une fonction continue. Une fois la réponse temporelle mesurée, cette dernière sera transformée dans le domaine fréquentiel. La Transformée de Fourier Rapide (TFR) est l'outil mathématique utilisé pour convertir la réponse temporelle dans le domaine fréquentiel. S'il y a N intervalles dans la réponse temporelle échantillonnée, le résultat de la TFR sera une série de $(N/2) + 1$ nombres complexes (soit $N/2$ intervalles), conformément au théorème de Shannon qui énonce que la représentation discrète d'un signal exige des échantillons régulièrement espacés à une fréquence d'échantillonnage supérieure au double de la fréquence maximale présente dans ce signal. La TFR est un algorithme efficace pour effectuer les calculs de la transformée de Fourier discrète (TFD). La TFR est conçue pour fonctionner avec un enregistrement du domaine temporel ayant un nombre d'intervalles égal à une puissance de 2. Typiquement les nombres d'intervalles dans la réponse temporelle dans la forme d'onde sont : $2^9 = 512$, $2^{10} = 1024$, $2^{11} = 2048$ ou $2^{12} = 4096$. La compréhension des relations entre les paramètres d'acquisition des données utilisées pour acquérir la forme d'onde dans le domaine temporel est essentielle pour les utilisateurs de la méthode Impact-Echo. Les principaux paramètres comprennent :

- L'intervalle d'échantillonnage Δt
- La fréquence d'échantillonnage $f_e = 1/\Delta t$
- Longueur d'enregistrement $N\Delta t$
- L'intervalle de fréquence Δf

L'*intervalle d'échantillonnage* est le temps entre chaque point d'échantillonnage dans la forme d'onde du domaine temporel. L'inverse de l'intervalle d'échantillonnage est la *fréquence d'échantillonnage*. Quand la forme d'onde est transformée dans le domaine fréquentiel, la fréquence maximale dans le spectre d'amplitude est la moitié de la fréquence d'échantillonnage (Théorème de Shannon). La *longueur d'enregistrement* est le nombre d'intervalles dans la forme d'onde du domaine temporel multiplié par l'intervalle d'échantillonnage. Ces paramètres sont très importants, en effet ils affectent directement le spectre d'amplitude. L'*intervalle de fréquence* est l'inverse de la longueur d'enregistrement. Tous les paramètres évoqués ci-dessus sont résumés dans le Tableau 9 avec deux exemples, afin de faciliter leur compréhension.

Tableau 9. Paramètres d'acquisition (Carino, 2015)

Paramètres		Exemples	
Symboles	Description	Exemple 1	Exemple 2
Δt	Intervalle d'échantillonnage, temps entre deux points successifs.	2 μ s	4 μ s
f_s	Fréquence d'échantillonnage, inverse de Δt .	500 kHz	250 kHz
f_{max}	Fréquence maximale dans le spectre d'amplitude, égale à la moitié de f_s .	250 kHz	125 kHz
N	Nombre d'intervalles de la réponse temporelle.	1024	2048
$N\Delta t$	Longueur d'enregistrement.	2,048 ms	8,192 ms
Δf	Intervalle en fréquence, inverse de la longueur d'enregistrement	0,488 kHz	0,122 kHz

Idéalement, l'intervalle de fréquence devrait être assez petit pour augmenter la précision des profondeurs calculées. Ceci peut être réalisé en augmentant la longueur d'enregistrement, soit en réduisant la fréquence d'échantillonnage, soit en augmentant le nombre de points échantillonnés, ou les deux en même temps. Cependant, si la longueur d'enregistrement est trop importante, les ondes réfléchies à partir des bords compliqueront la forme d'onde et le spectre d'amplitude résultant (Sansalone and Streett, 1997). En raison de la nature numérique des données dans les essais Impact-Echo, il existe des contraintes sur la précision de l'épaisseur de la structure calculée ou la profondeur du défaut. Quand un pic est observé dans le spectre de fréquence à une fréquence f , réellement la fréquence peut être située dans l'intervalle $f \pm \Delta f/2$. En conséquence, la gamme des profondeurs réelles pour une vitesse de propagation et une fréquence d'épaisseur donnée va augmenter avec l'augmentation de l'épaisseur de la structure et l'intervalle de fréquence (Carino, 2013). Le

Tableau 10 montre la gamme des profondeurs correspondant aux différents pics de fréquences pour une vitesse de propagation $V_p = 4000m/s^2$ et différents intervalles de fréquences.

Tableau 10. Gamme de profondeur réelle pour $V_p = 4000m/s^2$ et différents intervalles de fréquence

Fréquences (kHz)	Profondeur calculée (mm)	Gamme de profondeur (mm)		
		$\Delta f = 0,488$ kHz	$\Delta f = 0,244$ kHz	$\Delta f = 0,122$ kHz
3,33	600	559-647	579-623	589-611
4,00	500	471-532	485	492-508
5,00	400	381-421	516	395-405
6,67	300	289-311	390-410	297-303
10,00	200	195-205	295-306	199-201
20,00	100	99-101	99-101	100-100

I.6.2.4. Analyse fréquentielle

Dans les solides contenant des défauts, des réflexions apparaissent à partir des interfaces internes et externes, causant des formes d'ondes assez complexes, ce qui rend très difficile, voire impossible l'indentification avec précision du temps d'arrivée des ondes. Par contre si la réponse temporelle est transformée en réponse fréquentielle, les fréquences importantes apparaissent sous forme de pics distincts dans le spectre de fréquence. Cette transformée est effectuée en utilisant la fonction mathématique *Transformée de Fourier* basée sur le principe que toute fonction dépendante du temps peut être représentée sous forme de la somme de fonctions sinusoïdales de différentes amplitudes et fréquences. L'analyse fréquentielle est l'approche primaire pour l'interprétation des réponses temporelles mesurées suite à un essai Impact-Echo.

I.6.3. Applications de l'impact-Echo

I.6.3.1. Résolution verticale et latérale

Comme mentionné dans le premier paragraphe I.6.1, l'Impact-Echo est une méthode qui permet de détecter les défauts et les interfaces. Néanmoins, cette détectabilité n'est pas automatique et dépend essentiellement de la profondeur du défaut ou de l'interface (résolution verticale) et de la dimension latérale du défaut (résolution latérale). La longueur d'onde λ (Eq.(I-22)) est utilisée pour évaluer les résolutions verticale et latérale. La résolution verticale est classiquement prise au quart de la longueur d'onde dominante du signal (Bitri et al., 1996; Mari et al., 2001) alors que la résolution latérale en un point de réflexion théorique est une mesure de la zone de Fresnel (Mari et al., 2001).

$$\lambda = \frac{V_p}{f} \quad (\text{I-22})$$

Résolution verticale

L'épaisseur minimale d'une couche dont on peut distinguer séparément le toit et le mur (le sommet d'une couche est appelée toit et la base est appelée mur) est la limite de la résolution verticale (Mari et al., 2001). Pour des épaisseurs inférieures ou égales à la demi-longueur d'onde, il y a des interférences entre les réflexions créées au toit et au mur de la couche (Mari et al., 2001) ce qui rend difficile la détection des réflexions correspondantes au mur de la couche. Une analyse éléments finis (EF) réalisée dans un laboratoire de l'université d'Edimbourg a montré qu'un défaut peut être détecté s'il est situé à une profondeur supérieure à $\lambda/2$ à condition d'une fréquence suffisamment élevée (Martin et al., 1998). Les auteurs Martin et al., (1998), McCann et Forde, (2001); et Sansalone et Streett, (1997) s'accordent donc à dire que pour une résolution latérale supérieure à $\lambda/2$ un défaut ou un interface est détectable et sa profondeur peut être déterminée. Le Tableau 11 résume les profondeurs minimales mesurables pour différentes fréquences, et celles pour le béton et la maçonnerie.

Tableau 11. Relations approximatives entre le diamètre des billes et la profondeur minimale mesurable pour une vitesse de propagation $V_P = 4000m/s$ pour le béton et $V_P = 3500m/s$ la maçonnerie

Diamètre de la bille (mm)	Temps de contact (μs)	Fréquence maximale exploitable (kHz)	Profondeur minimale mesurable pour le béton (mm)	Profondeur minimale mesurable pour la maçonnerie (mm)
5	22	57	35	30
6	26	48	41	36
7	30	42	48	42
8	34	37	55	48
9	39	32	62	54
10	43	29	69	60
12	52	24	83	72
14	60	21	96	84
15	65	19	103	90
16	69	18	110	96
20	86	14	138	120

Résolution latérale

Par résolution latérale, on entend la possibilité de séparer latéralement deux points voisins et la mesure de cette résolution est la zone de Fresnel (Bitri et al., 1996). La zone de Fresnel est l'aire circulaire, centrée sur le point de réflexion, qui apporte la contribution principale à la réflexion. Aucun des trajets aller-retour qui correspondent aux points qu'elle contient ne dépasse la demi longueur d'onde du trajet de temps minimal (temps aller-retour). Pour un trajet simple (surface-réfecteur) la différence maximale de temps de trajet correspond à $\lambda/4$ (Figure 24) et le diamètre

de la zone de Fresnel $AA' = D$ est égale à $\sqrt{2z\lambda}$ (Bitri et al., 1996; Mari et al., 2001) pour un objectif situé à une profondeur z . En prenant une longueur d'onde adaptée de $\lambda/2$, le diamètre de la zone de Fresnel devient égal à λ .

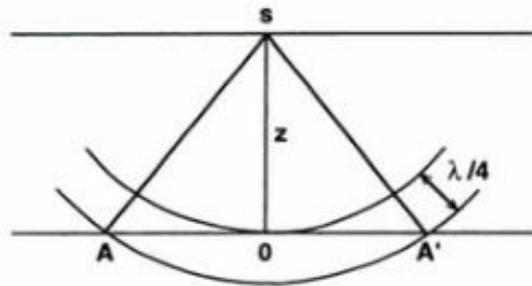


Figure 24. La zone de Fresnel pour une onde sphérique qui se propage dans un milieu à une vitesse V_P (Mari et al., 2001)

I.6.3.2. Identification des épaisseurs

L'Impact-Echo, a été appliqué avec succès pour mesurer les épaisseurs des plaques en béton (Azari et al., 2014; Chaudhary, 2013; Kim et al., 2006; Sansalone and Streett, 1997). Azari et al., (2014) ont étudié la sensibilité de la méthode Impact-Echo par rapport à la variation de l'épaisseur des dalles en béton. Il a été remarqué que le taux d'erreur dans l'estimation de l'épaisseur de la dalle calculé à partir de l'Eq.(I-16) augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de celle-ci. Les auteurs expliquent l'augmentation de ce taux d'erreur dans l'épaisseur calculée par la non-homogénéité qui devient plus importante dans les dalles les plus épaisses. L'Impact-Echo a aussi été appliqué pour étudier les épaisseurs de murs en maçonnerie (Sangoju and Ramanjaneyulu, 2016; Sansalone and Streett, 1997). Sangoju and Ramanjaneyulu, (2016) ont tenté de déterminer les épaisseurs des murs en maçonnerie à couche de briques unique et à double couche. L'Impact-Echo a permis d'identifier de manière assez précise l'épaisseur totale des murs en maçonnerie testés (à 1 mm près) que ce soit pour les murs monocouche ou bicouche en briques. Par contre l'interface entre les deux couches dans le bicouche n'a pas pu être identifiée. Les auteurs n'ont pas encore présenté une explication à ce problème. Néanmoins, une étude de fiabilité menée par Sansalone and Streett, (1997) a montré que le coefficient de réflexion R à l'interface briques/mortier est inférieur à 0,24 dans 70 à 85% des cas d'étude. Et comme mentionné dans le Paragraphe I.5.2, pour un coefficient de réflexion à l'interface inférieur à 0,24 les déplacements des particules causés par la réflexion des ondes ne sont pas détectables par un essai d'Impact-Echo. C'est ce qui pourrait probablement expliquer l'incapacité de l'Impact-Echo à détecter l'interface entre les deux couches de briques dans l'étude de Sangoju and Ramanjaneyulu (2016).

I.6.3.3. Identification des défauts

La propagation des ondes mécaniques et leurs réflexions qui se produisent dans un milieu solide sont altérées par la présence de défauts. Ces altérations peuvent être visibles sur les réponses temporelles et en particulier sur les spectres d'amplitudes obtenus à partir des essais d'Impact-Echo. La réponse d'une plaque contenant un défaut à un essai d'Impact-Echo dépend des dimensions latérales et de la profondeur de ce dernier. Dans ce qui suit, l'influence des dimensions latérales des défauts sur la réponse Impact-Echo ainsi que les conditions de détectabilité des défauts établis par Sansalone and Streett, (1997) seront présentées.

Taille et profondeur du défaut

La Figure 25 résume le comportement du spectre de fréquences obtenu à partir d'un essai Impact-Echo en fonction du rapport de la taille du défaut sur sa profondeur. Carino, (2015); Sansalone and Streett, (1997); Simonin, (2005), s'accordent à dire que tous les défauts ne peuvent pas être détectés et qu'ils doivent répondre à certaines dimensions afin de pouvoir être détectés par la méthode Impact-Echo. Soit d la dimension latérale du défaut et T sa profondeur :

- Si $d/T < 1/4$, le défaut ne peut pas être détecté ;
- Si $1/4 < d/T < 1/3$ la présence du défaut peut-être détectée ;
- Si $1/3 < d/T$ la profondeur du défaut peut être déterminée ;
- Si $1,5 < d/T$ le défaut se comporte comme une interface.

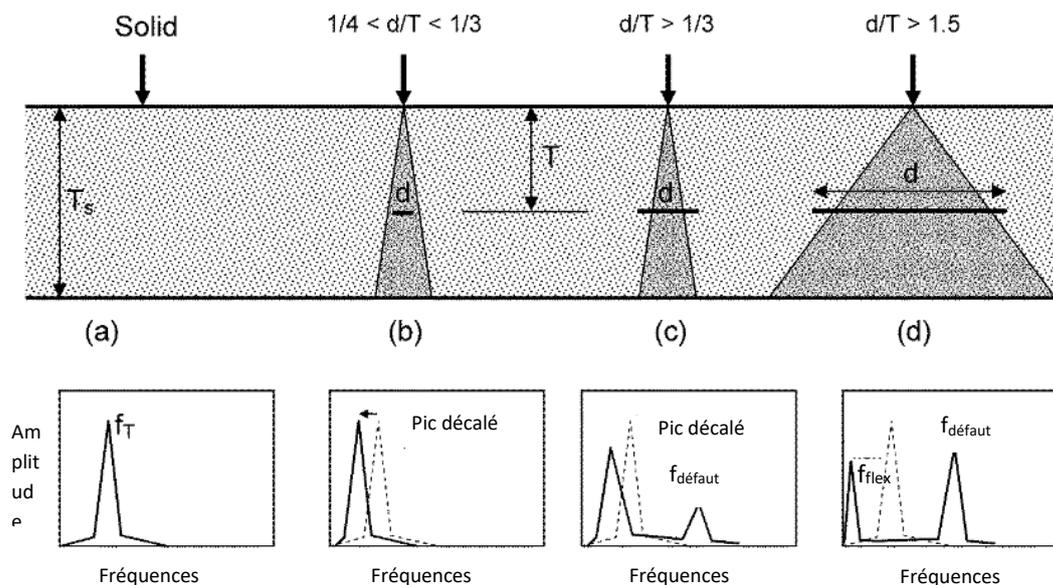


Figure 25. Influence de la taille du défaut sur la réponse d'Impact-Echo (Carino, 2015)

Défauts à dimensions latérales limitées

Dans le cas où la dimension latérale du défaut est inférieure ou égale à la profondeur de ce dernier, les ondes qui se propagent sont à la fois réfléchies à partir de la surface du défaut et diffractées autour de ses bords. Ces ondes diffractées vont se propager dans la zone située au-dessous du défaut (Figure 26.(d)), atteindre l'interface et éventuellement se réfléchir sur la surface opposée de la plaque. Cette fois-ci ces ondes réfléchies vont se réfracter à nouveau sur les bords du défaut avant d'atteindre finalement la surface. Cette description est illustrée dans la Figure 26. Le chemin suivi par la première réflexion de l'onde P à travers la plaque est illustré dans la Figure 26.(a) pour une plaque solide saine et la Figure 26.(d) pour une plaque contenant un défaut. Les Figure 26.(b) et (e) montrent les réponses temporelles correspondantes à chaque cas, et les Figure 26 (c) et (f) illustrent leur spectres d'amplitude correspondants.

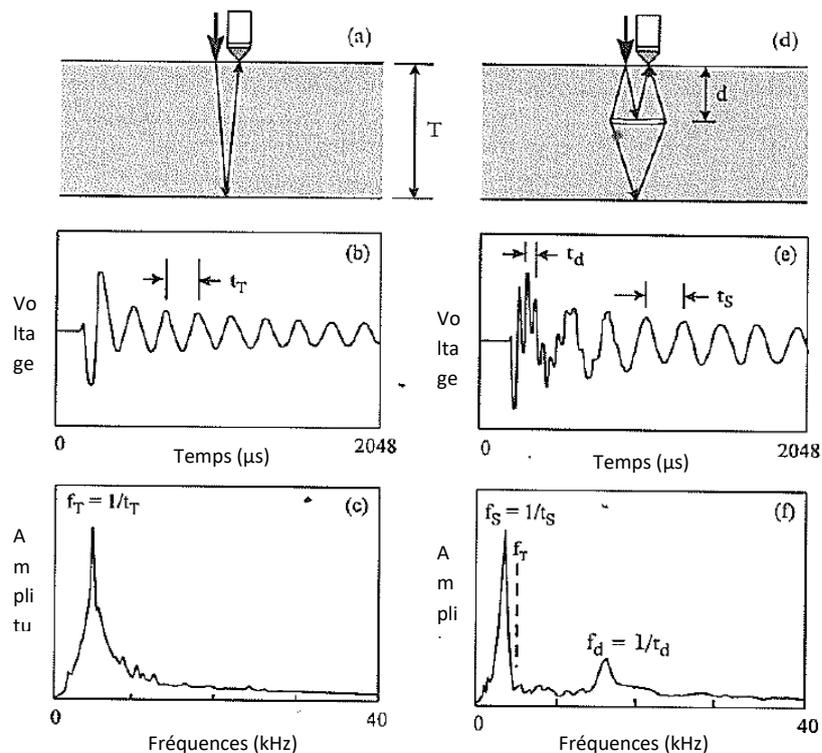


Figure 26 .Comparaison d'une réponse d'un essai Impact-Echo pour une plaque solide saine (a, b, c) et une plaque solide contenant des défauts (d, e ,f) (Sansalone et Streett, 1997)

Contrairement à une plaque saine, la réponse temporelle obtenue à partir d'une plaque contenant un défaut présente une réponse temporelle plus compliquée. En effet, la réflexion des ondes P à partir de la surface du défaut produit des oscillations à plus hautes fréquences et plus basses amplitudes. Ces oscillations possèdent une période t_d qui se superpose aux oscillations à basse fréquence de période t_s causées par les réflexions de l'onde P à travers l'épaisseur de la plaque. Parce que en se propageant, l'onde P doit être diffractée autour du défaut, le chemin parcouru et

par conséquent la période t_S est plus longue que le chemin de parcours direct et la période t_T des ondes P dans une plaque ne contenant pas de défaut (Sansalone et Streett, 1997). La présence de deux périodes d'oscillations de la réponse temporelle indique que le spectre d'amplitude va présenter deux pics distincts. Les oscillations à haute fréquence vont donner naissance à un pic à haute fréquence $f_d = 1/t_d$, qui correspond à l'épaisseur de la section de la plaque située entre la surface d'impact et la surface supérieure du défaut. Les oscillations à basse fréquence et haute amplitude dans la réponse temporelle produisent un pic à basse fréquence et haute amplitude dans le spectre d'amplitude $f_S = 1/t_S$. Cette fréquence présente le mode de vibration correspondant à l'épaisseur. En plus du rallongement du chemin parcouru par l'onde P, la présence du défaut va réduire la rigidité du matériau. Par conséquent, la fréquence correspondante à l'épaisseur de la plaque est plus basse qu'une plaque solide saine, ($f_S < f_T$). On peut conclure donc qu'un décalage de la fréquence d'épaisseur est l'indicateur clé de la présence d'un défaut dans la plaque solide. Plus la dimension latérale du défaut est grande (jusqu'à environ 1,5 fois sa profondeur), plus le chemin parcouru par l'onde P est long ; moins la plaque est rigide et plus le décalage du pic de fréquence sera important.

Défauts à dimensions latérales importantes

Si les vides ou les fissures sont de dimensions importantes, ils vont se comporter comme une interface. En effet les résultats obtenus suite un essai Impact-Echo seront similaires aux résultats obtenus sur des essais effectués sur une plaque ayant une épaisseur égale à la profondeur du défaut. Les informations situées au-dessous de cette fissure ne seront accessibles qu'en effectuant des tests sur le côté opposé de la plaque. La Figure 27 est un exemple qui illustre la propagation de l'onde dans une plaque (a) ne contenant pas défauts et (d) contenant un défaut de dimension latérale supérieure à $1.5d$. Les Figure 27. ((b),(c)) et les Figure 27.((e),(f)) illustrent leurs réponses temporelles et fréquentielles respectives. Sur la Figure 27.(f) on constate l'absence du pic correspondant à l'épaisseur de la plaque pour laisser place à un pic correspondant à la profondeur du défaut. Le défaut se comporte donc comme une interface et aucune information sur l'état de la plaque au-dessous du défaut ne sera accessible (Sansalone and Streett, 1997).

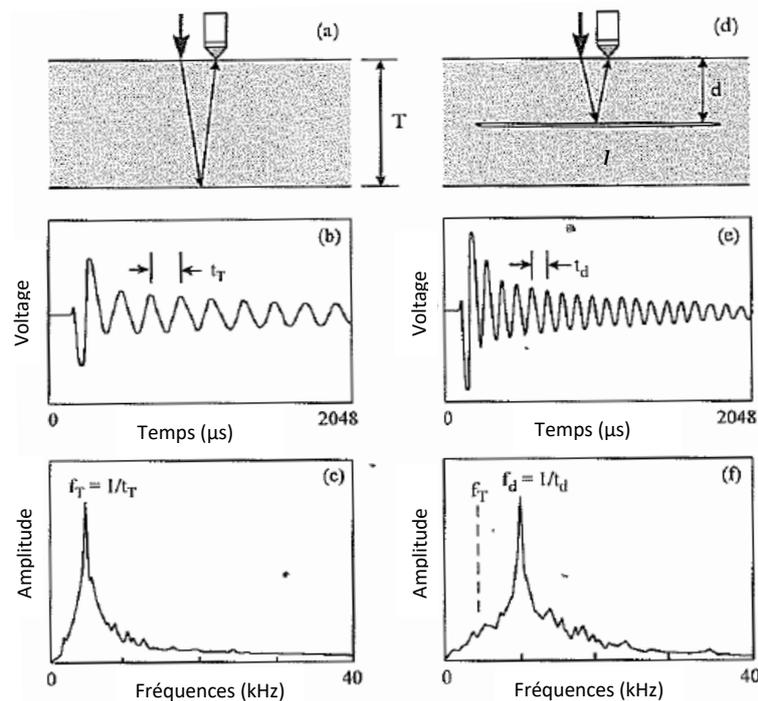


Figure 27. Comparaison de la réponse d'un essai Impact-Echo d'une plaque solide (a, b, c) sans défaut et (d, e, f) avec défaut (Sansalone and Streett, 1997)

L'identification des défauts dans les plaques en béton ou dans les murs en maçonnerie à ce stade d'avancement des recherches est possible. Néanmoins, cette identification n'est pas systématique. Comme cela a été détaillé dans le paragraphe précédent, la position du défaut et sa dimension influencent considérablement cette détection. En effet, un défaut trop petit ou pas assez profond peut ne pas être détecté. Pour contourner le problème, il est judicieux de faire varier la longueur d'onde et ce en variant le contenu fréquentiel de l'impact. Une augmentation du contenu fréquentiel permettra de détecter des défauts ou des interfaces plus proches de la surface, tandis que la diminution de ce dernier permettra de détecter des défauts ou des interfaces plus profonds. En contrepartie, un défaut de dimension latérale très importante peut être confondu avec une interface. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire de ne pas localiser les essais dans une seule région de la structure uniquement et essayer de commencer à faire les essais dans des régions de structure susceptibles d'être saines. Différents auteurs ont pu déterminer la position des défauts dans des plaques en béton et en maçonnerie (Chaudhary, 2013; Sansalone and Streett, 1997), il est important de mentionner que ces essais ont été effectués sur des plaques à défaut contrôlé. Sangoju and Ramanjaneyulu, (2016) ont appliqué l'Impact-Echo sur un mur en brique contenant différents types d'inclusions (pierre, bois, vides et polystyrène) à différents endroits. La position des différentes inclusions a pu être identifiée et localisée avec succès, néanmoins l'identification du type l'inclusion n'est pas encore possible à ce stade d'avancement des recherches.

I.6.3.4. Identification des délaminations superficielles

La réponse d'une plaque en béton contenant une fissure superficielle (délaminage) suite à un essai d'Impact-Echo est fondamentalement différente de la réponse obtenue à partir d'une plaque contenant des défauts relativement profonds. Sansalone et Street (1997) définissent une fissure superficielle (délaminage) comme étant toute fissure située à une profondeur inférieure à 100 mm de la surface d'impact. Lors d'un essai Impact-Echo, l'onde mécanique générée par l'impact va exciter un ou plusieurs modes de flexion de la fine section au-dessus de la fissure. Cette partie va vibrer comme une plaque encadrée à ses extrémités (Sansalone and Streett, 1997). La Figure 28 illustre les composantes principales d'une réponse d'un essai d'Impact-Echo mesurée sur dalle contenant un délaminage. Deux pics distincts peuvent être identifiés : un pic à basse fréquence résultant de la vibration en flexion de la fine section au-dessus de la fissure et un pic à haute fréquence produit par les réflexions multiples des ondes entre la surface d'impact et la délamination. La Figure 28.(a) illustre le mode fondamental de vibration en flexion et la Figure 28.(c) illustre le chemin parcouru par l'onde P entre la surface d'impact et la surface supérieure de la fissure. La fréquence associée au mode fondamental de vibration en flexion f_{flex} est typiquement inférieure à la fréquence du mode d'épaisseur de la plaque f_T comme indiqué sur la Figure 28 (b,d). De façon générale le pic correspondant au mode d'épaisseur est difficilement détectable en raison de l'amplitude du pic de flexion qui est très importante par rapport au pic d'épaisseur. Les fréquences des modes de vibrations en flexion d'une couche délaminée diminue avec la diminution de l'épaisseur de cette dernière et l'augmentation des dimensions latérales (Sansalone and Streett, 1997).

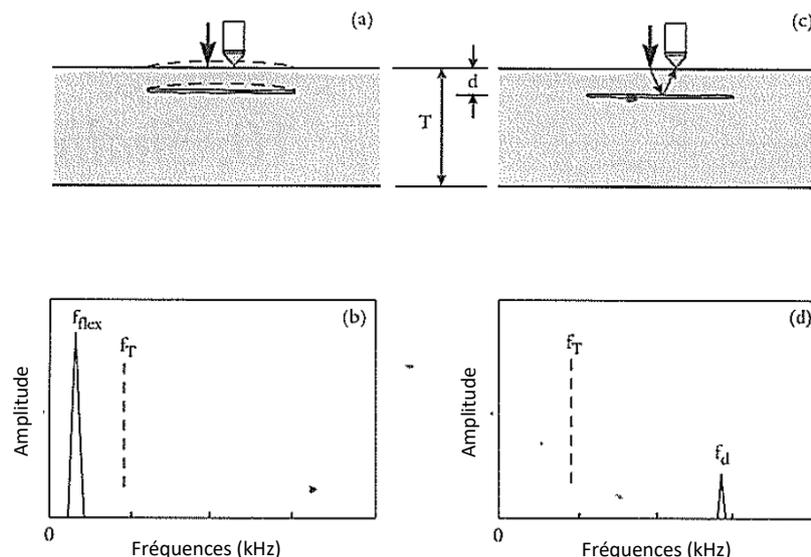


Figure 28. Réponse d'un essai Impact-Echo d'une plaque contenant une délamination (a, b) et d'une plaque contenant un défaut (c, d) (Sansalone et Streett, 1997)

I.6.3.5. Identification de la qualité du contact

Sadri, (2003) a utilisé la méthode Impact-Echo pour caractériser la qualité du contact entre les pierres dans un contrefort en maçonnerie et qualifier l'état des joints entre les pierres. En effet plus le pic de fréquence de l'interface est prononcé plus l'état du jointolement est dégradé. L'auteur souligne néanmoins l'impossibilité de distinguer de manière certaine la présence de vides ou discontinuités, puisque les réflexions se produisent à partir de la surface qui provoque une rupture d'impédance. Sansalone and Streett, (1997) ont eux aussi étudié la qualité du contact dans les interfaces internes. Les possibles réponses de l'Impact-Echo qui peuvent être obtenues en fonction de la fraction de la zone interfaciale non liée U ont été établies:

- Les interfaces avec $U = 0$ ne peuvent pas être détectées (Figure 29.(a)) ;
- Pour les interfaces avec $0 < U < 0,2$ l'effet de cette zone non liée est minime et ne peut pas être détecté Figure 29.(b) ;
- Pour les interfaces avec $0,2 < U < 0,8$ les réflexions des ondes P à partir de l'interface produisent un pic visible sur le spectre de fréquence correspondant à la profondeur de l'interface ; plus U augmente plus l'amplitude de ce pic augmente (Figure 29.(c) et (d)) ;
- Pour des interfaces avec $0,8 < U$ la réponse de l'Impact-Echo est similaire à celle contenant un défaut ou un vide Figure 29.(e).

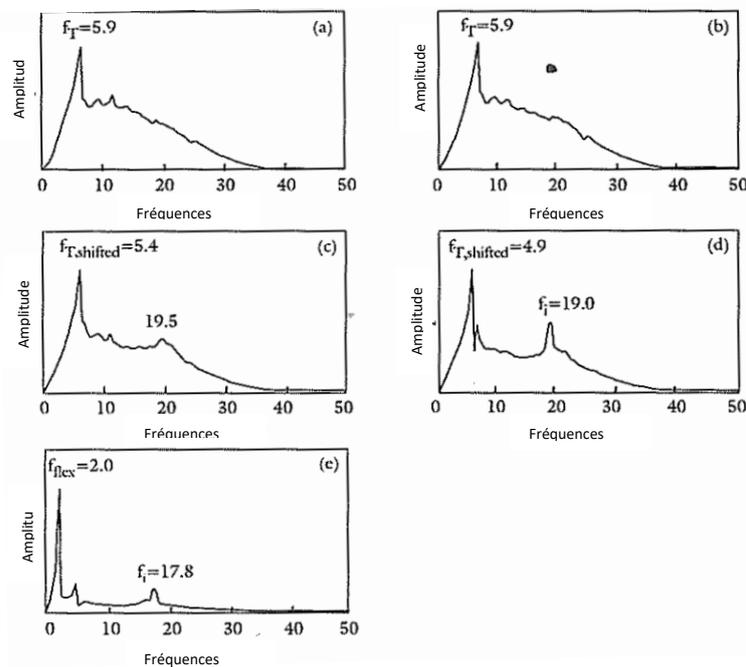


Figure 29 .Spectres de fréquences obtenus en fonction de la zone non liée à l'interface dans une plaque en béton avec un revêtement en béton : (a) 0%, (b) 20%, (c) 50%, (d) 80%, (e) 100% (Sansalone et Streett, 1997)

I.6.4. Conclusion

L'Impact-Echo peut-être une méthode efficace pour l'évaluation non destructive des structures en béton ou en maçonnerie à condition que le test soit parfaitement contrôlé, en d'autres termes, si l'on sait exactement ce que l'on cherche. La plupart des travaux recherches ont été principalement axés sur les plaques en béton. Alors que les rares recherches menées sur la maçonnerie concernent généralement les briques plutôt que la maçonnerie en pierre. Aujourd'hui, même si la détection des défauts est possible, elle dépend encore fortement de plusieurs paramètres tels que le contenu fréquentiel, les dimensions et la profondeur du défaut, et du matériau le contenant. A ce stade d'avancement des recherches, la nature du défaut ne peut pas encore être identifiée et un défaut de dimensions latérales importantes peut-être encore confondu avec une interface. De plus, l'Impact-Echo ne peut toujours pas être appliqué correctement sur des éléments ne représentant pas des plaques, au risque d'aboutir à des résultats incompréhensibles en raison des interférences entre les ondes réfléchies à partir des interfaces et celles réfléchies à partir des bords.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'évaluation des ponts en maçonnerie, où l'un des problèmes les plus rencontrés est la détection des vides et des défauts situés dans le remplissage situé derrière les murs de têtes et les voûtes. Une telle pathologie peut s'avérer très dangereuse.

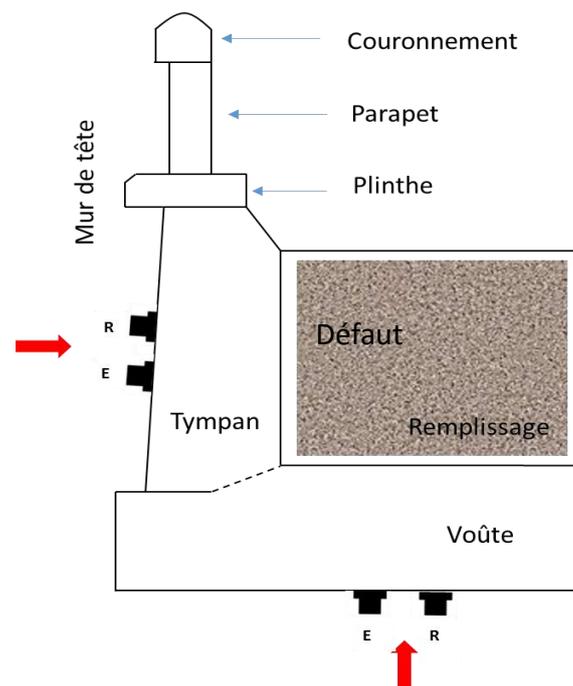


Figure 30. Structure d'un pont en maçonnerie

En effet, la détérioration ou la perte de matériau dans ce remplissage peut affecter directement ou indirectement le comportement et la sécurité de la structure des ponts. Dans les travaux

recherches précédentes des auteurs ont tenté de déterminer les défauts situés dans la première couche d'une plaque monocouche ou qualifier le contact à l'interface d'une structure bicouche. La piste de l'identification des défauts dans la deuxième couche d'une plaque bicouche n'a pas été explorée. Dans ces travaux, nous étudions la possibilité de la méthode Impact-Echo pour identifier les défauts situés dans la deuxième couche (les murs de têtes ou les voûtes étant la première couche et le remplissage étant la deuxième). Pour ce faire, une étude numérique est réalisée en faisant varier différents paramètres tels que l'épaisseur de la première couche, les paramètres mécaniques de la plaque bicouche ou encore la profondeur du défaut. Ensuite, dans un deuxième temps, les résultats obtenus numériquement seront confrontés aux résultats expérimentaux obtenus à partir de tests effectués en laboratoire.

Chapitre II.

Simulation numérique

II.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'introduire la simulation numérique d'un essai Impact-Echo appliquée à l'étude d'une structure composée de deux couches et contenant un défaut situé dans la seconde couche. La première couche caractérise la voûte ou le mur de tête d'un pont en maçonnerie. La deuxième couche peut être assimilée à un matériau de remplissage situé au-delà de la voûte ou du mur de tête. Le défaut, contenu dans le matériau de remplissage (deuxième couche de la simulation), est simulé sous la forme d'un vide afin d'assurer une réflexion d'onde maximale.

Ce chapitre présente les principes de base de la simulation par éléments finis (EF) de la propagation des ondes mécaniques dans les matériaux solides et constituera la base des simulations réalisées au cours de ces travaux de recherche. Dans la première partie, on présente les hypothèses de calcul prises en compte, la géométrie du problème simulé, le maillage, le chargement, les conditions aux limites, ainsi que les différents paramètres considérés lors des simulations. Dans la deuxième partie, on présente et discute les premiers résultats obtenus à partir des différentes simulations EF. La simulation est appliquée, dans un premier temps, à l'étude de la réponse d'un essai Impact-Echo d'une structure monocouche. Ensuite, cette simulation est appliquée à l'étude de la réponse d'un essai Impact-Echo sur une structure constituée de deux couches. Enfin, la

simulation sera appliquée à l'étude de la réponse d'un essai Impact-Echo d'une structure bicouche contenant un défaut localisé dans la seconde couche.

II.2. Simulation par Élément Finis

L'analyse par éléments finis (EF) est une technique numérique qui permet d'obtenir des solutions approchées aux équations qui décrivent les problèmes de la mécanique des milieux continus. Cela permet en outre de simuler la géométrie de la structure et conduira à la prédiction de son comportement.

Dans notre étude, le milieu continu est considéré comme une structure homogène ayant des formes géométriques particulières, et pouvant contenir des fissures, des vides ou d'autres défauts. Le milieu continu est divisé en un nombre fini d'éléments discrets appelés 'éléments finis', qui sont interconnectés au niveau des nœuds. La méthode des éléments finis a été explicitement utilisée pour simuler la propagation des ondes dans les milieux solides (Pradhan, 2014; Sansalone et Carino, 1986; Serón et al., 1990) et a été appliquée avec succès pour étudier la réponse de la méthode d'Impact-Echo appliquée à des plaques en béton (Pradhan, 2014; Sansalone and Carino, 1986). Sansalone et Carino, (1986) ont appliqué la méthode éléments finis dans la simulation de la propagation des ondes dans les plaques en béton saines et contenant des défauts, afin d'étudier les conditions de géométrie, de position de défauts et de mesures qui permettent d'avoir un résultat optimal. Pradhan, (2014) a étudié l'influence de la variation de différents paramètres numériques liés à la simulation par éléments finis de la propagation des ondes générées par l'impact dans les plaques de béton, sur le comportement des réponses temporelles et fréquentielles. Par exemple, l'influence de la variation de la fonction d'impact, la distribution de cette force d'impact et de sa position, ont fait partie de son étude. Il a aussi traité l'influence des différents cas de conditions aux limites.

Peu d'auteurs comme Topping et Wong, (1991) ont appliqué cette méthode pour étudier la réponse de la méthode d'Impact-Echo appliquée à des structures sous forme de plaque bicouche, des matériaux comme la pierre ou la maçonnerie.

Dans ces travaux nous avons utilisé le logiciel Cast3M©, afin de simuler la propagation des ondes dans un milieu continu. Cast3M© est un logiciel de calcul par la méthode des éléments finis pour la mécanique des structures et des fluides. Il a été développé au Département de Modélisation des Systèmes et Structures (DM2S) de la Direction de l'Énergie Nucléaire du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA). Il intègre non seulement les processus de résolution (solveur) mais également les fonctions de construction du modèle (préprocesseur) et d'exploitation des résultats (post-traitement). C'est un logiciel qui permet à l'utilisateur de développer des fonctions répondant à ses propres besoins.

II.2.1. Hypothèses de calculs

Pour les calculs éléments finis appliquée à l'étude de l'Impact-Echo, tous les matériaux sont modélisés comme étant des matériaux élastiques, isotropes et homogènes. Cette hypothèse est

valable pour les fréquences inférieures à 80kHz (Sansalone et Streett, 1997). Les modèles linéaires élastiques sont valides pour les matériaux de structure, comme le béton, la pierre, la maçonnerie et l'acier, aux faibles niveaux de déformations produits par les ondes mécaniques générées par impact pour un essai Impact-Echo. Ces ondes mécaniques ont typiquement des fréquences inférieures à 80kHz et des longueurs d'ondes variant de quelques centimètres à quelques mètres. A ces longueurs d'ondes, les matériaux comme le béton, la maçonnerie, la roche ou le bitume apparaissent homogènes aux ondes qui se propagent et peuvent être modélisés comme étant des matériaux homogènes isotropes (Sansalone et Streett, 1997).

L'objectif de ces travaux est de simuler la propagation des ondes de compression sur une structure bicouche qui représente une partie d'un pont en maçonnerie et en particulier une voûte ou un mur de tête (comme première couche) et un remplissage au-delà. La première couche peut être assimilée à un matériau solide tel que le béton ou la pierre. Ces hypothèses restent donc valables pour les matériaux constituant la première couche. La deuxième couche quant à elle peut être assimilée à un matériau de remplissage comme un matériau de type de sol ou sable. Dans une première approche, pour les matériaux de remplissage constituant la deuxième couche et qui peuvent être assimilés à du sol ou un matériau sableux, les hypothèses ci-dessus seront supposées valides.

II.2.2. Types d'éléments

La structure à modéliser sur Cast3M© est une géométrie sous forme parallélépipède en trois dimensions. Par conséquent, des éléments de maillage tridimensionnels de type CUB8, qui sont des éléments cubiques à 8 nœuds (Figure 31), ont été utilisés afin de mailler la géométrie en question. Les contraintes et les déplacements en tout emplacement intermédiaire sont obtenus par interpolation linéaire entre les nœuds d'angle correspondants. Les fonctions de base des éléments de types CUB8 sont plus riches et peuvent représenter les gradients de contraintes et des déformations de façon plus régulière, comparés aux autres types d'éléments, à nombre de nœuds égal. Pour représenter avec précision le problème de propagation d'onde, un maillage assez fin est nécessaire pour capturer l'onde se déplaçant avec une certaine longueur d'onde. La taille des éléments conditionne leur nombre et la structure à modéliser doit être discrétisée de sorte que les ondes puissent se propager. La taille des éléments doit être plus petite que la longueur d'onde. Le nombre de nœuds par longueur d'onde sera présenté dans le paragraphe suivant.

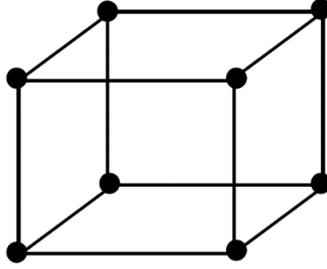


Figure 31. Eléments de maillage parallélépipédiques CUB8

II.2.3. Discrétisations spatio-temporelles

La modélisation de la propagation des ondes mécaniques dans des milieux continus à travers une discrétisation spatiale et temporelle peut introduire plusieurs erreurs associées à différents effets numériques. Pour éviter certaines de ces erreurs, la discrétisation du temps et de l'espace doit être choisie avec précaution. La taille de l'élément de maillage Δx (Eq. II-1) dépend entièrement de la longueur d'onde de l'onde qui se propage à travers l'élément. Cette taille devrait être assez petite pour pouvoir capturer l'onde avec une longueur d'onde minimale λ_{min} . La longueur d'onde minimale est définie par l'Eq. (II-2) avec V_P la vitesse de propagation des ondes de compression et f_{max} la fréquence maximale générée par l'impact. L'expérience a montré que pour capturer avec précision la réponse Impact-Echo, dix éléments par longueur d'onde sont nécessaires (Sansalone et Streett, 1997). Ce phénomène, illustré dans la Figure 32, montre comment un cycle d'un sinus est représenté par des intervalles d'échantillonnage qui fournissent trois, cinq et dix éléments par cycle.

$$\Delta x = \frac{\lambda_{min}}{N} \quad (\text{II-1})$$

$$\lambda_{min} = \frac{V_P}{f_{max}} \quad (\text{II-2})$$

L'incrément de temps Δt peut être calculé à l'aide de l'expression donnée par l'Eq. (II-3), où Δt_{cr} représente un incrément de temps critique, et qui permet d'obtenir une représentation satisfaisante de la propagation l'onde (Sansalone et Streett, 1997) :

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} \approx \frac{\Delta x}{V_P} \quad (\text{II-3})$$

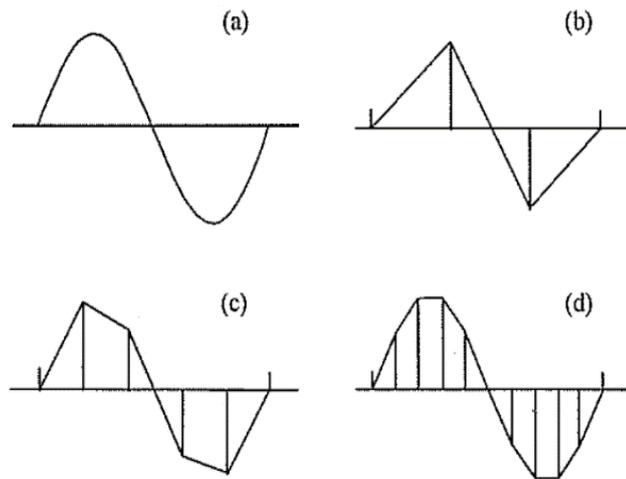


Figure 32. (a) Un cycle d'onde sinusoïdale (b), (c) et (d) sont des représentations numérisées avec respectivement 3,5 et 10 échantillons par longueur d'onde

II.2.4. La géométrie

La structure à modéliser sur Cast3M© est une géométrie sous forme parallélépipédique en trois dimensions. Elle sera respectivement sous forme d'une plaque monocouche (Figure 33.(a)) et d'une plaque bicouche (Figure 33.(b)) selon l'étape d'avancement de l'étude. Les épaisseurs e des structures choisies dépendent des longueurs d'ondes générées par impact (qui dépend de la source de l'impact) et du matériau constituant la structure. Dans ces travaux, nous nous sommes limités à une seule source d'impact représentée par une bille en acier de 2 cm de diamètre. Cette source permet de générer des ondes à des fréquences pouvant aller jusqu'à 14,5 kHz. Les épaisseurs e sont choisies supérieures à la moitié de la longueur l'onde minimale des ondes générées par l'impact d'une bille acier de 2cm de diamètre. Ce critère, évoqué dans le paragraphe I.6.3.1, permet théoriquement de garantir la détection des couches composant la structure. Une structure de plus faible épaisseur ne permettait pas la détection de ses couches constitutives, c'est pourquoi ce cas ne nous intéresse pas ici.

$$e > \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (\text{II-4})$$

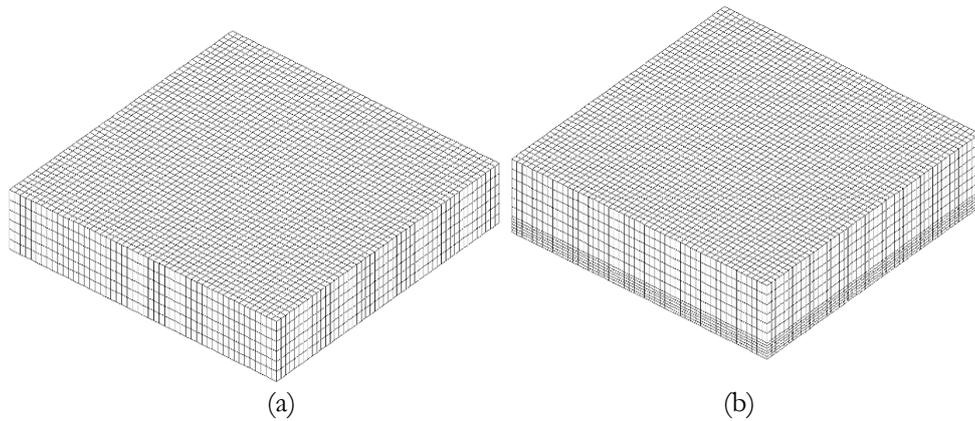


Figure 33. Maillage de structure sous forme de plaque
(a) Plaque monocouche (b) Plaque bicouche

Les dimensions latérales des structures sous forme plaque doivent être au moins six fois plus grandes que l'épaisseur en question afin de s'affranchir au maximum des réflexions des ondes générées par impact sur les bords de la structure. Ces dimensions latérales minimales sont nécessaires pour que la réponse à l'impact soit dominée par la fréquence correspondant à l'épaisseur (J. Carino, 2015). Les dimensions de la structure influent sur le choix du facteur géométrique β qui intervient dans la formule de l'Impact-Echo (I-16). Les différents facteurs géométrique en fonction de dimensions (Figure 34) sont présentés au Tableau 12.

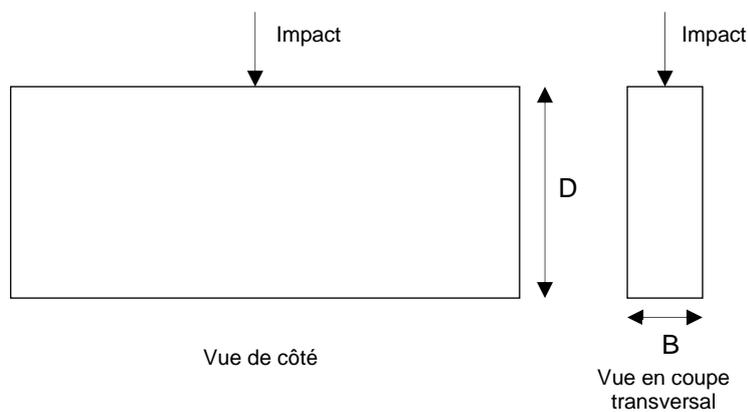


Figure 34. Un essai Impact-Echo sur une barre rectangulaire

Tableau 12. Facteurs géométrique β en fonction de la géométrie de la structure (Sansalone et Streett, 1997)

D/B	β
< 0,60	0,96
0,60	0,84
0,75	0,87
0,80	0,75
0,83	0,77
0,87	0,80
0,91	0,82
1,00	0,87
1,10	0,90
1,20	0,92
1,33	0,94
1,67	0,95
2,00	0,96
> 2,00	0,96

II.2.5. Les matériaux

Les différents matériaux constituant la structure à modéliser ont été choisis afin de se placer dans des conditions de matériaux structuraux réels. La première couche est une couche ayant les propriétés d'un matériau solide pouvant être attribuées à un matériau tel que le béton, la pierre ou la brique. Cette couche peut être représentative d'un mur de tête ou d'une voûte d'un ancien pont en maçonnerie. La deuxième couche est une couche pouvant être assimilée à du sol représentant le remplissage situé au-delà de la voûte ou du mur de tête. Deux matériaux avec des paramètres mécaniques différents sont considérés pour chaque couche. Ces paramètres sont résumés au Tableau 13.

Tableau 13. Paramètres correspondant aux différents matériaux des structures sous formes de plaques bicouches

Couche	Matériau	E [GPa]	ν	ρ [kg/m³]	V_{p2}
Première couche	Matériau 1	32	0,2	2300	3931
	Matériau 2	75	0,3	2750	6059
Deuxième couche	Matériau 1	3,8	0,33	2150	1614
	Matériau 2	3,8	0,33	1400	2000

II.2.6. Chargement et mesures

L'impact d'une bille en acier sur une surface solide peut être représenté numériquement par une force qui varie rapidement en fonction du temps (Sansalone and Carino, 1986). Dans notre cas, le

chargement est simulé par un demi-sinus carré (Eq (II-5)). Cette fonction, dans le domaine temporel ainsi que sa transformée dans le domaine fréquentiel, est représenté sur la Figure 35. L'amplitude F_{max} de cette fonction affecte uniquement la magnitude de la mesurande (déplacement, vitesse ou accélération). Par conséquent cette valeur n'affecte pas la lecture des résultats obtenus à partir d'une simulation d'un essai Impact-Echo. Le temps de contact t_c , qui dépend du diamètre de l'outil d'impact, affecte le contenu fréquentiel de l'impact. Les paramètres du chargement sont présentés dans le Tableau 14, avec D le diamètre de la bille en acier et t_c le temps de contact (paragraphe I.6.2.1). Dans toutes les simulations, les ondes mécaniques sont générées au centre de la plaque et les mesures réalisées en quatre points distants respectivement de 20%, 30%, 40% et 50% par rapport à l'épaisseur de la première couche comme indiqué à la Figure 36.

$$F = F_{max} \sin^2\left(\pi \frac{t}{t_c}\right) \quad (\text{II-5})$$

Tableau 14. Paramètres d'entrée du chargement

Paramètre	D (cm)	t_c (μ s)	F_{max} (N)
Valeurs	2	86	1700

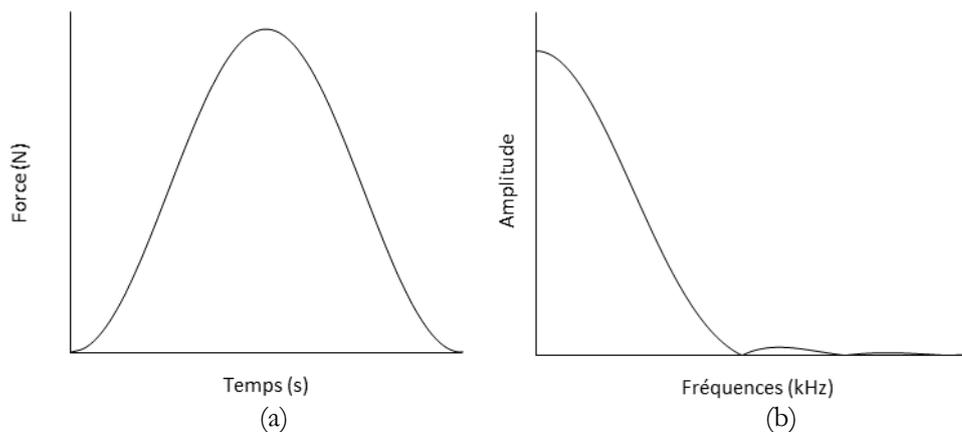


Figure 35. Chargement sous forme de demi-sinus carré au pont d'impact.
 (a) Chargement en fonction de temps (b) Spectre de fréquence correspondant au chargement

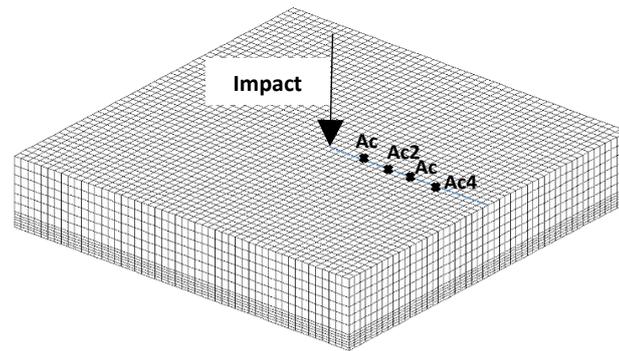


Figure 36. Schématisation du point de chargement et des différents points de mesures de la simulation

II.2.7. Frontières absorbantes

Les simulations ont été réalisées sur des structures ayant des dimensions latérales importantes afin d'éviter les réflexions des ondes à partir des bords de la structure qui pourraient 'polluer' et compliquer l'interprétation du spectre de fréquence. Pour éviter les réflexions sur les bords, les dimensions latérales d'une plaque doivent être moins de six fois l'épaisseur de cette dernière. Ce critère, défini dans ASTM C1383, admet que pour ces dimensions, une structure se comporte comme une structure en forme de plaque et que le spectre de fréquences sera dominé par la fréquence dite le 'mode d'épaisseur'. En effet, en considérant ces dimensions, les bords de la structure en forme de plaque sont assez éloignés pour que les ondes ne les atteignent pas ou bien s'ils les atteignent, les réflexions n'atteignent pas les points de mesures. Toutefois en pratique, de telles dimensions rendent le temps de calcul élevé et l'espace en mémoire nécessaire au calcul important. Nous avons donc été contraints de diminuer les dimensions latérales pour essentiellement gagner en temps de calcul. Pour s'affranchir des réflexions des ondes sur les bords nous avons décidé d'implanter un outil sur les bords latéraux qui pourrait inhiber les réflexions de ces dernières. Cet outil est connu dans la littérature sous forme de frontière ou limite absorbante. Dans la bibliographie, différentes frontières non réfléchissantes et absorbantes ont été proposées et appliquées pour diminuer l'effet des réflexions sur les bords.

II.2.7.1. Couche parfaitement adaptée

La technique PML (Perfectly Matched Layer ou Couche parfaitement adaptée) a été créée par Berenger, (1994) pour l'électromagnétisme et a été étendue à d'autres domaines tels que l'acoustique, la sismologie et les ondes élastiques. Comme son nom l'indique, une PML correspond parfaitement à l'impédance de la zone d'étude. Cela signifie qu'en théorie, une onde entre dans une PML sans réflexion. Une fois à l'intérieur, l'onde décroît de façon exponentielle. Une PML peut

donc être utilisée pour obtenir la radiation totale d'une onde en dehors de la zone d'étude (Drozdz, 2008).

II.2.7.2. Couche absorbante à amortissement croissant

L'ALID (Absorbing Layer with Increasing Damping) est une couche absorbante constituée d'un matériau présentant les mêmes propriétés que celles de la zone d'étude, en plus d'avoir un amortissement progressivement croissant. Le concept général a été mentionné par Israeli et Orszag, (1981).

II.2.7.3. Frontière de Lysmer-Khhlemeyer

La frontière de Lysmer-Khhlemeyer (LK) consiste en une force d'amortissement visqueux appliquée sur le long des frontières comme un dissipateur d'énergie (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969). Les frontières absorbantes présentent l'avantage d'être indépendantes de la fréquence. La frontière absorbante annule les contraintes provenant des ondes de façon que :

$$\sigma_{int} + \sigma_{ext} = 0 \quad (II-6)$$

$$\tau_{int} + \tau_{ext} = 0 \quad (II-7)$$

Où σ_{int} et τ_{int} les contraintes normales et tangentielles incidentes et σ_{ext} et τ_{ext} sont les contraintes appliquées à la frontière. D'après Lysmer et Kuhlemeyer, les contraintes extérieures, exercées par les amortisseurs, s'écrivent

$$\sigma = -\rho V_p u_n \quad (II-8)$$

$$\tau = -\rho V_s u_t \quad (II-9)$$

Avec ρ : masse volumique du sol, V_p et V_s : les vitesses de propagation des ondes P et S, u_n et u_t les composantes normales et tangentielles des vitesses aux frontières.

En raison de leur facilité d'implémentation sur le logiciel Cast3M©, les frontières absorbantes de Lysmer-Khhlemeyer (LK) ont été choisies pour cette étude et seront implémentées sur les différentes faces latérales de la géométrie simulée en monocouche et en bicouche (Figure 37). Bien que les frontières absorbantes LK soient faciles à implémenter, il est important de mentionner qu'elles absorbent parfaitement les ondes d'incidence normale, mais n'absorbent pas entièrement les ondes à incidence oblique mais atténuent considérablement ces dernières.

Les ondes générées par impact à la surface d'une structure sous forme de plaque, se propagent dans la structure et arrivent en incidence oblique aux bords de cette dernière. Par conséquent, les

frontières absorbantes LK implémentées aux bords de la structure vont partiellement absorber ces ondes.

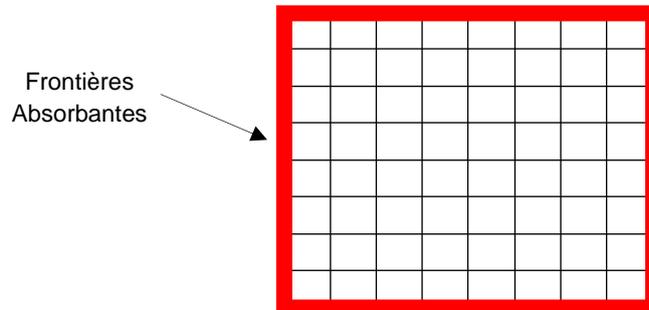


Figure 37. Vue de haut de l'implémentation des frontières absorbantes sur les bords latéraux d'un maillage Cast3M©

II.2.8. Notion d'amortissement

Le mouvement des structures soumises à des forces ou des mouvements imposés, variables au cours du temps, dépend en particulier des propriétés d'amortissement. En effet il dépend de la dissipation d'énergie dans les matériaux constitutifs de la structure, dans les liaisons des différents éléments de structures entre eux ou avec le milieu environnant. Les phénomènes physiques intervenant dans cette dissipation d'énergie sont nombreux : frottement, interaction fluide-structure, viscosité et plasticité et rayonnement vibratoire aux appuis. Les modèles de comportement représentant ces phénomènes sont souvent mal connus et il n'est pas possible de les décrire explicitement au niveau élémentaire. C'est pourquoi les modèles les plus utilisés sont les modèles simples qui permettent de reproduire à l'échelle macroscopique les principaux effets sur la structure.

Dans ce qui suit nous allons introduire l'amortissement visqueux (énergie dissipée proportionnelle à la vitesse du mouvement), l'amortissement de Rayleigh, et l'amortissement hystérétique (énergie dissipée proportionnelle au déplacement).

II.2.8.1. Notions de base pour caractériser l'amortissement

Coefficient de perte

Le coefficient de perte η est un coefficient adimensionnel qui caractérise l'effet amortisseur défini comme le rapport de l'énergie dissipée E_d au cours d'un cycle sur l'énergie potentielle maximale E_{pmax} multipliée par 2π :

$$\eta = \frac{E_d \text{ par cycle}}{E_p \text{ max} \times 2\pi} \quad (\text{II-10})$$

Amortissement réduit

Par définition l'amortissement réduit ζ (ou ratio d'amortissement) est égal à la moitié du coefficient de perte :

$$\zeta = \frac{\eta}{2} \quad (\text{II-11})$$

II.2.8.2. Amortissement visqueux

L'amortissement visqueux peut être modélisé en adoptant l'amortissement interne purement visqueux du modèle Kelvin-Voigt (Figure 38). Pour ce type d'amortissement, les forces dissipatives sont proportionnelles aux vitesses relatives alors que la contrainte est proportionnelle à la vitesse de déformation :

$$\sigma = E\varepsilon + \mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (\text{II-12})$$

La matrice d'amortissement C de l'équation du mouvement est donc comme suit :

$$C = \frac{\mu}{E} K \quad (\text{II-13})$$

Avec

- ✓ μ : la viscosité dynamique, déterminée en laboratoire. Elle est égale au produit de la viscosité cinématique (newtonienne) par la masse volumique ($\mu = \eta \times \rho$)
- ✓ E : le module d'Young
- ✓ K : la matrice de rigidité

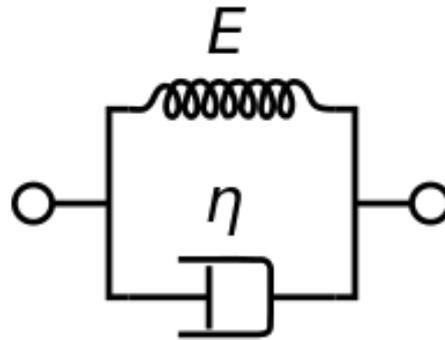


Figure 38. Représentation schématique du modèle de Kelvin–Voigt

Avec un modèle purement visqueux, les modes de plus basses fréquences sont généralement trop peu amortis (Combescure, 2006). Ceci a conduit à l'utilisation très fréquente d'un modèle d'amortissement mélangeant amortissement visqueux (proportionnel à la raideur) et amortissement proportionnel à la masse. Ce modèle, appelé amortissement de Rayleigh, est présenté dans le paragraphe suivant.

II.2.8.3. Amortissement de Rayleigh

Cet amortissement est classiquement utilisé pour la construction de la matrice d'amortissement \mathcal{C} de l'équation du mouvement permettant de prendre en compte un amortissement global forfaitaire traduisant la dissipation d'énergie dans le système physique. Ce modèle d'amortissement, généralement utilisé lorsque la viscosité et la densité du matériau sont constantes, définit \mathcal{C} comme une combinaison linéaire des matrices de Masse M et de Rigidité K :

$$\mathcal{C} = \alpha M + \beta K \quad (\text{II-14})$$

où α et β sont des coefficients proportionnels à la masse et à la raideur respectivement et sont déterminés à partir des ratios d'amortissement.

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\zeta_2\omega_1 - \zeta_1\omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (\text{II-15})$$

$$\beta = \frac{2(\zeta_1\omega_1 - \zeta_2\omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (\text{II-16})$$

ω_1 et ω_2 représentent respectivement la pulsation fondamentale (due premier mode) de la structure non amortie et la pulsation utile pour l'analyse (Chowdhury et Dasgupta, 2003). La

pulsation utile pour l'analyse est généralement la pulsation correspondant au second mode propre. ζ_1 et ζ_2 représentent les coefficients d'amortissement réduits, correspondant aux deux premières fréquences propres de la structure (Figure 39). On les déduit des relations précédentes (II-15) et (II-16):

$$\zeta_n = \frac{\alpha}{2\omega_n} + \frac{\beta\omega_n}{2} \quad (\text{II-17})$$

Avec $n = 1$ ou 2 .

Ainsi, les basses fréquences pourront être fortement amorties. En pratique on s'arrange pour que l'amortissement reste quasiment constant sur la gamme de fréquence importante pour l'étude. De plus il suffit d'avoir l'amortissement réduit pour deux fréquences pour pouvoir déterminer les deux coefficients α et β . Pour $\zeta = \zeta_1 = \zeta_2$ les équations (II-15) et (II-16) deviennent :

$$\alpha = \frac{2\zeta\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (\text{II-18})$$

$$\beta = \frac{2\zeta}{\omega_1 + \omega_2} \quad (\text{II-19})$$

L'amortissement de Rayleigh présente l'avantage d'être diagonal dans la base des modes propres non amortis. Ceci signifie qu'il n'y a aucun couplage entre modes réels par l'intermédiaire de l'amortissement et que le système à n degrés de liberté peut donc se ramener à n systèmes à 1 degré de liberté amorti (Combescure, 2006).

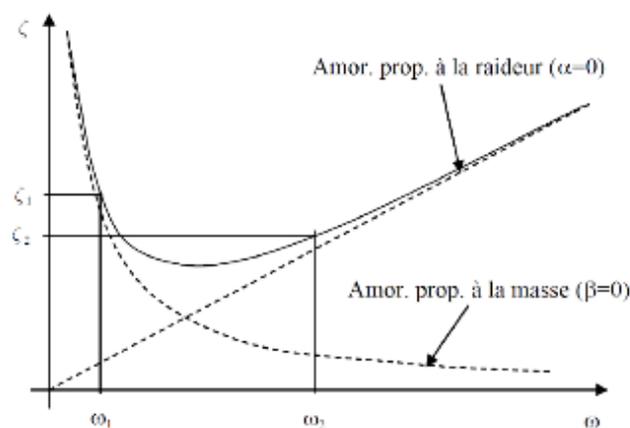


Figure 39. Evolution de l'amortissement réduit en fonction de la pulsation pour le modèle d'amortissement de Rayleigh (Combescure, 2006)

II.2.8.4. Amortissement hystérétique

L'amortissement hystérétique (ou amortissement structural) est suscité par des frottements internes dans le matériau (Thomas, 2007). Cet amortissement n'est défini que dans le cas d'une loi sinusoïdale (Alarcon, 2013). Le modèle d'amortissement hystérétique vise à traduire la dissipation d'énergie qui accompagne les déformations élastiques d'un matériau. Pour visualiser l'énergie dissipée, il est possible de représenter un cycle sur un graphique force (F)-déplacement (d) (Figure 40). Il est à noter que l'amortissement hystérétique est un cas particulier de l'amortissement de Rayleigh pour $\alpha = 0$, soit, en considérant que $\zeta = \zeta_1 = \zeta_2$ (Tautou, 2016):

$$\zeta = \frac{\beta\omega}{2} \quad (\text{II-20})$$

Avec $\beta = C/K$ et l'amortissement

$$C = \frac{2\zeta K}{\omega} \quad (\text{II-21})$$

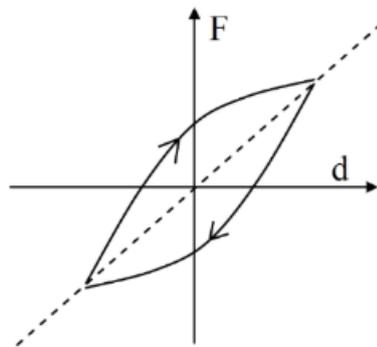


Figure 40. Amortissement hystérétique (Combesure, 2006)

Parmi les trois amortissements détaillés ci-dessus, c'est l'amortissement de Rayleigh qui semble convenir le plus à notre cas d'étude. En effet l'amortissement hystérétique n'est défini que dans le cas d'une loi sinusoïdale, ce qui n'est pas représentatif d'un choc, dans le cas de l'amortissement visqueux, les modes de basse fréquence sont généralement trop peu amortis (Combesure, 2006; Tautou, 2016).

II.2.9. Conditions aux limites

II.2.9.1. Plaque monocouche

Pour éviter le mouvement des corps rigides, la simulation requiert des conditions aux limites mécaniques afin de réaliser une analyse dynamique transitoire. Pour le cas de la structure monocouche, il faut inhiber le mouvement de la plaque. En plus de l'implémentation des frontières absorbantes, deux conditions aux limites ont été testées pour la structure sous forme de plaque monocouche. Le premier cas (CL1) consiste à bloquer la surface inférieure dans les trois directions et le deuxième cas (CL2) consiste à bloquer trois points le premier dans les trois directions (P1), le deuxième selon x et y (P2) et le troisième selon la direction x (P3). Les deux cas des conditions aux limites sont illustrés dans la Figure 41. Dans ce qui suit, les simulations avec les conditions aux limites (CL1) et (CL2) seront référées à simulation CL1 et CL2 respectivement. D'après l'Eq. (I-16) le pic correspondant à l'épaisseur de la géométrie simulée dans un essai Impact-Echo, appliqué sur une plaque monocouche de 25 cm d'épaisseur, devrait être situé à une fréquence autour de 7,5 kHz. La Figure 42 illustre les spectres de fréquences obtenus suites aux simulations CL1 et CL2. On peut voir apparaître un pic autour de la fréquence 11,1kHz pour le spectre de fréquence obtenu suite à la simulation avec la surface inférieure bloquée (CL1). Cette fréquence, reportée dans l'Eq. (I-16), permet d'obtenir une estimation d'épaisseur de 16,9cm alors que l'épaisseur intégrée dans la simulation est de 25cm. Cette fréquence ne correspond donc pas à la réflexion des ondes à partir de la face inférieure de la plaque monocouche qui devrait se situer autour de 7,5kHz telle qu'attendue dans le cadre de la théorie de l'Impact-Echo. La Figure 42 montre que le pic autour de la fréquence 7,5kHz correspondant à la réflexion des ondes de compression à partir de la face inférieure de la plaque monocouche n'apparaît pas, même avec des amplitudes plus faibles pour la simulation CL1. Pour la simulation CL2 on obtient un pic à la fréquence 7,5kHz ce qui correspond à la réflexion des ondes à partir de la face inférieure du monocouche et permet d'estimer l'épaisseur de la couche à 25 cm.

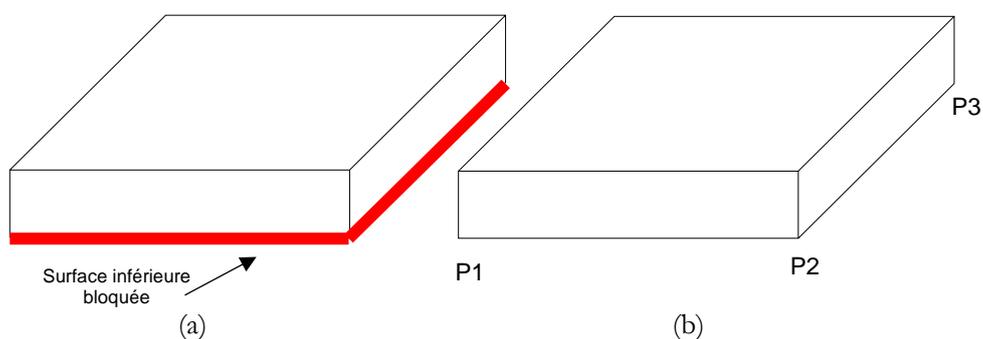


Figure 41. Conditions aux limites pour une structure sous forme de plaque monocouche
 (a) CL1 : Blocage des déplacements de la surface inférieure (b) CL2 : Blocage des déplacements en trois points

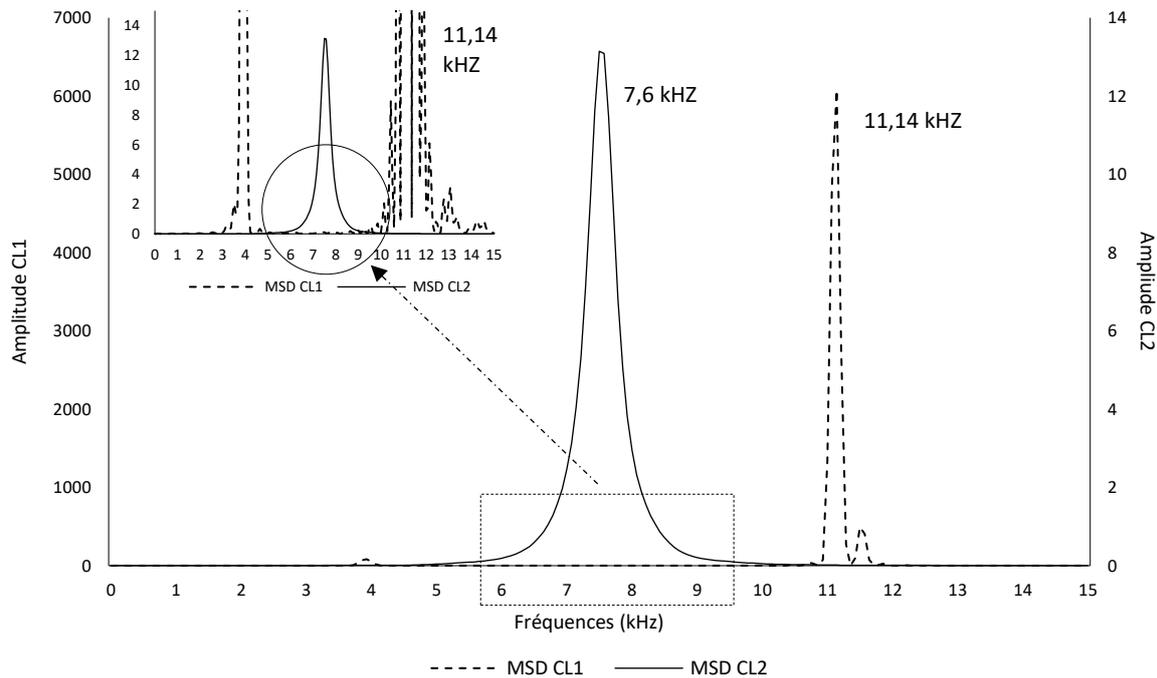


Figure 42. Réponse de la simulation d'une structure sous forme de plaque monocouche pour les conditions aux limites CL1 et CL2 dans le domaine fréquentiel – en médaillon le même graphique en utilisant la même échelle pour les deux amplitudes

Le blocage de la surface inférieure (CL1) inhibe les réflexions des ondes à partir de la face inférieure de la plaque monocouche. Par conséquent donne un résultat incohérent et peut fausser l'interprétation des résultats de la simulation si cette dernière n'est pas interprétée avec précaution. La Figure 43 illustre les réponses des simulations CL1 et CL2 dans le domaine temporel. On peut remarquer que les réflexions des ondes à partir des limites encastrées perturbent la forme de l'onde pour la simulation CL1, et l'arrivée de l'onde P n'est plus détectable contrairement à la simulation avec les conditions aux limites CL2. La forme de l'onde correspondant à la simulation CL2 présente une forme simple avec une période régulière qui traduit la périodicité des réflexions entre la surface d'impact et la face inférieure de la plaque monocouche. Par contre, à la forme de l'onde correspondant à la simulation CL1, présente une forme plus complexe dominée par une période t_p . Cette période ne correspond pas au pic observé à la Figure 42 et correspond à la fréquence 48,7 kHz. On peut aussi remarquer sur la même figure une grande différence dans l'amplitude des pics de fréquences. Les amplitudes de la simulation avec les conditions aux limites CL1 sont de l'ordre de 10^3 tandis que pour la simulation CL2 les amplitudes des pics de fréquences sont autour de 10^1 . Ces amplitudes importantes traduisent les vibrations de la structure et non celle de la matière. Par conséquent, le blocage de la face de réflexion des ondes inhibe ces réflexions.

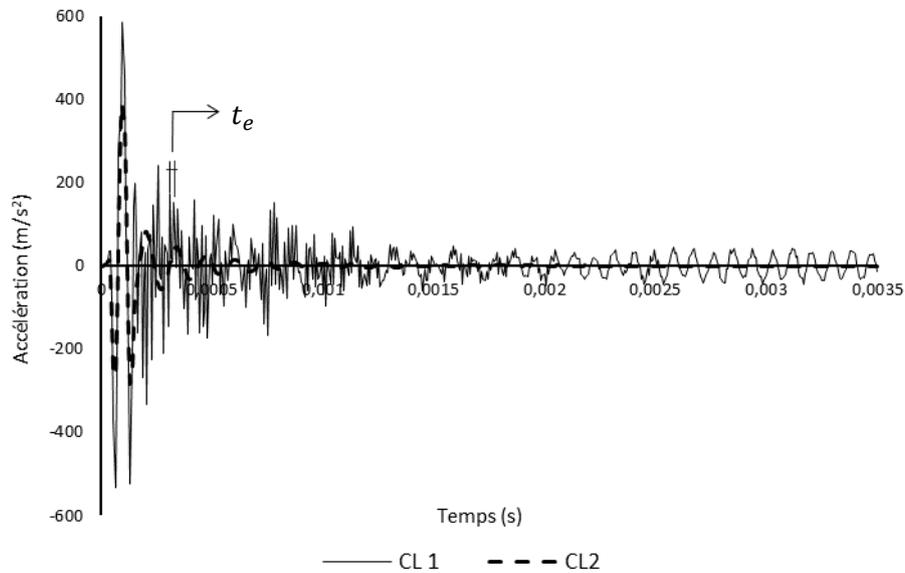


Figure 43. Réponse de la simulation d'une structure sous forme de plaque monocouche pour les conditions aux limites CL1 et CL2 dans le domaine temporel

II.2.9.2. Plaque bicouche

Pour le cas d'une structure bicouche, il faut aussi inhiber le mouvement de la plaque. Comme pour la structure en forme de plaque monocouche, deux conditions aux limites CL1 et CL2 ont été testées pour la structure sous forme de plaque bicouche. Les conditions aux limites CL1 et CL2 présentées à la Figure 44 ont été décrites dans le paragraphe précédent. En fonction des paramètres introduits lors des simulations, le spectre de fréquence devrait présenter deux pics autour des fréquences de 3,4kHz et 8,1kHz respectivement. Le premier pic autour de 3,4kHz correspond aux réflexions des ondes de compression à partir de la face inférieure de la structure sous forme de plaque bicouche. Le deuxième pic autour de 8,1kHz correspond aux réflexions des ondes à partir de l'interface située entre les deux couches. La Figure 45 illustre les spectres fréquentiels obtenus suites aux simulations CL1 et CL2. Pour la simulation CL1 on voit apparaître un pic unique autour de la fréquence 8kHz. Conformément au paragraphe précédent, la surface inférieure de la plaque bicouche bloquée dans les trois directions inhibe la réflexion des ondes de compression ce qui explique l'absence de pic autour de 3,4kHz. Pour la simulation CL2, on voit apparaître deux pics distincts aux fréquences 3,2kHz et 7,6kHz, qui correspondent aux réflexions des ondes de compression à partir de la face inférieure du bicouche et de l'interface entre les deux couches respectivement.

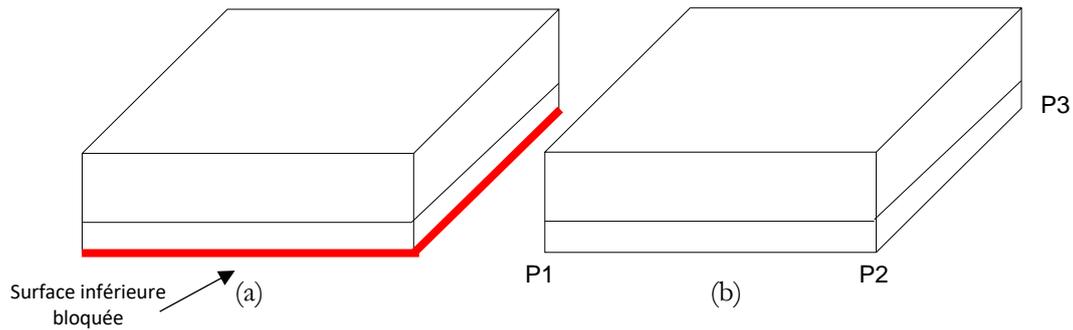


Figure 44. Conditions aux limites pour une structure sous forme de plaque bicouche CL1 : Blocage des déplacements de la surface inférieure (b) CL2 : Blocage des déplacements en trois points

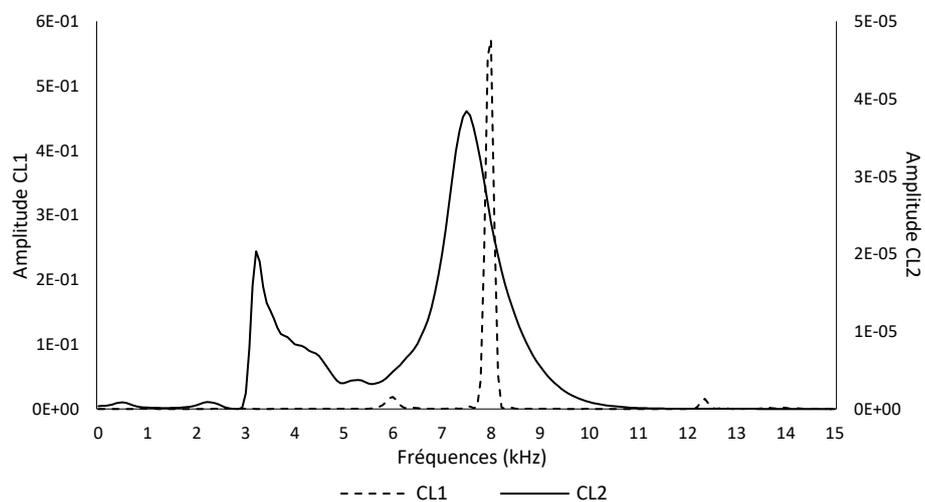


Figure 45. Réponse de la simulation d'une structure sous forme de plaque bicouche pour les conditions aux limites CL1 et CL2 dans le domaine fréquentiel

L'objectif de l'étude est de déterminer les positions de l'interface et du défaut situé dans la deuxième couche d'une structure en forme de plaque bicouche et non de détecter l'épaisseur de cette dernière. Donc dans le but de simplifier le spectre de fréquence et afin de se placer des conditions de structures réelles, nous avons inhibé le déplacement de la surface inférieure dans toutes les directions afin de nous placer dans des conditions de structure plus proches de la réalité.

II.2.10. Algorithme implicite vs explicite

Le type de schéma d'intégration dynamique (implicite ou explicite) utilisé dans les procédures EF détermine la taille de l'élément et l'incrément de temps utilisés dans l'analyse. Les critères sur

lesquels les schémas d'intégration sont comparés, sont le coût de calcul et la stabilité numérique pour parvenir à une solution précise du problème.

Dans une formulation explicite, les entités de réponses sont exprimées en termes de valeurs de déplacement, de vitesse et d'accélération préalablement déterminées. Ces méthodes ne nécessitent pas de factorisation de la matrice de rigidité et de masse dans la solution pas à pas, ce qui la rend plus économique en termes de temps de calcul. Cependant, un algorithme explicite est conditionnellement stable, ce qui signifie que l'incrément de temps Δt ne doit pas dépasser le pas de temps critique Δt_{cr} pour que la solution converge. Les schémas explicites sont souvent plus utiles pour les problèmes de propagation d'ondes qui traitent les hautes fréquences.

Dans le cas d'une analyse implicite, les matrices de masse [M] et de rigidité [K] sont construites pour chaque pas de temps. Pour un grand nombre d'éléments et de degrés de liberté, ces matrices deviennent assez grandes, ce qui augmente considérablement le temps de calcul. Un algorithme implicite est inconditionnellement stable, ce qui signifie que le résultat est stable quel que soit le pas de temps utilisés. La précision peut être grandement affectée. L'analyse implicite convient mieux au problème de la dynamique structurelle où la réponse est dominée par les modes inférieurs. En raison de la manipulation des basses fréquences et afin d'assurer un algorithme inconditionnellement stable, le schéma implicite est l'algorithme considéré pour cette étude.

II.3. Premiers résultats

Comme mentionné en introduction de ce chapitre, l'objectif est de simuler la propagation des ondes générées par impact mécanique dans une structure sous forme de plaque bicouche contenant un défaut. Le défaut est situé dans la seconde couche de la structure simulée. Cette géométrie vise à modéliser une partie d'un pont en maçonnerie qu'on souhaite investiguer. La première couche peut être assimilée à la voûte ou le mur de tête et la deuxième couche au remplissage située au-delà (Figure 30).

Pour le développement du code EF nous avons décidé de procéder par étapes. Dans un premier temps la simulation est réalisée sur une plaque monocouche. Le matériau simulé est un matériau solide ayant les propriétés du béton ou de la pierre et en particulier du granite. Dans un deuxième temps, une deuxième couche est rajoutée à la plaque monocouche initialement simulée. Cette deuxième couche peut être assimilée à un matériau de remplissage tel que du sol ou un matériau sableux. Dans un troisième temps, un défaut est rajouté dans la deuxième couche pour représenter des défauts pouvant être situés dans le remplissage d'un pont en maçonnerie. Les résultats, obtenus aux différentes étapes du développement de la simulation EF, sont présentés et discutés ci-dessous.

Dans toutes les simulations, les ondes mécaniques sont générées numériquement au centre de la plaque en appliquant une force ponctuelle au milieu de la face supérieure de la plaque (Eq. II-5). Les mesures des accélérations sont effectuées en quatre points distants respectivement de 20%

(A_1), 30% (A_2), 40% (A_3) et 50% (A_4) de l'épaisseur de la première couche. Ce critère, mentionné au paragraphe I.6.2.2 et énoncé par Sansalone and Carino en 1986, permet de capturer les réflexions des ondes de manière optimale. Dans un premier temps les mesures enregistrées en ces quatre points sont traitées dans le domaine temporel afin de supprimer l'arrivée l'onde de Rayleigh. La suppression de l'arrivée de cette onde de la réponse temporelle est l'approche optimale qui permet de faciliter l'identification des pics correspondants aux profondeurs des interfaces, des défauts ou de toute configuration pouvant engendrer une réflexion (Sansalone et Carino, 1986).

Ensuite, les réponses obtenues seront transformées dans le domaine fréquentiel à l'aide de la fonction mathématique appelée 'Transformé de Fourier'. Enfin, la densité spectrale multi-croisée (MSD) est calculée à partir des transformées obtenues aux quatre points de mesures (Medina et Garrido, 2007) à l'aide de l'équation (II-22). Seules les fréquences avec des amplitudes élevées dans tous les spectres de fréquence auront des amplitudes élevées dans la MSD. Les réflexions multiples des ondes de compression entre la surface d'impact, et la surface inférieure donnent lieu à des résonances transitoires qui apparaîtront sous forme de pic et qui seront identifiées à partir de cette densité spectrale multi-croisée (MSD) et utilisées pour identifier l'épaisseur des couches ou la position du défaut.

$$S_n(\omega) = \prod_{i=1}^n |X_i(\omega)| \quad (\text{II-22})$$

Dans la suite de ce manuscrit, nous allons nous référer à MSD (*multicross-spectral density*) en mentionnant les densités spectrales multi-croisées.

II.3.1. Comportement d'une plaque monocouche

Les premières simulations sont réalisées sur des structure sous forme de plaques monocouches (Figure 46). Le Tableau 15 résume les paramètres utilisés dans les quatre simulations réalisées sur les plaques monocouches. Les simulations ont a été réalisées sur deux types de matériaux et deux épaisseurs différentes. Dans les deux premières simulations, le matériau possède les propriétés du béton et seule l'épaisseur de la couche est variée. Dans la troisième et quatrième simulation, la couche possède des propriétés pouvant être attribuées à une roche granitique. Ici aussi, seules les épaisseurs des couches ont été variées. Les densités spectrales multi-croisées de chacune des simulations sont représentées dans les Figure 47 et Figure 48.

En théorie, les densités spectrales multi-croisées des différentes simulations devraient présenter respectivement, un pic unique à une fréquence particulière qui correspondrait, à la périodicité des réflexions multiples des ondes de compressions générées par impact, entre la surface d'impact et la face inférieure de la plaque. Ces fréquences théoriques, peuvent être calculées à partir de l'équation

ci-dessous (II-23). Dans cette configuration, le facteur géométrique β est pris égal à 0,96 conformément à la correction nécessaire à une structure sous forme de plaque.

$$f = \frac{\beta V_p}{2e_1} \quad (\text{II-23})$$

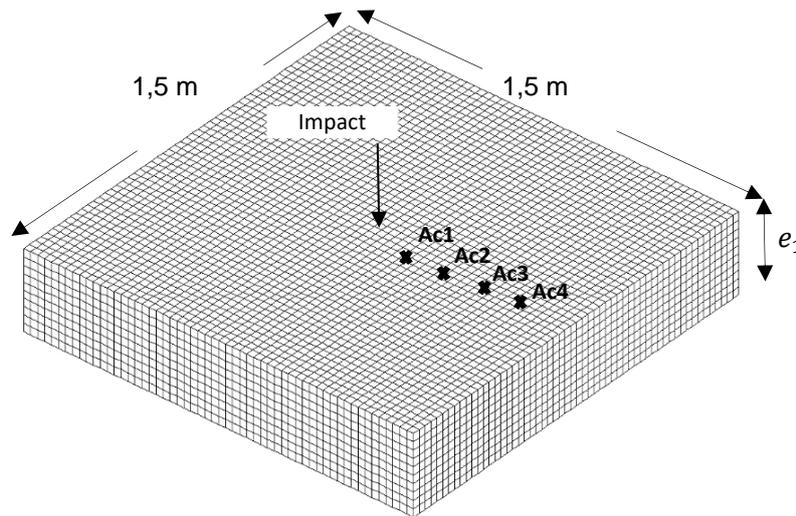


Figure 46. Maillage d'une plaque monocouche d'épaisseur e_1 simulé sur Cast3M©

Tableau 15. Données des simulations numériques réalisées sur les plaques monocouches

Paramètres	Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3	Simulation 4
E [Gpa]	32	32	75	75
ρ [kg/m ³]	2300	2300	2750	2750
ν	0,2	0,2	0,3	0,3
V_p [m/s]	3931	3931	6059	6059
Z [kg/m ² .s]	$9,04 \times 10^6$	$9,04 \times 10^6$	$1,67 \times 10^7$	$1,67 \times 10^7$
e_1 [m]	0,25	0,375	0,25	0,375
$f_{ep.th}$ [kHz]	7,5	5	11,7	7,8

Les simulations 1 et 2, correspondent aux simulations numériques d'un essai Impact-Echo réalisé sur des plaques monocouches, ayant les propriétés d'un matériau tel le béton (Tableau 15), et d'épaisseur 25cm et 37,5cm respectivement. La Figure 47 présente les MSDs correspondantes à ces deux simulations. Dans cette figure, on voit apparaître un unique pic à la fréquence 7,6kHz pour la simulation 1 et un pic autour de 5,1kHz pour la simulation 2. Ces fréquences correspondent à la périodicité des réflexions des ondes de compression entre les surfaces d'impacts et les faces inférieures des plaques monocouches. En reportant ces fréquences dans l'Eq.(II-23), et avec la

vitesse de propagations des ondes de compressions dans le béton, on obtient des épaisseurs égales à 24,9cm et 37,2cm. soit une estimation des épaisseurs réelles avec un taux d'erreur de 0,3% et 0,8% respectivement.

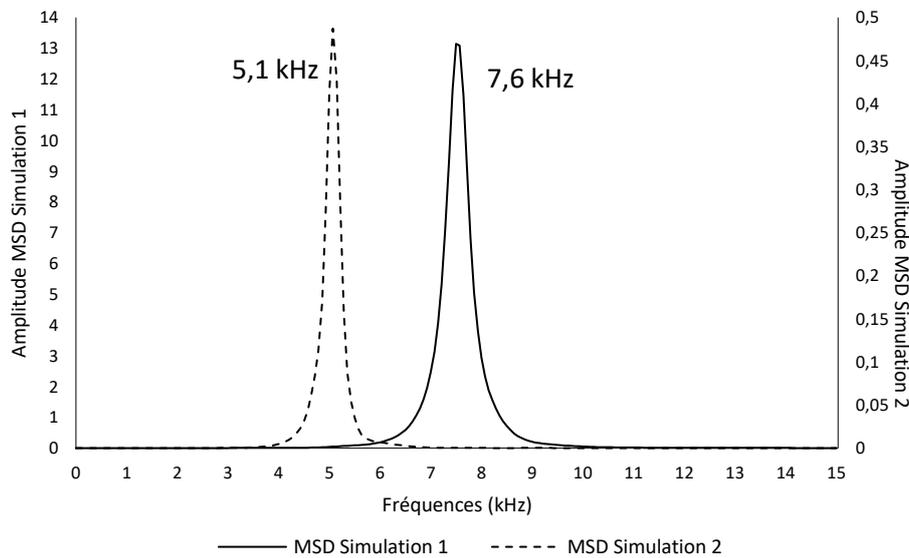


Figure 47. MSDs obtenues à partir des simulation 1 et 2

Les simulations 3 et 4 correspondent aux simulations d'un essai Impact-Echo réalisé sur une plaque composée d'un matériau ayant les propriétés d'une roche, en particulier en granite. Les propriétés mécaniques de ces deux simulations sont résumées dans le Tableau 15. La simulation 3 correspond à une plaque de 25cm d'épaisseur et la simulation 4 à une plaque de 37,5cm d'épaisseur. La Figure 48 présente les MSDs respectivement des simulations 3 et 4. On y voit apparaître un pic à la fréquence 11,5 kHz pour la simulation 3 et un pic à la fréquence 7,7kHz pour la simulation 4. Ces fréquences correspondent à la périodicité des réflexions des ondes de compression entre la surface d'impact et la face inférieure de la plaque. Ces fréquences, reportées dans la formule de l'Impact-Echo (Eq.(II-23)), permettent d'estimer les épaisseurs des plaques à 25,3cm et 37,7cm. Ces estimations présentent un taux d'erreur respectif de 1,2% et 0,5% par rapport aux épaisseurs réelles introduites dans les simulations.

Dans les Figure 47 et Figure 48 on peut constater que l'ordre de grandeur des amplitudes diffère entre les simulations 1 et 2 et les simulations 3 et 4. L'amplitude est plus faible pour les épaisseurs les plus grandes. Ce phénomène traduit l'effet de l'amortissement.

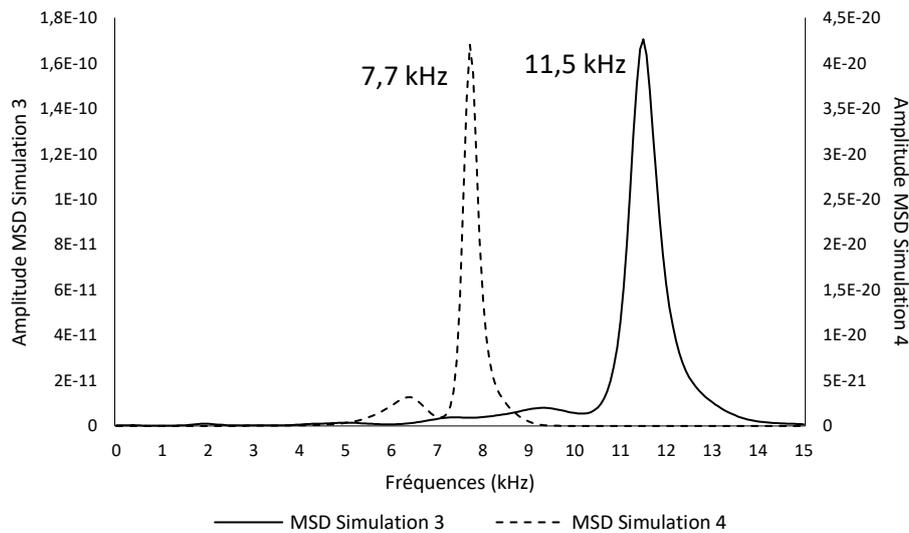


Figure 48. MSDs obtenues à partir des simulation 3 et 4

Analyse statistique

Le Tableau 16 résume les variables d'entrées des différentes simulations réalisées sur les structures sous forme de plaques monocouches saines, ainsi que les variables de sortie, à savoir l'amplitude A et la fréquence f du pic dominant les MSDs des simulations 1 et 2 (Figure 47) et des simulations 3 et 4 (Figure 48). La fréquence f de chaque pic correspond à la périodicité des réflexions des ondes entre la surface d'impact et la face inférieure du monocouche. À partir de cette fréquence f on devrait pouvoir déterminer l'épaisseur du monocouche e_1 . Le Tableau 17 présente les corrélations entre les différentes variables d'entrée (introduit dans les simulations) à savoir l'épaisseur de la couche e_1 et la vitesse de propagation des ondes de compressions V_{P1} ainsi que les variables de sortie (obtenues à partir des simulations) comme les fréquences f et les amplitudes A des pics dominant les MSDs. L'objectif de cette analyse est d'étudier l'influence de la variation des épaisseurs et des propriétés du matériau constituant la couche sur la détection de l'épaisseur de la plaque e_1 , et de pouvoir exprimer e_1 en fonction de la fréquence f et de l'amplitude A du pic dominant de la MSD.

Tableau 16. Variables d'entrée et de sortie des simulations des structures sous formes de plaques monocouches saines

Simulation	e_1	V_{P1}	f	V_{P1}/f	A	$\ln(A)$
Simulation 1	0,25	3931	7571	0,52	1,31E ⁺⁰¹	2,57
Simulation 2	0,375	3931	5071	0,78	4,87E ⁻⁰¹	-0,72
Simulation 3	0,25	6059	11500	0,53	1,70E ⁻¹⁰	-22,49
Simulation 4	0,375	6059	7714	0,79	4,20E ⁻²⁰	-44,62

Tableau 17. Coefficients de corrélations entre les variables d'entrée et de sortie des simulations sur la plaque monocouche

	e_1	A	$\ln(A)$	f	V_{P1}	V_{P1}/f
e_1	1	-0,562	-0,335	-0,684	0	<u>0,999</u>
A		1	0,600	-0,127	-0,606	-0,580
$\ln(A)$			1	-0,386	<u>-0,909</u>	-0,367
f				1	0,716	-0,660
V_{P1}					1	0,034
V_{P1}/f						1

Le tableau ci-dessus montre une corrélation de 99,9% entre les épaisseurs e_1 et le rapport des vitesses de propagations des ondes de compressions introduites dans les simulations à la fréquence du pic dominant la MSD obtenue à partir de la simulation V_{P1}/f . En se basant sur cette corrélation, on trace la Figure 49 qui relie les épaisseurs e_{1lin} au rapport V_{P1}/f ainsi que la courbe de tendance linéaire représentant la tendance des données. Cette courbe de tendance donne la relation linéaire suivante :

$$e_{1lin} = a_1x + b_1 \quad (\text{II-24})$$

Avec $a_1 = 0,4852$ représentant la pente de la droite et $b_1 = -0,0037$ l'ordonnée à l'origine.

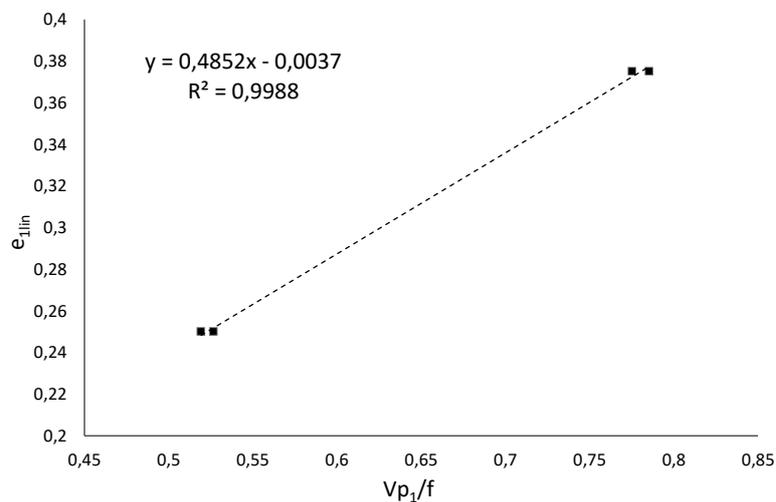


Figure 49. Représentation de l'estimation de l'épaisseur e_{1lin} en fonction du rapport de la vitesse V_{P1} et la fréquence f pour les simulations des plaques monocouches

Il est aussi possible de faire une régression linéaire complète calculer par la méthode des moindres carrés afin de prendre en compte différents variables de sorties. Pour calculer cette régression linéaire on prend en compte comme variables de sortie des données du Tableau 16, soit l'amplitude A , la fréquences f et le rapport vitesse sur fréquence V_{P1}/f . On trouve un résultat intéressant pour l'estimation de l'épaisseur e_{1reg} . Le Tableau 18 résume les coefficients obtenus à partir ce modèle de régression linéaire afin d'ajuster la profondeur e_{1reg} selon l'équation suivantes :

$$e_{1reg} = m_{11} \frac{V_{P1}}{f} + m_{21}f + m_{31}A + b_{11} \quad (\text{II-25})$$

avec m_{11} , m_{21} et m_{31} les coefficient pondérant respectivement les paramètre V_{P1}/f , f , A et b_{11} l'ordonnée à l'origine vérifiant l'équation ci-dessus.

Tableau 18. Coefficient de pondération des paramètres A , f et V_{P1}/f

Paramètres	m_{11}	m_{21}	m_{31}	b_{11}
Coefficients	0,457	-1,80E-06	-2,77E-04	2,99E-02

Le Tableau 19 présente les estimations d'épaisseurs obtenues à partir de la formule de l'Impact-Echo e_{1IE} , la relation linéaire limité e_{1a_1} (ne prenant pas en compte l'ordonnée à l'origine b_1), la relation linéaire e_{1lin} , et la régression linéaire e_{1reg} ainsi que les taux d'erreurs respectifs $Err_{e_{1IE}}$ (%), $Err_{e_{1a_1}}$ (%), $Err_{e_{1lin}}$ (%) et $Err_{e_{1reg}}$ (%) par rapport aux épaisseurs introduites dans les simulations. L'épaisseur e_{1lin} , obtenue à partir de la courbe de tendance linéaire (II-24) donne des taux d'erreur moyen de l'ordre 0,7% contre 0,68% pour les taux d'erreur obtenue à partir de la formule de l'Impact-Echo e_{1IE} et 1,25% pour la relation linéaire limité e_{1a_1} (ne prenant pas en compte l'ordonnée à l'origine b_1). On peut constater que malgré les faibles coefficients de corrélations entre les e_1 et A (56,2%) et entre e_1 et f (68,4%), ces paramètres permettent d'affiner l'estimation des épaisseurs e_1 . Ce qui suggère que l'amplitude intervient, même faiblement (corrélacion 56%), dans l'estimation des épaisseurs e_1 . Rappelons qu'initialement, l'amplitude A n'intervient pas dans la formule de l'Impact-Echo et n'est pas considérée comme un paramètre indicateur influant dans le calcul de la réponse d'un essai Impact-Echo.

Tableau 19. Comparaison des différentes profondeurs obtenue à partir des différentes méthodes

Simulation	e_1	e_{1IE}	$Err_{e_{1IE}}$ (%)	e_{1a_1}	$Err_{e_{1a_1}}$ (%)	e_{1lin}	$Err_{e_{1lin}}$ (%)	e_{1reg}
Simulation 1	0,25	0,249	0,3	0,252	0,8	0,248	0,7	0,25
Simulation 2	0,375	0,372	0,8	0,376	0,3	0,372	0,7	0,375
Simulation 3	0,25	0,253	1,2	0,256	2,3	0,252	0,8	0,25
Simulation 4	0,375	0,377	0,5	0,381	1,6	0,377	0,6	0,375

A partir du Tableau 17 on peut aussi constater une corrélation de 90,9% entre les vitesses de propagations des ondes compressions V_{P1} et les amplitudes A des pics dominants mesurées à partir des MSDs. Cette amplitude n'est en revanche pas liée à la fréquence (corrélation de 12%) ni à la profondeur (corrélation 56,2%). Comme l'amplitude dépend des vitesses de propagation V_{P1} et que cette vitesse obéit à l'Eq. (I-7) donc cette amplitude A dépend uniquement du type du milieu qu'elle traverse et est faiblement indicatrice de la profondeur P (coefficient de corrélation de 56,6%).

Pour résumer, les quatre simulations d'essais Impact-Echo réalisées sur des plaques monocouches en béton ou en granite avec des épaisseurs égales à 25cm ou 37,5cm, permettent d'obtenir des estimations d'épaisseur assez précises avec un taux d'erreur entre 0,3% et 1,2%. Ces taux d'erreurs ont été calculés à partir des estimations d'épaisseur obtenues à partir de la formule de l'Impact-Echo. Pour estimer ces épaisseurs cette formule prend en compte la vitesse de propagation des ondes de compression dans la couche V_{P1} ainsi que la fréquence f du pic dominant la MSD. Avec 4 coefficients à déterminer et 4 résultats, on trouve effectivement des estimations e_{1reg} avec un taux d'erreurs nul, ce qui est normal et non représentatif. Par la suite on continuera à regarder l'influence de l'amplitude sur l'identification de l'épaisseur de la couche.

Ces résultats permettent de confirmer la validité de cette simulation appliquée aux plaques monocouches composées de matériaux solide comme la roche de granite ou le béton. Dans le paragraphe suivant, nous allons rajouter une deuxième couche à la plaque monocouche initialement simulée afin de constituer la structure bicouche.

II.3.2. Comportement d'une plaque bicouche saine

La deuxième étape du développement de la simulation numérique consiste à rajouter une deuxième couche au monocouche précédemment simulé. La première couche représente un matériau solide ayant des propriétés pouvant être assimilées à un matériau tel que le béton, la pierre ou la maçonnerie. La deuxième couche peut être assimilée à un matériau de remplissage, tel que du sol ou un matériau sableux faiblement ou fortement compacté. On rappelle que le choix de ces matériaux est fait afin de se positionner dans le cas de matériaux structuraux réel. Comme pour les simulations réalisées sur les monocouches, les ondes mécaniques sont générées au centre de la plaque et les mesures réalisées en quatre points distants respectivement de 20%, 30%, 40% et 50% par rapport à l'épaisseur de la première couche (Figure 50). Les positions des quatre points de mesure des accélérations sont identiques à celles choisies pour la simulation de la plaque monocouche. Ces positions de mesures seront maintenues identiques afin de faciliter les comparaisons des spectres de fréquences au fur et à mesure de l'avancement de l'étude et mettre en évidence l'influence des différents paramètres liés à la géométrie simulée.

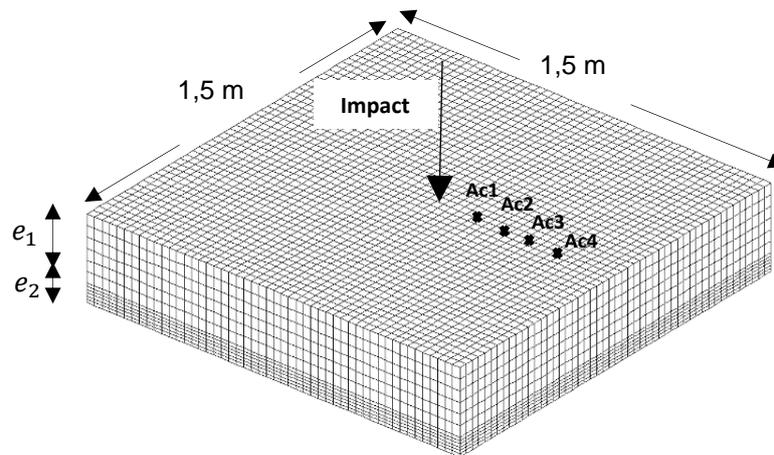


Figure 50. Maillage d'une plaque bicouche simulée sur Cast3M©

Le contact entre les deux couches, est supposé parfait et le maillage entre les deux couches est continu. Différentes simulations ont été réalisées afin d'étudier la variation du comportement de la plaque bicouche saine en fonction des matériaux et de la géométrie (Tableau 20). Deux matériaux avec des propriétés mécaniques différentes ont été choisis pour la première couche ainsi que la deuxième couche. Et deux valeurs de l'épaisseurs de la première couche e_1 ont été considérées. L'épaisseur de la deuxième couche e_2 ici est égale à 16cm, et sera maintenue identique tout au long des simulations.

Tableau 20. Matrice d'analyse comparant divers paramètres utilisés dans l'étude

Simulations	e_1 [m]	E_1 [GPa]	ν_1	ρ_1 [kg/m ³]	E_2 [GPa]	ν_2	ρ_2 [kg/m ³]
Simulation 1	0,25	32	0,2	2300	3,8	0,33	1400
Simulation 2	0,25	32	0,2	2300	3,8	0,33	2150
Simulation 3	0,375	32	0,2	2300	3,8	0,33	1400
Simulation 4	0,375	32	0,2	2300	3,8	0,33	2150
Simulation 5	0,25	75	0,3	2750	3,8	0,33	1400
Simulation 6	0,25	75	0,3	2750	3,8	0,33	2150
Simulation 7	0,375	75	0,3	2750	3,8	0,33	1400
Simulation 8	0,375	75	0,3	2750	3,8	0,33	2150

II.3.2.1. Simulations 1 et 2

La Figure 51 illustre la superposition des MSDs des simulations 1 sur plaque monocouche (Figure 46) et sur plaque bicouche (Figure 50). Comme décrit dans le paragraphe II.3.1, dans la MSD correspondante à la simulation 1 réalisée sur plaque monocouche, on voit apparaître un pic autour de la fréquence 7,6kHz ce qui permet d'estimer l'épaisseur de la couche avec un taux d'erreur

de 0,3%. Dans la MSD correspondant à la simulation 1 réalisée sur plaque bicouche, on voit apparaître un pic autour de 8,2kHz. La fréquence à ce pic, une fois reportée dans l'équation (II-23) permet d'estimer l'épaisseur de la première couche à 23,9cm soit une estimation de l'épaisseur avec un taux d'erreur de 4,3%.

Notons que le facteur géométrique β pour les structures sous forme de plaque bicouche est pris égale à 1 (contrairement au cas de la plaque monocouche où il est pris par exemple égale à 0,96 pour une structure sous forme de plaque). En effet, pour une structure bicouche, la correction géométrique n'est plus applicable pour la détermination de la première couche car cette dernière n'est plus libre de vibrer de manière indépendante comme le ferait une plaque monocouche et ce, en raison de la présence de la deuxième couche qui bloque cette vibration (Sansalone et Streett, 1997). Le facteur géométrique β est donc pris égale à 1. Sur cette même figure, on peut aussi remarquer que les amplitudes mesurées à partir des simulations des structures sous forme de plaque bicouche sont jusqu'à 40 fois plus importantes que les amplitudes mesurées dans les simulations des plaques monocouches. Même si l'interprétation d'un essai Impact-Echo ne repose pas sur la lecture des amplitudes des pics mais uniquement sur leurs positions sur l'axe des fréquences, il serait intéressant d'étudier l'influence des différents paramètres introduits dans la simulation sur l'amplitude des pics.

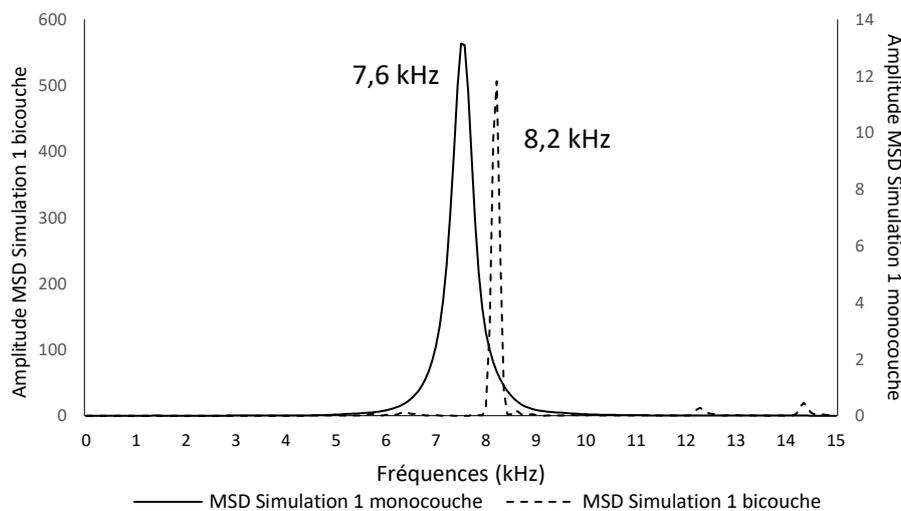


Figure 51. Superposition des MSDs obtenues à partir de la simulation 1 sur la plaque monocouche et la simulation 1 sur plaque bicouche

La Figure 52 présente la superposition des MSDs des simulation 1 sur plaque monocouche et simulation 2 sur plaque bicouche. En effet, dans ces deux simulations, la première couche a la même épaisseur. On peut remarquer la quasi-superposition des pics à la fréquence 7,6kHz pour la plaque monocouche et 7,5kHz pour la plaque bicouche. Pour une plaque monocouche, la fréquence à ce pic permet d'estimer l'épaisseur de la première couche avec un taux d'erreur de

0,3%. Pour une plaque bicouche, cette même fréquence estime l'épaisseur de la première couche avec un taux d'erreur de 4,8% en introduisant dans l'Eq. (II-23) le facteur géométrique β cette fois-ci égal à 1. On peut remarquer que pour la simulation 2 de la plaque bicouche deux autres pics apparaissent : un pic à la fréquence 14kHz, qui représente le pic dominant de la MSD et un pic autour de 7,9kHz qui représente le pic le plus petit de la MSD.

La Figure 53 présente la superposition des MSD obtenue suite aux simulations 1 et 2 de structure sous forme de plaque bicouche. Seule la masse volumique ρ_2 de la deuxième couche est variée comme indiqué au Tableau 20. Due à cette variation, la simulation 1 présente un matériau (constituant la deuxième couche) moins compact que le matériau de la simulation 2. La MSD de la simulation 1 présente un pic autour de la fréquence 8,2kHz. Cette fréquence, estime l'épaisseur de la première couche avec un taux d'erreur de 4,3% pour un facteur géométrique adéquat $\beta=1$ (Sansalone et Carino, 1986). La MSD de la simulation 2 présente deux pics : un pic dominant à la fréquence 14kHz et un deuxième pic autour de 7,5kHz. Ce deuxième pic estime l'épaisseur à 26,2cm soit un taux d'erreur de 4,8% si le facteur géométrique adéquat $\beta=1$ est utilisé. Rappelons que les dimensions et les propriétés mécaniques de la première couche sont maintenues identiques pour les deux simulations et uniquement la masse volumique de la deuxième couche a été variée. Par conséquent la vitesse de propagation des ondes de compression V_{p1} et l'épaisseur e_1 de la première couche ne varient pas. Et comme le facteur géométrique β est pris égal à 1, à partir de l'équation (II-23) on devrait obtenir un pic, à la même fréquence pour les deux simulations, qui correspond à la réflexion des ondes de compression à partir de l'interface entre les deux milieux. La Figure 53, montre que malgré toutes ces conditions, les pics correspondant à la réflexion des ondes à partir de l'interface entre les deux couches ne coïncident pas en fréquence. Ce qui suggère que les propriétés mécaniques (et plus précisément la masse volumique) de la deuxième couche influence le comportement du spectre de fréquence et en particulier la position du pic relatif à la fréquence liée à la réflexion des ondes à partir de l'interface. Pour la simulation 2, un deuxième pic apparaît autour de 14kHz et domine le spectre de fréquence. Ce pic peut être assimilé à la vibration de la structure et non de la matière et apparaît uniquement pour cette simulation où la masse volumique ρ_2 est de 2150 kg/m³.

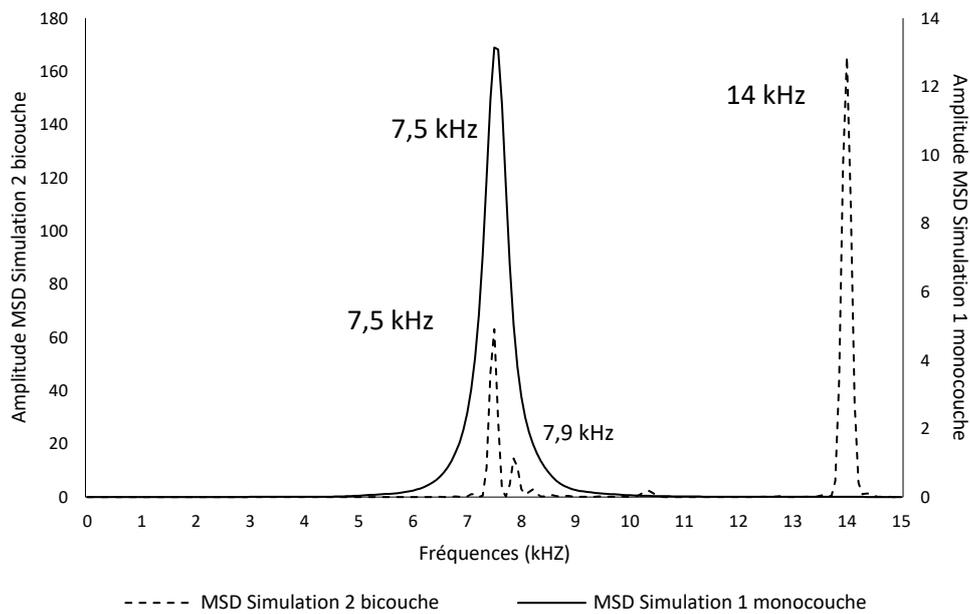


Figure 52. Superposition des MSDs obtenues à partir de la simulation 1 sur la plaque monocouche et de la simulation 2 sur plaque bicouche

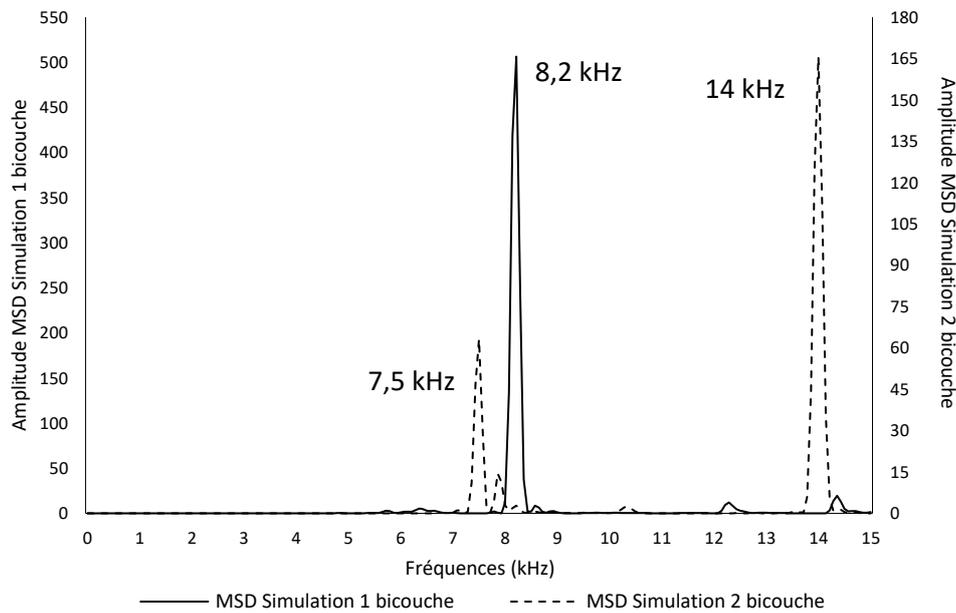


Figure 53. Superposition des MSDs obtenues à partir de la simulation 1 et de la simulation 2 sur des plaques bicouches

II.3.2.2. Simulation 3 et 4

La Figure 54 présente la superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 2 sur la plaque monocouche et 3 sur la plaque bicouche. Rappelons que les dimensions et les propriétés mécaniques de la première couche demeurent invariables entre les deux simulations. Conformément au paragraphe II.3.1, pour la simulation 2 de la structure monocouche, on retrouve un pic unique autour de la fréquence 5,1kHz. Cette fréquence permet d'estimer l'épaisseur de la première couche à 37,2cm soit un taux d'erreur de 0,8%, et ce en considérant un facteur géométrique $\beta=0,96$. Pour la simulation 3 réalisée sur une structure bicouche, on peut voir apparaître deux pics : un pic dominant à la fréquence 9,9kHz et un deuxième pic autour de 4,8kHz qui correspond a priori aux réflexions des ondes de compression à partir de l'interface entre les deux milieux. Cette fréquence, une fois reportée dans l'Eq. (II-23) et avec un facteur géométrique $\beta=1$ permet d'estimer l'épaisseur de la couche e_1 avec un taux d'erreur de 9,5%.

La Figure 55 illustre la superposition des MSDs obtenues à partir de la simulation 2 sur la plaque monocouche et la simulation 4 sur la plaque bicouche. Pour la simulation 4 réalisée sur une structure bicouche, on voit apparaître un pic dominant autour de la fréquence 4,8kHz qui correspond a priori aux réflexions des ondes de compression à partir de l'interface. Cette fréquence, une fois reportée dans l'Eq. (II-23) et avec un facteur géométrique $\beta=1$ permet d'estimer, elle aussi, l'épaisseur de la couche e_1 avec un taux d'erreur de 9,5%.

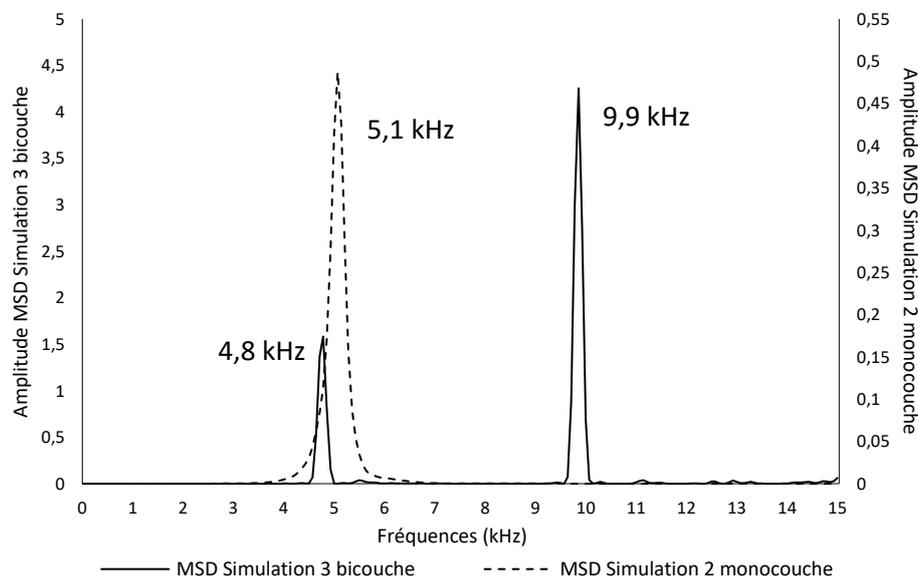


Figure 54. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 2 sur la plaque monocouche et de la simulation 3 sur plaque bicouche

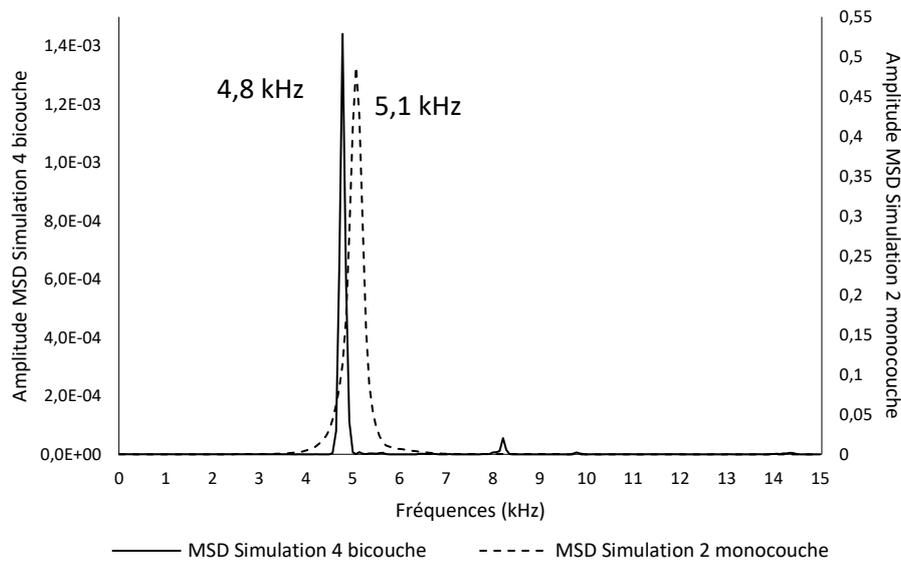


Figure 55. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 2 sur la plaque monocouche et de la simulation 4 sur plaque bicouche

La Figure 56 illustre la superposition des MSDs obtenue à partir des simulations 3 et 4 sur des plaques bicouches de 37,5cm d'épaisseur. On peut remarquer, malgré la différence dans les amplitudes, que les pics aux fréquences 4,8kHz, correspondant aux réflexions des ondes de compression à partir de l'interface entre les deux milieux, coïncident pour les deux simulations (simulation 3 et 4) même en variant les propriétés de la deuxième couche. Cette fréquence estime l'épaisseur avec un taux d'erreur de 9,5% pour les deux simulations. En effet, pour les conditions de ces simulations, on devrait s'attendre à un pic autour de 5,2 kHz en considérant un facteur géométrique $\beta=1$. On voit aussi apparaître à la simulation 3 un pic (qui domine le spectre en amplitude) qui peut être dû à la vibration de la structure. Contrairement au paragraphe précédent cette fois ci, ce pic apparaît pour la simulation avec la masse volumique $\rho_2 = 1400 \text{ kg/m}^3$.

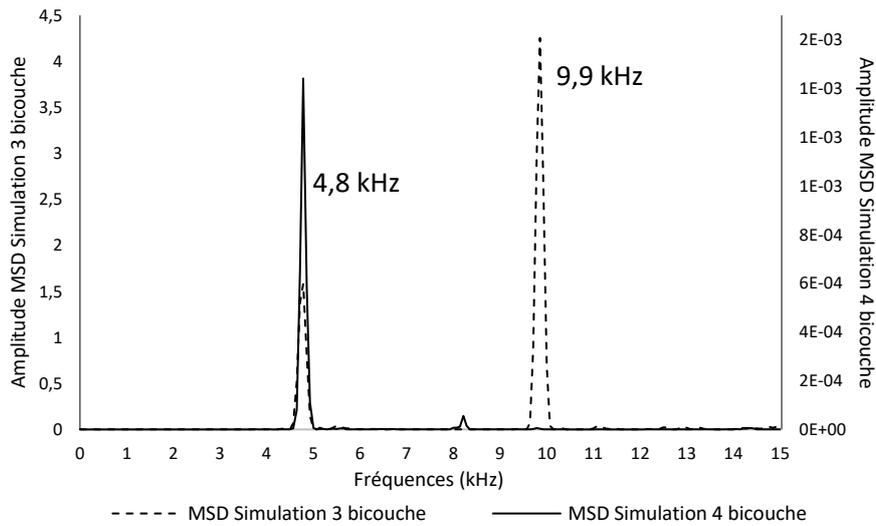


Figure 56. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 3 et 4 sur des plaques bicouches

II.3.2.3. Simulation 5 et 6

La Figure 57 présente la superposition des MSDs de la simulation 3 d'une structure monocouche composée d'un matériau pouvant être assimilé au granite et la simulation 5 d'une structure bicouche avec une première couche en granite et une deuxième pouvant représenter un matériau de remplissage. Pour la structure monocouche on observe un pic à la fréquence 11,5kHz soit une estimation de l'épaisseur, présentant un taux d'erreur de 1,2% en considérant un facteur $\beta=0,96$. Pour la simulation 5 de la structure bicouche, on voit apparaître dans la MSD un pic autour de la fréquence 10,9kHz. Cette fréquence estime l'épaisseur de la couche à 41cm soit une estimation avec un taux d'erreur de 10,9%, en considérant un facteur géométrique $\beta=1$.

La Figure 58 présente la superposition des MSDs de la simulation 3 d'une structure monocouche et de la simulation 6 d'une structure bicouche. Pour la simulation 6, un pic dominant autour 11,6 kHz apparaît. Cette fréquence permet d'avoir une estimation de l'épaisseur avec un taux d'erreur de 4,1%. Un deuxième pic moins dominant à la fréquence 9,7kHz apparaît sur la MSD de cette simulation. Ce pic, ne correspond pas à la réflexion des ondes à partir de l'interface ni à partir de la base inférieure de la structure, et sont peut-être à assimiler à la vibration de la structure.

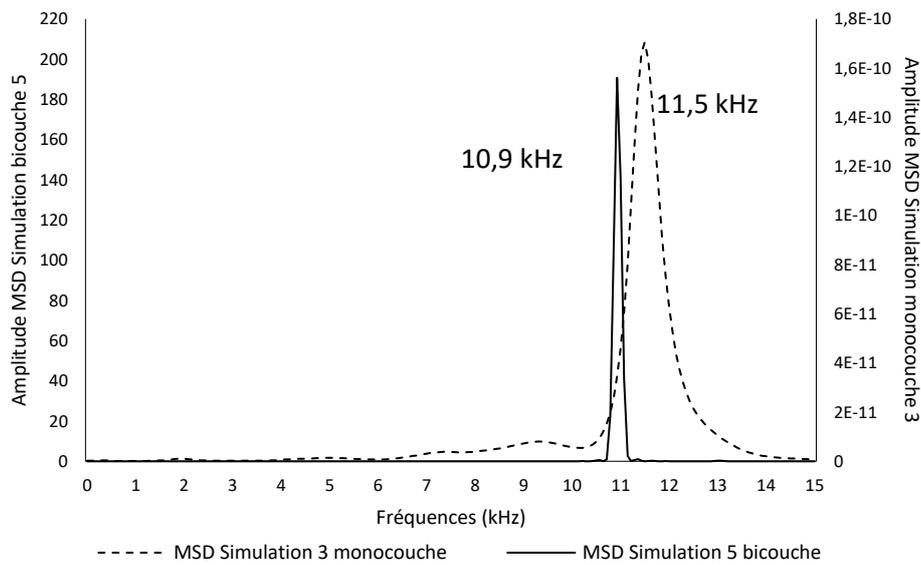


Figure 57. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 3 sur la plaque monocouche et 5 sur plaque bicouche

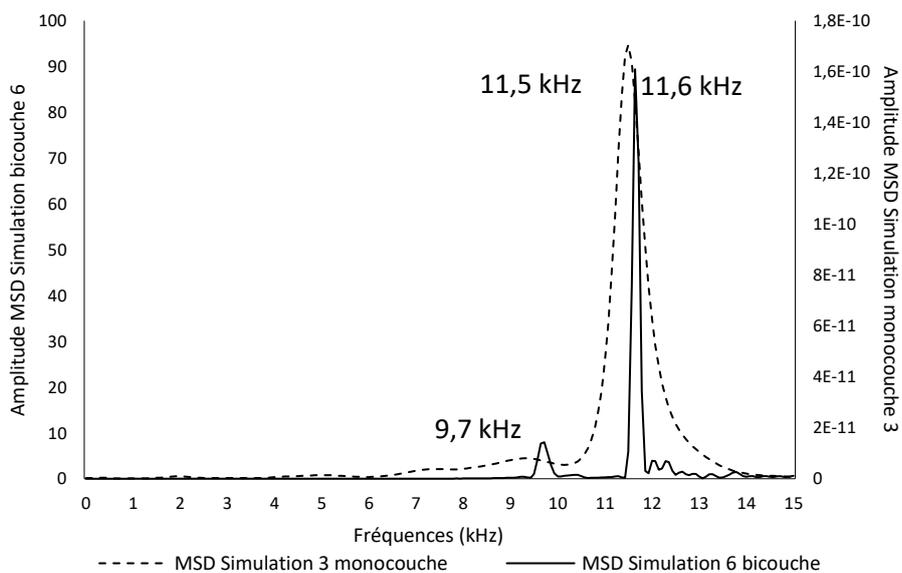


Figure 58. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 3 sur la plaque monocouche et 6 sur plaque bicouche

Dans la Figure 59, on superpose les MSDs obtenues à partir des simulations 5 et 6 en variant uniquement la masse volumique de la deuxième couche et par conséquent la vitesse de propagation des ondes de compression dans cette dernière. Un pic dominant apparaît dans chaque MSD. Les pics de la simulation 5 et de la simulation 6 permettent d'estimer l'épaisseur de la première couche

avec un taux d'erreur de 10,9% et 4,1% respectivement. Tout comme les simulations 1 et 2 malgré les paramètres identiques utilisés pour la première couche, les fréquences des pics ne coïncident pas. Ce qui suggère qu'ici aussi, les paramètres de la deuxième couche et en particulier la masse volumique de la deuxième couche influencent la position du pic de fréquence.

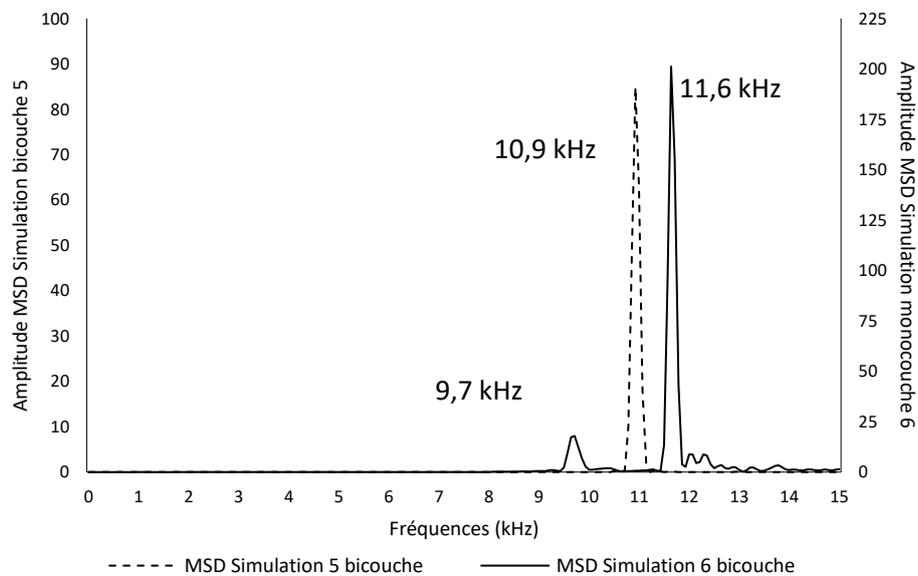


Figure 59. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulation 5 et simulation 6 sur des plaques bicouches

II.3.2.4. Simulation 7 et 8

La Figure 60 superpose les MSDs obtenues à partir de la simulation sur la plaque monocouche 4 et de la simulation sur plaque bicouche 7. Dans la MSD de la simulation monocouche, apparaît un pic à la fréquence 7,7kHz. Cette fréquence permet d'estimer l'épaisseur avec un taux d'erreur autour de 0,5%. Dans la MSD de la simulation 7 sur structure bicouche un pic à la fréquence 8kHz apparaît et permet d'estimer l'épaisseur avec un taux d'erreur de 1%. La Figure 61 superpose cette fois-ci les MSDs obtenues à partir de la simulation monocouche 4 et de la simulation bicouche 8. La MSD de la simulation 8, elle aussi, fait apparaître un pic à la fréquence 8kHz, soit une estimation de l'épaisseur avec un taux d'erreur de 1%. La Figure 62 illustre la superposition des MSD obtenues à partir des simulations 7 et 8. Dans les deux MSD on peut voir apparaître un unique pic dominant. Ces pics se superposent à la fréquence 8kHz.

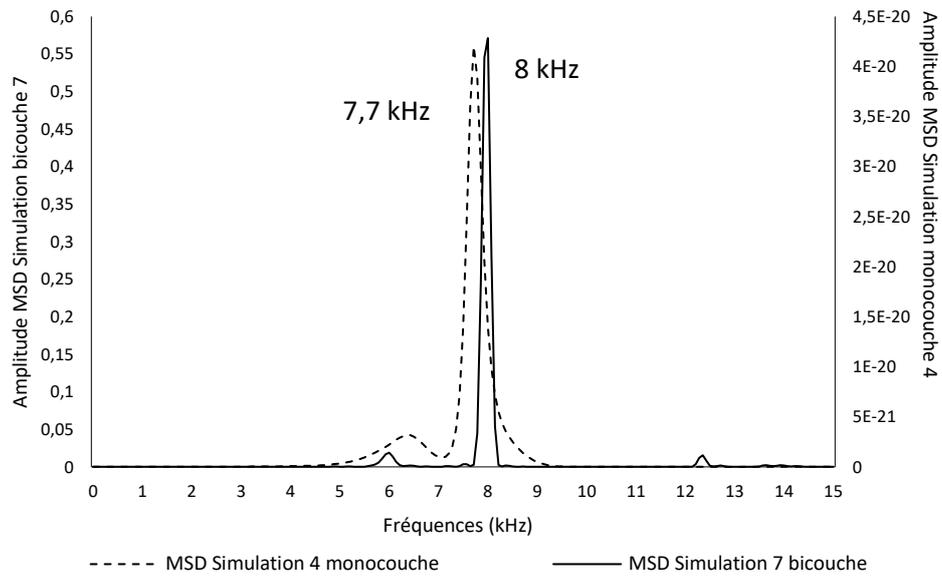


Figure 60. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 4 sur la plaque monocouche et 7 sur plaque bicouche

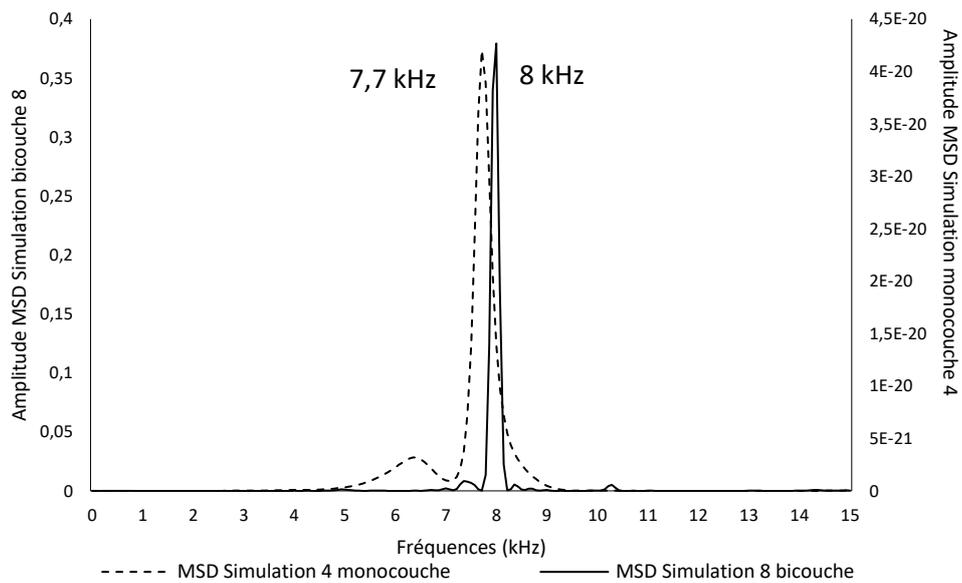


Figure 61. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 4 sur la plaque monocouche et 8 sur plaque bicouche

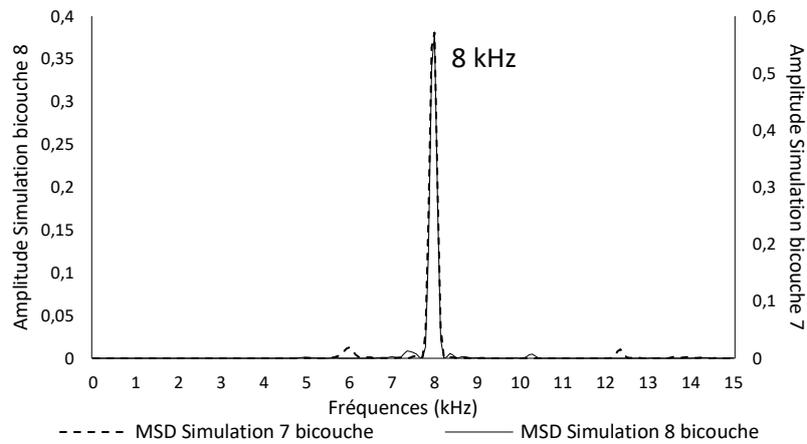


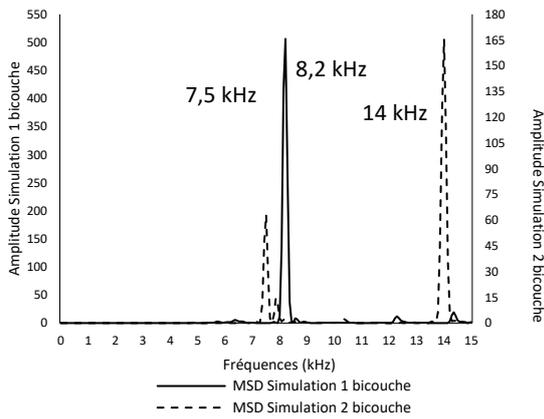
Figure 62. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 7 et 8 sur des plaques bicouches

II.3.2.5. Discussion

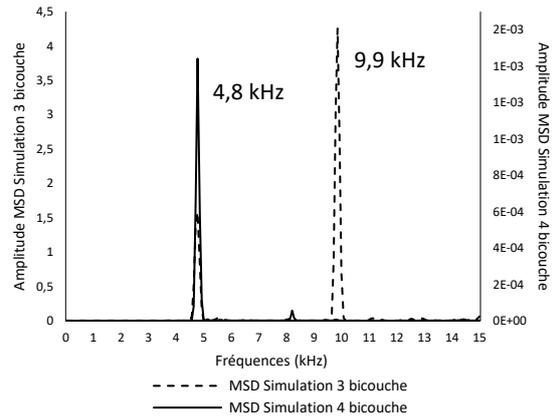
La Figure 63 présente le récapitulatif des MSDs obtenues à partir des simulations de structures sous forme de plaques bicouches saines. Plusieurs phénomènes ont pu être constatés lors de l'introduction de la deuxième couche et notamment la variation de la position du pic à la fréquence correspondant aux réflexions des ondes à partir de l'interface entre les deux milieux pour quasiment toutes les simulations (excepté pour la simulation 2). Cette variation est due au facteur géométrique β qui avait été pris égal à 0,96 pour les simulations des structures sous formes de plaques monocouche. Pour déterminer la position de l'interface entre les deux couches des plaques bicouches, le facteur géométrique est pris égal à 1. En effet, et à titre de rappel, pour une structure bicouche, la correction géométrique n'est plus applicable car la première couche n'est plus libre de vibrer de manière indépendante comme une plaque monocouche en raison de la présence de la deuxième couche qui bloque cette vibration (Sansalone et Streett, 1997).

Pour les couples des simulations 1 et 2 et simulations 5 et 6 avec pour épaisseur de la première couche $e_1=0,25\text{cm}$, un phénomène intéressant a été observé. En effet, et malgré le maintien des paramètres de géométrie (e_1) et de matériau (V_{p1}) identiques pour chaque couple, le pic correspondant à la réflexion des ondes varie sur l'axe des fréquences pour chacun des couples. Rappelons que seules les propriétés mécaniques de la deuxième couche ont été changées entre les simulations 1 et 2 et entre les simulations 5 et 6. Un constat non conforme à l'Eq. (II-23) qui ne fait intervenir que les propriétés mécaniques et de géométrie de la première couche. Ce qui implique que les propriétés mécaniques de la deuxième couche interviennent dans le calcul de l'épaisseur de la première couche e_1 . Pour les couples des simulations 3 et 4 et simulation 7 et 8 avec comme épaisseur de la première couche $e_1=0,375\text{cm}$, un autre phénomène a été constaté. Malgré les taux d'erreur variables dans l'estimation des épaisseurs (Tableau 21) les pics aux fréquences correspondants aux réflexions des ondes de compression à partir de l'interface cette fois-ci

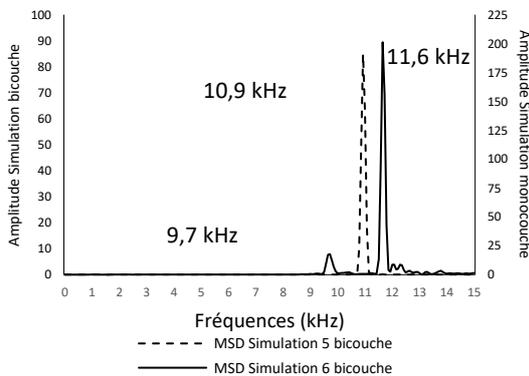
coïncident pour chaque couple de simulation. Ces deux phénomènes mettent en évidence la nécessité d'introduire un nouveau coefficient pour la formule de l'impact-Echo appliqué à l'étude des bicouches. Ce coefficient devrait à priori dépendre au moins des propriétés de la première couche et des propriétés mécaniques de la deuxième couche. La dépendance de ce coefficient par rapport à d'autres paramètres est envisageable.



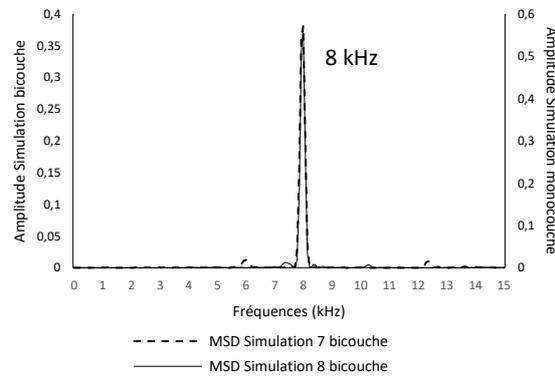
MSDs obtenues à partir des simulation 1 et simulation 2 sur des plaques bicouches



MSDs obtenues à partir des simulation 3 et simulation 4 sur des plaques bicouches



MSDs obtenues à partir des simulation 5 et simulation 6 sur des plaques bicouches



MSDs obtenues à partir des simulation 7 et simulation 8 sur des plaques bicouches

Figure 63. Récapitulatif des MSDs obtenues à partir des simulations réalisées sur des structures sous forme de bicouches saines

Tableau 21. Récapitulatif des taux d'erreur dans l'identification des épaisseurs de la première couche dans les structures sous forme de plaques bicouches

Simulations	1	2	3	4	5	6	7	8
Erreur (%)	4,3%	4,8%	9,5%	9,5%	10,9%	4,1%	1%	1%

II.3.2.6. Analyse statistique

Dans un premier temps, seuls les résultats des simulations des structures sous forme de plaques bicouches saines sont traités. Ensuite dans une deuxième approche, l'analyse sera réalisée sur l'ensemble des simulations des structures monocouche et bicouche en considérant la plaque monocouche comme un cas particulier de la plaque bicouche. En effet, une plaque monocouche peut-être imaginée comme une plaque bicouche mais avec une vitesse de propagation des ondes de compression dans la deuxième couche V_{P2} nulle, soit une rigidité E_2 nulle. L'objectif de cette démarche c'est de voir s'il est possible d'introduire une formule unique qui permettrait de décrire différentes configurations (monocouche ou bicouche).

Le Tableau 22 résume les différentes variables d'entrées des différentes simulations réalisées sur les structures sous forme de plaque bicouches saines, ainsi que les variables de sorties, à savoir l'amplitude A et la fréquence f du pic dominant le spectre de fréquence. La fréquence de ce pic correspond à la périodicité des réflexions des ondes entre la surface d'impact et l'interface entre des deux couches situées à une profondeur e_1 . Rappelons que dans toutes les simulations réalisées sur les structures sous formes de plaques bicouches saines, le pic correspondant aux réflexions des ondes de compression à partir de la face inférieure de la deuxième couche n'apparaît pas dans le spectre de fréquence. Donc seul le pic à la fréquence correspondant à la réflexion de ces ondes à partir de l'interface entre les deux couches situées à une profondeur e_1 sera attendue. Cette fréquence, identifiée à partir de la MSD servira à déterminer la profondeur de l'interface e_1 .

Tableau 22. Paramètres et résultats des simulations des structures sous formes de plaque bicouche saine

Simulation	e_1	f	V_{P1}	V_{P2}	V_{P1}/f	V_{P2}/f	$\ln(P)$	A	$\ln(A)$
Simulation 1	0,25	8214	3931	2000	0,48	0,24	-1,39	506,32	6,23
Simulation 2	0,25	7500	3931	1614	0,52	0,22	-1,39	63,15	4,15
Simulation 3	0,375	4785	3931,	2000	0,82	0,42	-0,98	1,58	0,46
Simulation 4	0,375	4785	3931	1614	0,82	0,34	-0,98	0,00	-6,54
Simulation 5	0,25	10928	6059	2000	0,55	0,18	-1,39	190,72	5,25
Simulation 6	0,25	11642	6059	1614	0,52	0,14	-1,39	89,41	4,49
Simulation 7	0,375	8000	6059	2000	0,76	0,25	-0,98	0,57	-0,56
Simulation 8	0,375	8000	6059	1614	0,76	0,20	-0,98	0,38	-0,97

Le Tableau 23 présente les corrélations entre les différentes variables d'entrée et les variables de sortie, introduites et obtenues à partir des simulations réalisées sur des structures sous forme de plaques bicouches saines. L'objectif c'est de pouvoir exprimer la profondeur de l'interface e_1 entre

les deux couches (Figure 50) en fonction de la fréquence f et de l'amplitude A du pic dominant les MSDs (Figure 63).

Tableau 23. Corrélation des variables d'entrée et de sorties des simulations

	e_1	A	$\ln(A)$	f	V_{P1}	V_{P2}	V_{P1}/f	V_{P2}/f
e_1	1	-0,647	-0,865	-0,687	0	0	0,977	0,636
A		1	0,665	0,321	-0,222	0,418	-0,707	-0,243
$\ln(A)$			1	0,685	0,122	0,320	-0,888	-0,545
f				1	0,718	0	-0,715	-0,906
V_{P1}					1	0	-0,051	-0,657
V_{P2}						1	-0,010	0,300
V_{P1}/f							1	0,701
V_{P2}/f								1

Comme pour les données des simulations réalisées sur les monocouches, une forte corrélation de 97,7% est observée entre les profondeurs des interfaces e_1 et le rapport entre les vitesses de propagations des ondes de compressions et la fréquence du pic dans le spectre de fréquence obtenu à partir de la simulation, V_{P1}/f . En se basant sur cette corrélation, on trace la Figure 64 qui relie les profondeurs e_{1lin} au rapport V_{P1}/f ainsi que la courbe de tendance linéaire qui relie les données. A partir de cette courbe de tendance on peut trouver une relation linéaire suivante :

$$e_{1lin} = a_2x + b_2 \quad (\text{II-26})$$

Avec $a_2 = 0,4415$ la pente de la droite et $b_2 = 0,0235$ l'ordonnée à l'origine.

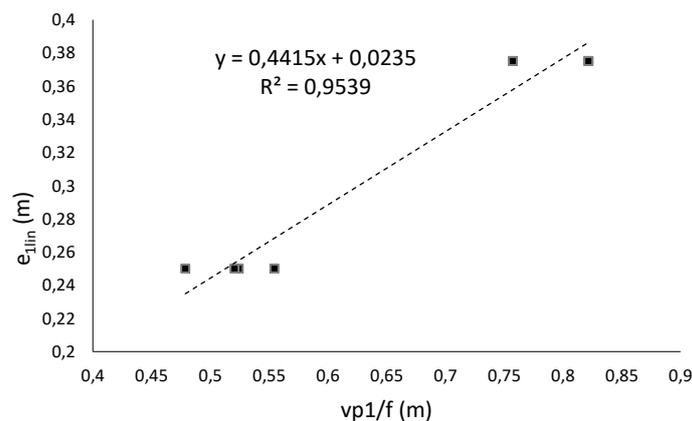


Figure 64. Représentation de l'estimation de la profondeur e_{1lin} en fonction du rapport de la vitesse V_{P1} et la fréquence f pour les simulations des plaques bicouches

Une autre corrélation de 86,5% entre la profondeur e_1 et le logarithme népérien de l'amplitude $\ln A$ est constatée. La Figure 65 illustre cette corrélation qui relie $\ln A$ à la profondeur de l'interface entre les deux milieu e_1 ainsi que la courbe de tendance linéaire qui relie les données. Une tendance peut être observée montrant la relation entre le log de l'amplitude $\ln A$ et la profondeur de l'interface e_1 , ce qui signifie que l'on doit probablement prendre en compte l'amplitude dans l'estimation de la profondeur.

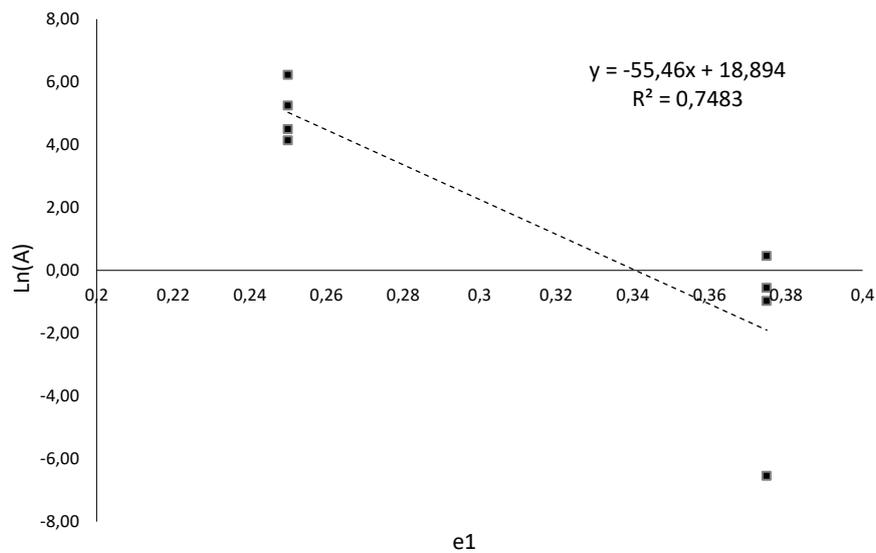


Figure 65. Représentation de l'estimation du logarithme népérien de l'amplitude $\ln A$ des pics en fonction de la profondeur P pour les simulations des plaques bicouches

Il est aussi possible de faire une régression linéaire complète où on prend en compte comme variables, des données du Tableau 22, soit l'amplitude A , la fréquence f , le rapport vitesse de propagation dans la couche 1 sur fréquence V_{P1}/f ainsi que le rapport de la vitesse de propagation de la vitesse dans la couche 2 sur la fréquence V_{P2}/f . On trouve un résultat intéressant de profondeur e_{1reg} . Le Tableau 24 donne les coefficients obtenus à partir ce modèle de régression linéaire afin d'ajuster la profondeur de l'interface e_{1reg} selon l'équation suivantes :

$$e_{1reg} = m_{12} \frac{V_{P1}}{f} + m_{22} f + m_{32} A + m_{42} \frac{V_{P2}}{f} + b_{22} \quad (\text{II-27})$$

Avec m_{12} , m_{22} , m_{32} et m_{42} les coefficients pondérant respectivement chaque paramètre V_{P1}/f , f , A et V_{P2}/f et b_{22} l'ordonnée à l'origine vérifiant l'équation ci-dessus.

Tableau 24. Coefficient de pondération des paramètres A , f , V_{P1}/f et V_{P2}/f

Paramètres	m_{12}	m_{22}	m_{32}	m_{42}	b_{22}
Coefficients	0,495	9,55E-08	4,78E-05	-0,037	-9,23E-03

Le Tableau 25 réunit les épaisseurs obtenues à partir de la formule de l'Impact-Echo e_{1IE} , la relation linéaire limité e_{1a_1} et la régression linéaire e_{1reg} ainsi que les taux d'erreurs respectifs $Err_{e_{1IE}}$ (%), $Err_{e_{1a_1}}$ (%) et $Err_{e_{1reg}}$ (%). La profondeur e_{1reg} obtenue à partir de la régression linéaire présente le taux d'erreur le plus faible et par conséquent donne les meilleurs résultats, en effet une erreur moyenne de 3,2% a été observée. La profondeur e_{1lin} , obtenue à partir de la courbe de tendance linéaire donne des taux d'erreur moyen de l'ordre 4% contre 5,6% pour les taux d'erreur obtenus à partir de la formule de l'Impact-Echo e_{1IE} et 7,7% pour la relation linéaire limité e_{1a_2} (ne prenant pas en compte l'ordonnée à l'origine b_2). Le taux d'erreur le plus bas est obtenu à partir de la régression linéaire prenant en compte à la fois la fréquence f , et l'amplitude A du pic correspondant à cette fréquence. Ce qui suggère qu'ici aussi l'amplitude intervient, même faiblement (corrélation 64,7%), dans l'estimation des profondeurs d'interfaces e_1 .

Tableau 25. Comparaison des différentes profondeurs obtenue à partir des différentes méthodes

Simulation	e_1	e_{1IE}	$Err_{e_{1IE}}$ (%)	e_{1a_1}	$Err_{e_{1a_1}}$ (%)	e_{1lin}	$Err_{e_{1lin}}$ (%)	e_{1reg}	$Err_{e_{1reg}}$ (%)
Simulation 1	0,25	0,239	4,3	0,211	15,5	0,235	6,1	0,244	2,5
Simulation 2	0,25	0,262	4,8	0,231	7,4	0,255	2,0	0,246	1,6
Simulation 3	0,375	0,411	9,6	0,363	3,3	0,386	3,0	0,383	2,0
Simulation 4	0,375	0,411	9,6	0,363	3,3	0,386	3,0	0,386	2,8
Simulation 5	0,25	0,277	10,9	0,245	2,1	0,268	7,3	0,269	7,5
Simulation 6	0,25	0,260	4,1	0,230	8,1	0,253	1,3	0,249	0,5
Simulation 7	0,375	0,379	1,0	0,334	10,8	0,358	4,6	0,357	4,7
Simulation 8	0,375	0,379	1,0	0,334	10,8	0,358	4,6	0,359	4,2

Le Tableau 26 présente les variables d'entrées des différentes simulations réalisées sur les structures sous forme de plaque monocouches et sous forme de plaque bicouches saines, ainsi que les variables de sorties (l'amplitude A et la fréquence f du pic dominant les MSDs) correspondantes pour chaque simulation. La fréquence f de ce pic correspond à la périodicité des réflexions des ondes de compressions entre la surface d'impact et l'interface e_1 entre les deux couches. Seul le pic à la fréquence pouvant correspondre à cette réflexion sera analysé. Cette fréquence, identifiée à partir de la MSD servira à déterminer l'épaisseur du monocouche ou la profondeur de l'interface entre les deux couches e_1 en fonction de la structure simulée.

A titre de rappel, dans ce paragraphe on considère que les simulations sur les plaques monocouches sont un cas particulier des simulations des plaques bicouches avec un module d'Young E_2 nul et par conséquent la vitesse de propagation des ondes de compression dans le second milieu (qui n'existe pas) V_{P2} est considérée nulle.

Tableau 26. Paramètres et résultats des simulations des structures sous forme de plaques monocouches et bicouches saines

	Simulation	e_1	f	V_{P1}	V_{P2}	V_{P1}/f	V_{P2}/f	$\ln(P)$	A	$\ln(A)$
Monocouche	Simulation 1	0,25	7571	3931	0	0,52	0	-1,39	1,31E+01	2,57
	Simulation 2	0,375	5071	3931	0	0,78	0	-0,98	4,87E-01	-0,72
	Simulation 3	0,25	11500	6059	0	0,53	0	-1,39	1,70E-10	-22,49
	Simulation 4	0,375	7714	6059	0	0,79	0	-0,98	4,20E-20	-44,62
Bicouche	Simulation 1	0,25	8214	3931	2000	0,48	0,24	-1,39	506,32	6,23
	Simulation 2	0,25	7500	3931	1614	0,52	0,22	-1,39	63,15	4,15
	Simulation 3	0,375	4785	3931	2000	0,82	0,42	-0,98	1,58	0,46
	Simulation 4	0,375	4785	3931	1614	0,82	0,34	-0,98	0,00	-6,54
	Simulation 5	0,25	10928	6059	2000	0,55	0,18	-1,39	190,72	5,25
	Simulation 6	0,25	11642	6059	1614	0,52	0,14	-1,39	89,41	4,49
	Simulation 7	0,375	8000	6059	2000	0,76	0,25	-0,98	0,57	-0,56
	Simulation 8	0,375	8000	6059	1614	0,76	0,20	-0,98	0,38	-0,97

Le Tableau 27 présente les corrélations entre les différentes variables d'entrée et les variables de sorties réalisées sur des structures sous forme de plaques monocouches et bicouches saines. L'objectif est de pouvoir exprimer la profondeur de l'interface entre les deux couches e_1 (ou bien l'épaisseur de la première couche si on est sur une simulation monocouche) en fonction de différents paramètres, à savoir la fréquence f , l'amplitude A du pic dominant la MSD obtenues à partir de chaque simulation.

Tableau 27. Corrélations des variables d'entrée et de sorties des simulations

	e_1	A	$\ln(A)$	f	V_{P1}	V_{P2}	V_{P1}/f	V_{P2}/f
e_1	1	-0,504	-0,312	-0,686	0,000	0,000	0,983	0,262
A		1	0,357	0,246	-0,178	0,408	-0,559	0,180
$\ln(A)$			1	-0,040	-0,382	0,597	-0,321	0,449
f				1	0,717	0,004	-0,697	-0,371
V_{P1}					1	0,000	-0,024	-0,271
V_{P2}						1	0,008	0,876
V_{P1}/f							1	0,304
V_{P2}/f								1

Comme pour les données des simulations réalisées sur les monocouches, une forte corrélation de 98,3% est constatée entre les profondeurs des interfaces e_1 et le rapport entre les vitesses de propagation des ondes de compression et la fréquence du pic dans le spectre de fréquence obtenu à partir de la simulation, V_{P1}/f . En se basant sur cette corrélation, on trace la Figure 66 qui relie les profondeurs des interfaces e_{1lin} au rapport V_{P1}/f ainsi que la courbe de tendance linéaire qui relie les données. A partir de cette courbe de tendance on peut trouver une relation linéaire suivantes :

$$e_{1lin} = a_3x + b_3 \quad (\text{II-28})$$

Avec $a_3 = 0,4547$ la pente de la droite et $b_3 = 0,0153$ l'ordonnée à l'origine. D'après la Figure 66, on voit que tous les points pour lesquels $e_1 = 0,25m$ n'ont pas le même rapport V_{P1}/ρ , il en est de même pour les points ayant $e_1 = 0,375m$. L'écartement de ces points explique la corrélation de 0,98. En effet entre ces deux nuages de points, on peut toujours trouver une droite avec une bonne corrélation. Si les nuages sont peu étalés la corrélation sera très bonne. C'est presque le cas ici.

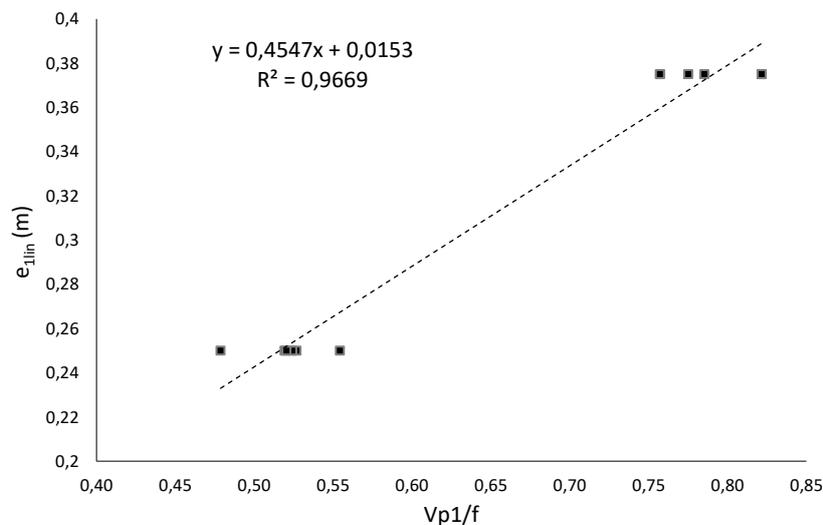


Figure 66. Représentation de l'estimation de la profondeur e_{1lin} en fonction du rapport de la vitesse V_{P1} et la fréquence f pour les simulations des plaques bicouches

Ici aussi il est possible de faire une régression linéaire complète où on prend en compte comme variables les données du Tableau 26, soit l'amplitude A , la fréquences f et les rapports vitesse sur fréquence V_{P1}/f et V_{P2}/f . On trouve un résultat intéressant de profondeur e_{1reg} .

Le Tableau 28 résume les coefficients obtenus à partir ce modèle de régression linéaire afin d'ajuster la profondeur e_{1reg} selon l'équation suivante :

$$e_{1reg} = m_{13} \frac{V_{P1}}{f} + m_{23}f + m_{33}A + m_{43} \frac{V_{P2}}{f} + b_{33} \quad (II-29)$$

Avec m_{13} , m_{23} , m_{33} et m_{43} les coefficients pondérant respectivement chaque paramètre V_{P1}/f , f , A , et V_{P2}/f et b_{33} l'ordonnée à l'origine vérifiant l'équation ci-dessous.

Tableau 28. Coefficient de pondération des paramètres A , f , V_{P1}/f et V_{P2}/f

Paramètres	m_{13}	m_{23}	m_{33}	m_{43}	b_{33}
Coefficients	0,495	9,55E-08	4,78E-05	-0,037	-9,23E-03

Le Tableau 29 présente les épaisseurs obtenues à partir de la formule de l'Impact-Echo e_{1IE} , la relation linéaire limitée e_{1a_1} (ne prenant pas en compte l'ordonnée à l'origine b_3), la relation linéaire e_{1lin} et la régression linéaire e_{1reg} ainsi que les taux d'erreurs respectifs $Err_{e_{1IE}}$ (%), $Err_{e_{1a_1}}$ (%) et $Err_{e_{1reg}}$ (%). La profondeur e_{1reg} obtenue à partir de la régression linéaire présente le taux d'erreur le plus faible et par conséquent donne les meilleurs résultats, en effet une erreur moyenne de l'ordre de l'ordre de 2,7% a été observée. La profondeur e_{1lin} , obtenue à partir de la courbe de tendance linéaire donne des taux d'erreur moyen de l'ordre 3,1% contre 4% pour les taux d'erreur obtenu à partir de la formule de l'Impact-Echo P_{IE} et 5,1% pour la relation linéaire limitée e_{1a_3} .

Tableau 29. Comparaison des différentes profondeurs obtenue à partir des différentes méthodes

	Simulation	e_1	e_{1IE}	$Err_{e_{1IE}}$ (%)	e_{1a_1}	$Err_{e_{1a_1}}$ (%)	e_{1lin}	$Err_{e_{1lin}}$ (%)	e_{1reg}	$Err_{e_{1reg}}$ (%)
Monocouche	Simulation 1	0,25	0,249	0,3	0,236	5,55	0,251	0,58	0,249	0,3
	Simulation 2	0,375	0,372	0,8	0,353	5,99	0,368	1,90	0,375	0,1
	Simulation 3	0,25	0,253	1,2	0,240	4,18	0,255	1,96	0,253	1,1
	Simulation 4	0,375	0,377	0,5	0,357	4,76	0,372	0,68	0,381	1,5
Bicouche	Simulation 1	0,25	0,239	4,3	0,218	12,95	0,233	6,81	0,253	1,1
	Simulation 2	0,25	0,262	4,8	0,238	4,66	0,254	1,48	0,254	1,7
	Simulation 3	0,375	0,411	9,6	0,374	0,37	0,389	3,72	0,398	6,2
	Simulation 4	0,375	0,411	9,6	0,374	0,37	0,389	3,72	0,398	6,2
	Simulation 5	0,25	0,277	10,9	0,252	0,84	0,267	6,97	0,276	10,2
	Simulation 6	0,25	0,260	4,1	0,237	5,35	0,252	0,79	0,254	1,6
	Simulation 7	0,375	0,379	1,0	0,344	8,17	0,360	4,08	0,367	2,2
	Simulation 8	0,375	0,379	1,0	0,344	8,17	0,360	4,08	0,367	2,2

D'après le Tableau 25 et le Tableau 29, on peut constater que les taux d'erreurs obtenus à partir du traitement des résultats des monocouches et bicouches combinés sont légèrement plus bas que les taux d'erreur obtenus à partir des données du bicouche uniquement. On peut considérer par

conséquent la structure monocouche comme un cas particulier des structures bicouches avec une vitesse de propagation des ondes compression V_{p2} nulle. Pour les deux cas, les estimations des épaisseurs de la première couche ou des profondeurs des interfaces e_1 donnent des taux d'erreur assez faibles.

Dans la suite de l'étude, nous introduisons un défaut dans la deuxième couche à une distance d par rapport à l'interface entre les deux couches.

II.3.3. Comportement d'une plaque bicouche contenant un défaut

Dans la troisième étape du développement de la simulation élément finis, nous introduisons un défaut situé dans la deuxième couche de la structure simulée au paragraphe II.3.2. Comme on peut le voir sur la Figure 67, le défaut est situé à une distance d de l'interface entre les deux milieux. Le défaut possède les propriétés d'un vide afin d'assurer une réflexion maximale de l'onde à partir de ce dernier. Le défaut est simulé sous la forme parallélépipédique ($0,2 \times 0,2 \times 0,02m^3$) comme indiqué sur la Figure 68. Les dimensions latérales sont choisies pour 'théoriquement' garantir la détection du défaut. En effet, ces dimensions sont supérieures la longueur d'onde minimale générée par impact λ_{min} (paragraphe I.6.3.1). Les dimensions du défaut sont maintenues constantes dans toutes les simulations à une distance d par rapport à l'interface entre les deux couches. La distance d est prise supérieure à la moitié de la longueur d'onde minimale générée par impact afin d'assurer sa détection. Toutes les simulations réalisées au paragraphe II.3.2 pour une structure sous forme de plaque bicouche saine ont été reconduites en y intégrant le défaut dans la seconde couche. Le Tableau 29 résume les différentes simulations en fonction des matériaux et de la géométrie. Dans ce paragraphe d est maintenue identique et prise égale à 7cm.

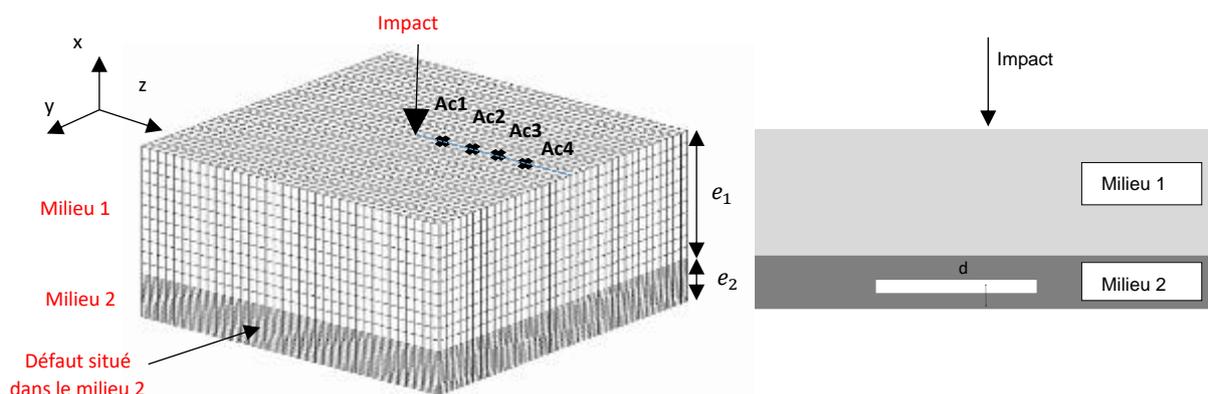


Figure 67. Géométrie de la structure bicouche contenant un défaut, simulée sur Cast3M©

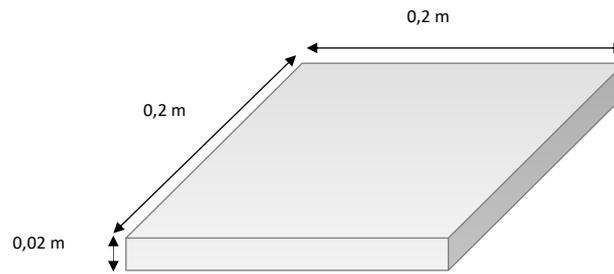


Figure 68. Dimensions du défaut intégrées dans la simulation

Tableau 30. Matrice d'analyse comparant divers paramètres utilisés dans l'étude pour une structure sous forme de plaque bicouche contenant un défaut

Simulations	e_1 [m]	E_1 [GPa]	ν_1	ρ_1 [kg/m ³]	d [cm]	E_2 [GPa]	ν_2	ρ_2 [kg/m ³]
Simulation 1	0,25	32	0,2	2300	7	3,8	0,33	1400
Simulation 2	0,25	32	0,2	2300	7	3,8	0,33	2150
Simulation 3	0,375	32	0,2	2300	7	3,8	0,33	1400
Simulation 4	0,375	32	0,2	2300	7	3,8	0,33	2150
Simulation 5	0,25	75	0,3	2750	7	3,8	0,33	1400
Simulation 6	0,25	75	0,3	2750	7	3,8	0,33	2150
Simulation 7	0,375	75	0,3	2750	7	3,8	0,33	1400
Simulation 8	0,375	75	0,3	2750	7	3,8	0,33	2150

II.3.3.1. Simulation 1

La Figure 69 présente la superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 1 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut à une distance d de l'interface. Dans la MSD correspondant à la simulation 1 de la plaque bicouche saine, on voit apparaître un pic autour de 8,2kHz. La fréquence à ce pic, permet d'estimer l'épaisseur de la première couche avec un taux d'erreur de 4,3%. En introduisant le défaut dans cette même simulation, on peut observer une modification dans le comportement de la MSD. Tout d'abord, un pic à la fréquence 8,2kHz qui se superpose au pic de la simulation 1 de la plaque bicouche saine. En plus de ce pic, correspondant à la réflexion des ondes de compression à partir de l'interface entre les deux milieux, on voit apparaître 4 autres pics : un pic autour de 14,3kHz qui représente le pic dominant du spectre de fréquence. Ce pic ne correspond à aucune réflexion des ondes de compression à partir des différentes surfaces, d'interface de la structure ou du défaut. Il pourrait donc être un pic de vibration structure. Trois autres pics, moins imposants mais néanmoins présents apparaissent autour de 5,2kHz, 5,8kHz et 8,8kHz. Le pic correspondant à la réflexion des ondes à partir du défaut situé dans la deuxième couche devrait être situé 'théoriquement' autour de 5,1kHz. Cette fréquence 'théorique' est obtenue en appliquant l'équation (II-30) introduite Sansalone et Streett (1997) pour l'étude des plaques bicouches. Le pic à la fréquence 5,2kHz peut donc correspondre à cette réflexion et permet d'estimer la profondeur du défaut par rapport à l'interface à 6,5cm soit une estimation avec un taux d'erreur de 7,7%. Les pics aux fréquences

5,8kHz et 8,8kHz qui apparaissent avec l'introduction du défaut ne correspondent a priori pas aux réflexions des ondes à partir de l'interface ou du défaut et peuvent correspondre potentiellement à la vibration de la structure.

$$f_d = \frac{1}{\frac{2e_1}{V_{P1}} + \frac{2d}{V_{P2}}} \quad (\text{II-30})$$

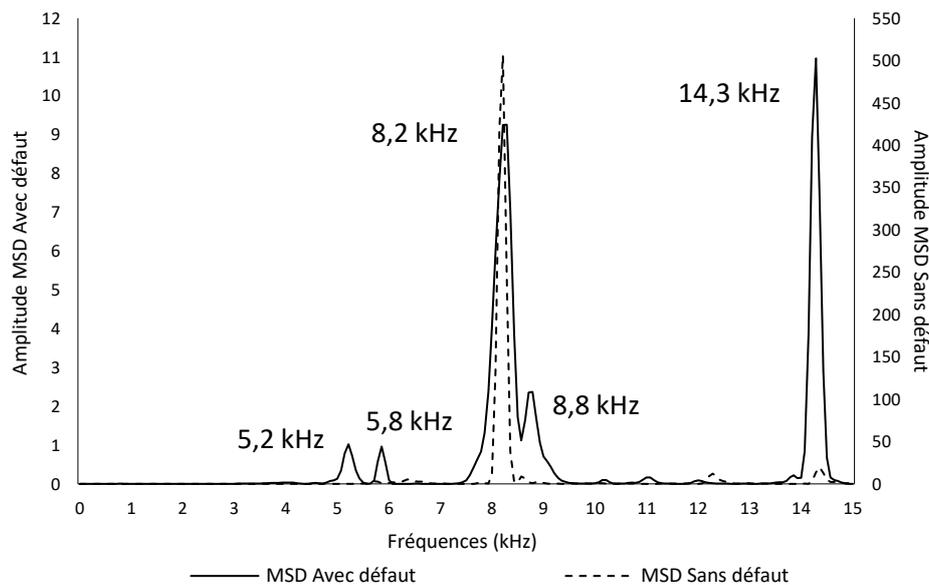


Figure 69. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 1 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut

II.3.3.2. Simulation 2

La Figure 70 présente la superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 2 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut. Les MSDs des deux simulations présentent un comportement similaire. Un premier pic dominant le spectre apparaît autour de 14kHz et un pic moins dominant, apparaît à la fréquence de 7,5kHz. Cette dernière estime l'épaisseur de la première couche avec un taux d'erreur de 4,8%. La position 'théorique' du pic correspondant aux réflexions des ondes de compression à partir de la face supérieure du défaut devrait se situer autour de 4,6kHz. Mise à part la variation d'amplitudes entre les deux simulations, on peut voir qu'un petit pic ou plutôt une petite bosse apparaît autour de 5,1kHz, qui peut représenter le pic correspondant aux réflexions des ondes à partir du défaut. Cette fréquence estime la profondeur d du défaut avec un taux d'erreur 3,9%.

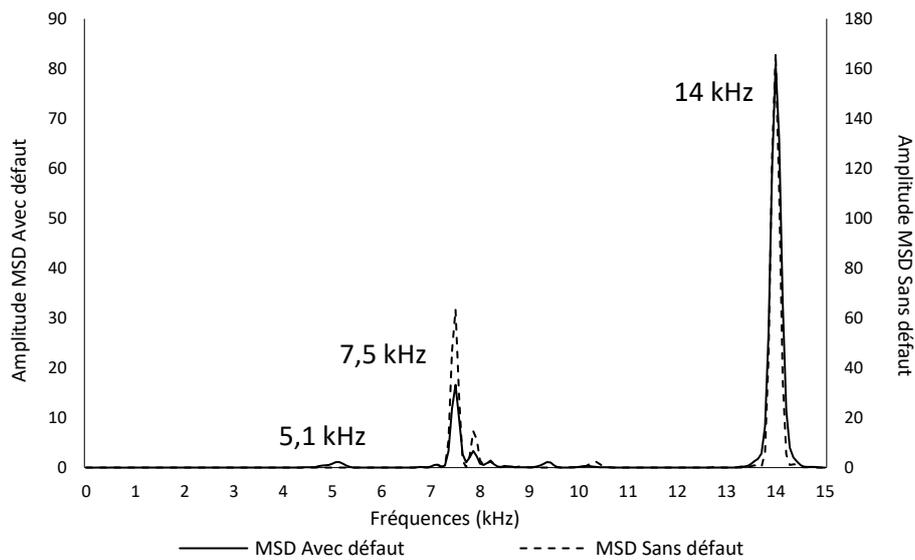


Figure 70. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 2 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut

II.3.3.3. Simulation 3

La Figure 71 présente la superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 3 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut. On peut remarquer que les MSDs des deux simulations présente un comportement similaire. En effet, mise à part la variation des amplitudes des pics lors de l'introduction du défaut, deux pics apparaissent autour de 9,9kHz (correspondant à la vibration de la structure) et 4,8kHz (correspondant à la réflexion des ondes de compression à partir de l'interface entre les deux milieux). Cette dernière permet d'estimer l'épaisseur de la couche e_1 avec un taux d'erreur de 9,5%. La fréquence 'théorique' correspondant à la réflexion des ondes de compression à partir de la face supérieure du défaut devrait se situer autour de 3,8kHz. Dans la MSD de la simulation 3 de la structure bicouche avec défaut, ce pic est invisible.

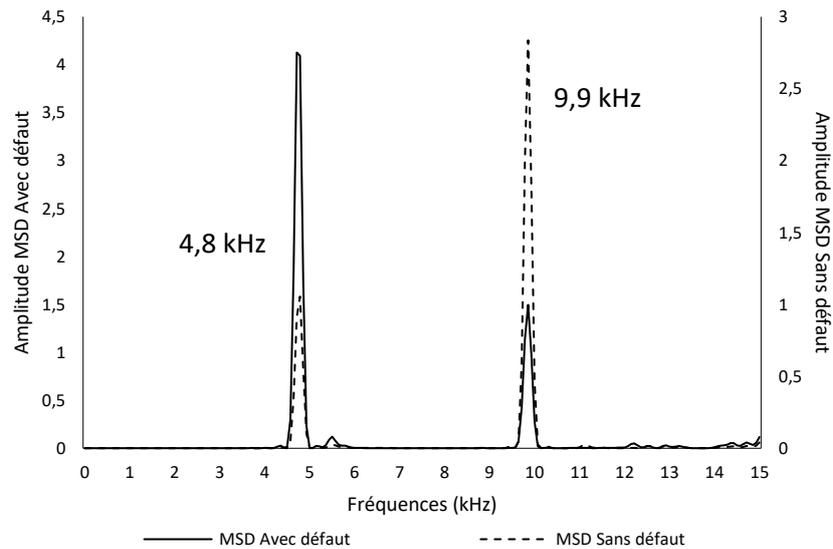


Figure 71. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 3 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut

II.3.3.4. Simulation 4

La Figure 72 présente la superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 4 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut. La MSD de la simulation sans défaut présente un pic unique à la fréquence 4,8kHz. Cette fréquence estime l'épaisseur de la première couche avec un taux d'erreur de 9,5%. L'introduction du défaut dans la même simulation influence considérablement le comportement du spectre de fréquence. Malgré la présence du pic à la fréquence correspondant à la réflexion des ondes à partir de l'interface entre les deux milieux, d'autres pics apparaissent dans la MSD à différentes fréquences et avec différentes amplitudes : 4,3kHz, 6,1kHz, 8,8kHz et 11,2kHz. La fréquence 'théorique' de ce pic devrait se situer à 3,6kHz. Le pic à la fréquence 4,3kHz (la fréquence la plus petite de la MSD) ne peut pas correspondre au pic de réflexion des ondes de compression à partir du défaut. En effet, cette fréquence estime la profondeur d du défaut à 3,5cm soit un taux d'erreur de 50%. La MSD de la simulation 4 contenant un défaut devient assez complexe et difficile à interpréter d'une part en raison du nombre de pics importants présents dans le spectre et d'autre part en raison du taux d'erreur important des pics liés aux réflexions des ondes de compression à partir de l'interface (9,5%). On peut aussi remarquer une différence dans les amplitudes entre les MSDs lors de l'introduction du défaut. L'amplitude de la MSD de la simulation de la plaque bicouche saine présente une amplitude de l'ordre de 10^{-3} alors que les MSD de la simulation contenant un défaut sont de l'ordre de 10^{-1} .

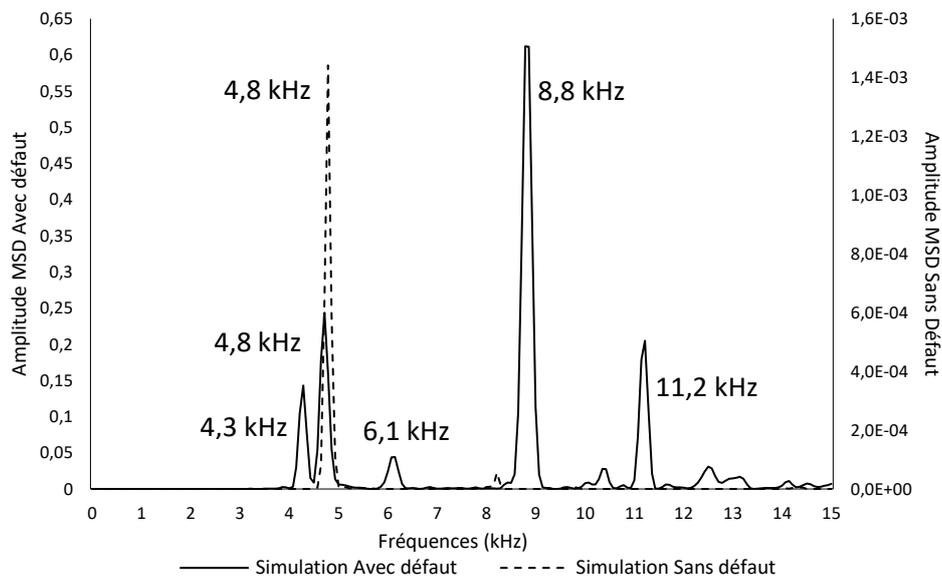


Figure 72. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 4 d'une structure bicouche saine et une simulation contenant un défaut

II.3.3.5. Simulation 5

La Figure 73 illustre la superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 5 de structure bicouche sans défaut et de structure bicouche avec défaut. La MSD correspondant à la simulation de la structure bicouche sans défaut, présente un pic unique autour de la fréquence 10,9kHz. Ce pic estime l'épaisseur de la première couche e_1 avec un taux d'erreur de 10,9%. L'introduction du défaut modifie complètement le comportement du spectre de fréquence. Un pic qui domine le spectre apparaît autour de 12,7kHz, une fréquence qui permet d'estimer l'épaisseur de la première couche cette fois-ci avec un taux d'erreur de 4,7%. Le pic à la fréquence théorique liée à la profondeur du défaut pour cette simulation devrait se situer autour de 6,5kHz. Un pic apparaît à la fréquence 6,9kHz qui peut être assimilée au pic du défaut. Cette fréquence estime la profondeur d du défaut à 6,3cm soit une estimation avec un taux d'erreur de 9,5%. On peut considérer que les MSDs obtenues suite aux simulations sont relativement faciles à interpréter parce qu'on connaît les paramètres introduits lors des simulations, et par conséquent on sait autour de quelles fréquences chaque pic devrait être situé. Si un spectre de cette forme s'obtient à la suite d'une expérimentation in-situ, l'interprétation devient compliquée voire impossible en raison de la complexité de ce dernier et la présence de plusieurs pics. L'expérimentateur peut confondre un défaut avec une interface et inversement. Une telle confusion conduirait à une mauvaise auscultation de l'ouvrage et pourrait mettre en danger les usagers de la structure en question dans le cas où des défauts de nature grave ne peuvent pas être détectés.

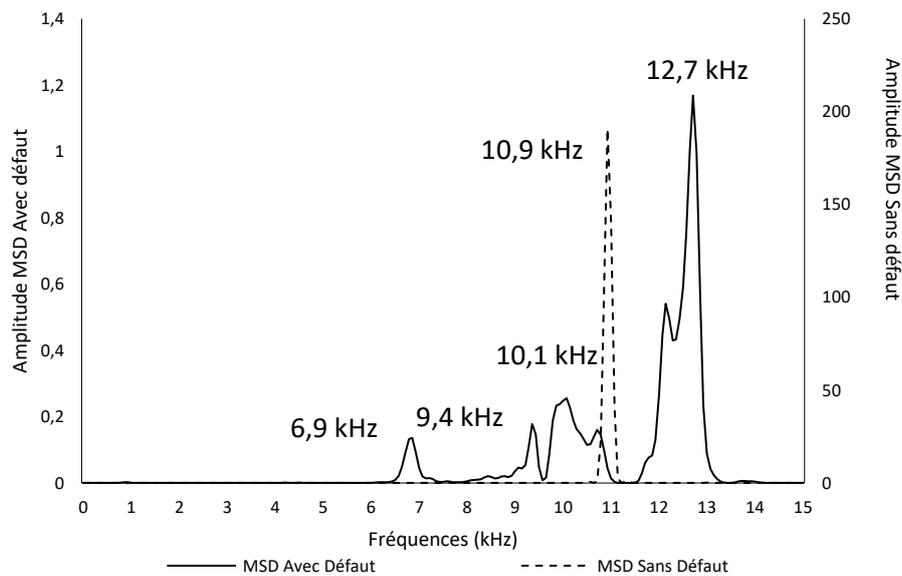


Figure 73. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 5 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut

II.3.3.6. Simulation 6

La Figure 74 présente la superposition des MSDs obtenues à partir des simulations d'une structure bicouche saine et une structure bicouche contenant un défaut. Un pic domine les MSD des deux simulations à la fréquence 11,6kHz. Cette fréquence permet d'avoir une estimation de l'épaisseur avec un taux d'erreur de 4,1%. On peut remarquer que pour cette simulation, l'introduction du défaut ne change pratiquement pas le spectre de fréquence. Le pic à la fréquence 'théorique' correspondant à la réflexion des ondes à partir de la face supérieure du défaut devrait être situé autour de 5,9kHz. Un tel pic n'apparaît pas 'à priori' dans la MSD de la simulation de la structure bicouche contenant un défaut. Ce qui signifie que, dans ce cas, le défaut n'est pas détectable et la MSD se comporte comme une MSD correspondante à une simulation réalisée sur une structure sous forme de plaque bicouche. Or si on fait un zoom autour de cette fréquence, un pic à la fréquence 5,6kHz apparaît dans la MSD de la simulation de la structure bicouche contenant un défaut et peut correspondre à la réflexion des ondes de compression à partir du défaut. La fréquence de ce pic permet d'estimer la profondeur du défaut d à 7,6cm soit une estimation avec un taux d'erreur de 9,2%.

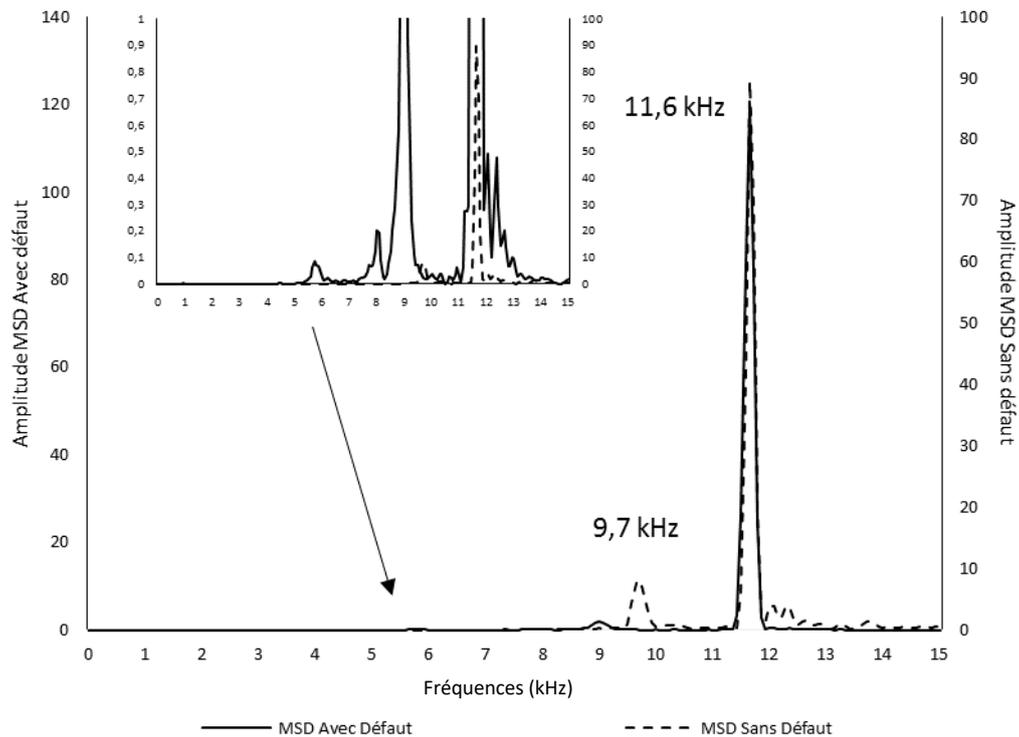


Figure 74. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 6 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut

II.3.3.7. Simulation 7

La Figure 75 présente les MSDs obtenues à partir des simulations 7 d'une structure bicouche saine et une simulation contenant un défaut. Sur la MSD de la simulation 7 sur structure bicouche contenant un défaut, un pic à la fréquence 8kHz apparaît et estime l'épaisseur avec un taux d'erreur de 1%. Hormis un décalage dans la position du pic qui fait passer le taux d'erreur dans l'estimation de la profondeur de l'interface de 1% à 0,3%, une petite bosse apparaît autour de 11,1kHz. Cette fréquence correspondrait a priori à la vibration de la structure. Dans cette simulation aussi le défaut n'est pas détectable. Le pic théorique correspondant devrait être située à la fréquence 5,2kHz. Si on zoome autour de cette fréquence, on peut voir un ensemble de pics apparaître uniquement pour la MSD de la simulation de la structure bicouche contenant un défaut. L'un de ces pics pourrait directement indiquer la profondeur du défaut sans pouvoir distinguer lequel correspond réellement à la réflexion des ondes de compression à partir de la face supérieure du défaut.

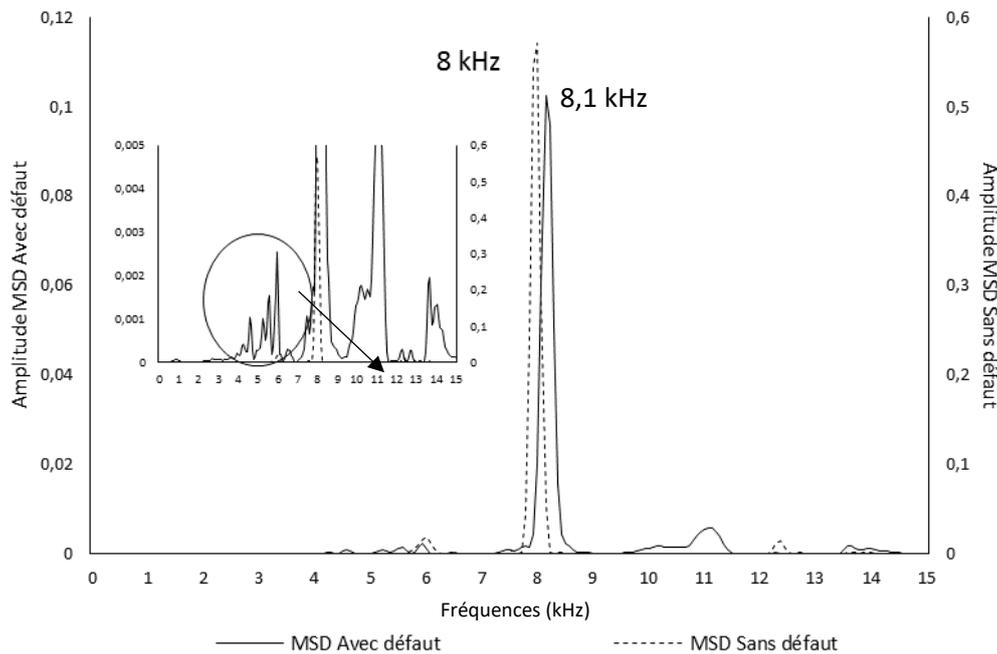


Figure 75. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 7 d'une structure bicouche saine et une simulation contenant un défaut

II.3.3.8. Simulation 8

La Figure 76 présente les MSD obtenues à partir des simulations 8 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut. Sur la MSD de la simulation 8 sur structure bicouche, un pic à la fréquence 8kHz apparaît et estime l'épaisseur avec un taux d'erreur de 1%. Comme pour les simulations 4 et 5, l'introduction du défaut va perturber considérablement le comportement de la MSD. En effet plusieurs pics apparaissent à différentes fréquences. Le pic à la fréquence 7,6kHz peut correspondre à la réflexion des ondes de compression à partir de l'interface entre les deux milieux. Cette fréquence donne une estimation de l'épaisseur avec un taux d'erreur de 6,7%. Le pic autour de 5kHz peut correspondre à la réflexion des ondes à partir du défaut. En effet la fréquence théorique correspondante est de 4,7kHz. La fréquence autour de 5kHz permet d'estimer la profondeur d à 6,2cm soit une estimation avec un taux d'erreur de 12,1%. Les deux pics aux fréquences 9,6kHz et 13,5kHz ne correspondent pas aux réflexions d'ondes à partir de l'interface ou du défaut et correspondent plus probablement à la vibration de la structure. Ici aussi, la MSD est complexe à interpréter et la position de multiples pics peut porter confusion et fausser l'interprétation des résultats.

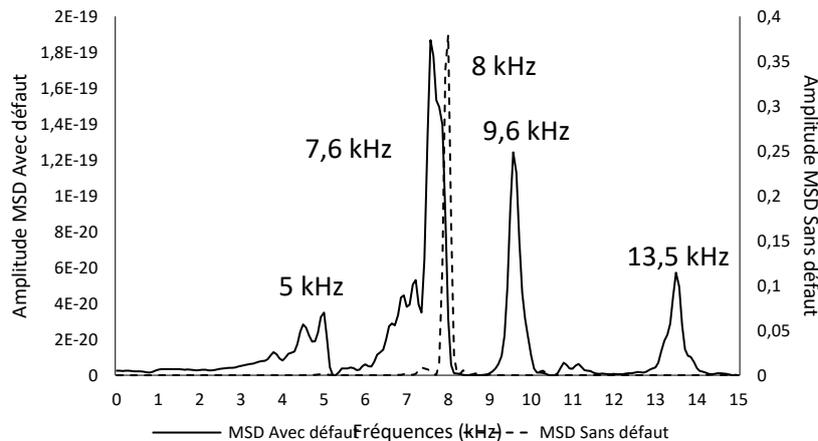


Figure 76. Superposition des MSDs obtenues à partir des simulations 8 d'une structure bicouche saine et d'une structure bicouche contenant un défaut

II.3.3.9. Discussion

L'interprétation des différentes simulations a mis en évidence l'influence de l'introduction du défaut dans la deuxième couche sur l'aspect de la MSD. La présence du défaut a parfois accentué les pics correspondants à la vibration de la structure (Simulation 1 et 2) et dans d'autres cas les a diminués (Simulation 3). Dans certains cas la présence du défaut a fait décaler le pic correspondant à la réflexion des ondes à partir de l'interface entre les deux milieux (Simulation 5, 7 et 8) en modifiant par conséquent le pourcentage d'erreur dans l'estimation de l'épaisseur de la première couche e_1 . Dans les simulations 1, 4, 5 et 8, de multiples pics à différentes fréquences sont apparus suite à l'introduction du défaut avec différentes amplitudes, ce qui a rendu l'interprétation du spectre de fréquence assez complexe. Certains de ces pics peuvent peut-être être assimilés à la réflexion des ondes à partir de la face supérieure du défaut et d'autres à défaut d'être expliqués ont été attribués à la vibration de la structure. En effet, travaillant en basse fréquence ($<20\text{kHz}$), on doit s'attendre à obtenir à la fois les pics liés à la vibration de la structure et ceux liés à la vibration de la matière dans le même spectre. Le contenu de la MSD des différentes simulations avec le défaut dépend donc de plusieurs paramètres de la simulation, ces paramètres pouvant concerner la géométrie de la structure et/ou les matériaux la constituant. La différence entre les MSDs en fonction des simulations a aussi mis en évidence l'influence de plus d'un paramètre à la fois. L'interprétation de la MSD obtenue suite aux simulations numériques dans un environnement parfaitement contrôlé, même complexe, peut être faisable car on maîtrise les différents paramètres introduits lors de la simulation. Par contre, si ce spectre de fréquence est obtenu lors d'expérimentations in-situ, l'interprétation des résultats peut être soit impossible en raison de la présence de multiples pics à différentes amplitudes, soit erronée parce que la fréquence liée à la réflexion des ondes à partir du défaut n'apparaît pas et le spectre peut être confondu avec celui d'une structure saine ne contenant pas de défaut.

II.3.3.10. Analyse statistique

Le Tableau 31 résume les variables d'entrée de l'ensemble des simulations réalisées sur les structures sous forme de plaques monocouches saines, sous forme de plaques bicouches saines et sous forme de plaque bicouches contenant un défaut. Ce même tableau présente aussi les variables de sortie obtenues suite aux différentes simulations, à savoir l'amplitude A et la fréquence f des pics dominants les différentes MSDs. Pour les simulations des bicouches contenant un défaut, on doit s'attendre à observer sur la MSD, deux pics distincts : un premier pic à la fréquence correspondant à la périodicité des réflexions des ondes entre la surface d'impact et la face inférieure de la première couche f , et un second pic à la fréquence indicatrice de la périodicité des réflexions des ondes entre la surface d'impact et le défaut situé à une distance d de l'interface entre les deux couches f_d . Les fréquences de ces pics permettront d'estimer la profondeur e_1 de l'interface entre les deux couches ainsi que la position d du défaut situé dans la deuxième couche.

Tableau 31. Paramètres et résultats des simulations des structures sous formes de plaque monocouche saine, bicouche saine et bicouche contenant un défaut

	Simulation	e_1	f	A	$\ln(A)$	f_d	A_d	$\ln(A_d)$	V_{P1}	V_{P2}	V_{P1}/f	V_{P2}/f
Monocouche	Simulation 1	0,25	7571	1,31E+01	2,57	-	-	-	3931	0	0,52	0,00
	Simulation 2	0,375	5071	4,87E-01	-0,72	-	-	-	3931	0	0,78	0,00
	Simulation 3	0,25	11500	1,70E-10	-22,49	-	-	-	6059	0	0,53	0,00
	Simulation 4	0,375	7714	4,20E-20	-44,62	-	-	-	6059	0	0,79	0,00
Bicouche	Simulation 1	0,25	8214	5,06E+02	6,23	-	-	-	3931	2000	0,48	0,24
	Simulation 2	0,25	7500	6,31E+01	4,15	-	-	-	3931	1614	0,52	0,22
	Simulation 3	0,375	4785	1,58E+00	0,46	-	-	-	3931	2000	0,82	0,42
	Simulation 4	0,375	4785	1,44E-03	-6,54	-	-	-	3931	1614	0,82	0,34
	Simulation 5	0,25	10928	1,91E+02	5,25	-	-	-	6059	2000	0,55	0,18
	Simulation 6	0,25	11642	8,94E+01	4,49	-	-	-	6059	1614	0,52	0,14
	Simulation 7	0,375	8000	5,71E-01	-0,56	-	-	-	6059	2000	0,76	0,25
	Simulation 8	0,375	8000	3,79E-01	-0,97	-	-	-	6059	1614	0,76	0,20
Bicouche avec défaut	Simulation 1	0,25	8285	9,26E+00	2,23	5214	1,02E+00	0,02	3931	2000	0,47	0,24
	Simulation 2	0,25	7500	1,66E+01	2,81	5142	1,12E+00	0,12	3931	1614	0,52	0,22
	Simulation 3	0,375	4785	2,73E+00	1,00	-	-	-	3931	2000	0,82	0,42
	Simulation 4	0,375	4714	2,43E-01	-1,41	4285	1,43E-01	-1,95	3931	1614	0,83	0,34
	Simulation 5	0,25	12714	1,17E+00	0,16	6857	1,36E-01	-2,00	6059	2000	0,48	0,16
	Simulation 6	0,25	11642	1,20E+02	4,79	5714	8,82E-02	-2,43	6059	1614	0,52	0,14
	Simulation 7	0,375	8142	1,02E-01	-2,28	6000	1,38E-03	-6,58	6059	2000	0,74	0,25
	Simulation 8	0,375	7571	1,87E-19	-43,12	5000	3,48E-20	-44,80	6059	1614	0,80	0,21

Le Tableau 32 présente les corrélations entre les différentes variables d'entrée et les variables de sortie de l'ensemble des simulations réalisées sur des structures sous forme de plaques composées d'une seule couche, de deux couches et de deux couches contenant un défaut dans la deuxième couche. L'objectif c'est de pouvoir exprimer la profondeur de l'interface e_1 entre les deux couches en fonction de différents paramètres, à savoir la fréquence f , l'amplitude A du pic dominant du spectre de fréquence et d'évaluer l'influence de l'introduction du défaut dans la deuxième couche à une distance d par rapport à l'interface entre les deux couches sur la l'identification la profondeur de l'interface e_1 .

Tableau 32. Corrélations des variables d'entrée et des variables de sorties des différentes simulations

	e_1	A	A_d	$\ln(A)$	$\ln(A_d)$	f	f_d	V_{P1}	V_{P2}	V_{P1}/f	V_{P2}/f	$\ln(e_1)$	V_{P1}/f_d	V_{P2}/f_d
e_1	1	-0,433	-0,592	-0,378	-0,549	-0,690	-0,414	0	0	0,980	0,357	1	0,588	0,362
A		1	-0,108	0,299	0,214	0,232	0,113	-0,091	0,247	-0,444	0,027	-0,433	0,214	-0,524
A_d			1	0,380	0,418	-0,108	-0,231	-0,768	0,050	-0,562	0,068	-0,592	-0,814	0,312
$\ln(A)$				1	0,992	0,038	0,243	-0,382	0,444	-0,378	0,310	-0,378	-0,725	0,012
$\ln(A_d)$					1	0,167	0,197	-0,438	0,309	-0,543	0,051	-0,549	-0,786	0,093
f						1	0,880	0,704	0,031	-0,726	-0,483	-0,690	0,060	-0,755
f_d							1	0,658	0,642	-0,539	-0,725	-0,414	-0,009	-0,642
V_{P1}								1	0	-0,053	-0,361	0	0,746	-0,693
V_{P2}									1	-0,015	0,807	0	-0,345	0,168
V_{P1}/f										1	0,397	0,980	0,586	0,350
V_{P2}/f											1	0,357	-0,186	0,857
$\ln(P)$												1	0,588	0,362
V_{P1}/f_d													1	-0,350
V_{P2}/f_d														1

A partir du Tableau 32 on constate une forte corrélation de 98% entre les profondeurs des interfaces e_1 et le rapport entre les vitesses de propagations des ondes de compressions dans la couche 1 et la fréquence du pic dans spectre de fréquence obtenue à partir de la simulation, V_{P1}/f . En se basant sur cette corrélation, on trace la Figure 64 qui relie les profondeurs de l'interface e_1 et le rapport V_{P1}/f ainsi que la courbe de tendance linéaire qui relie les données. A partir de cette courbe de tendance on peut trouver une relation linéaire suivantes :

$$e_{1lin} = a_4x + b_4 \quad (\text{II-31})$$

Avec $a_4 = 0,4292$ la pente de la droite et $b_4 = 0,0326$ l'ordonnée à l'origine.

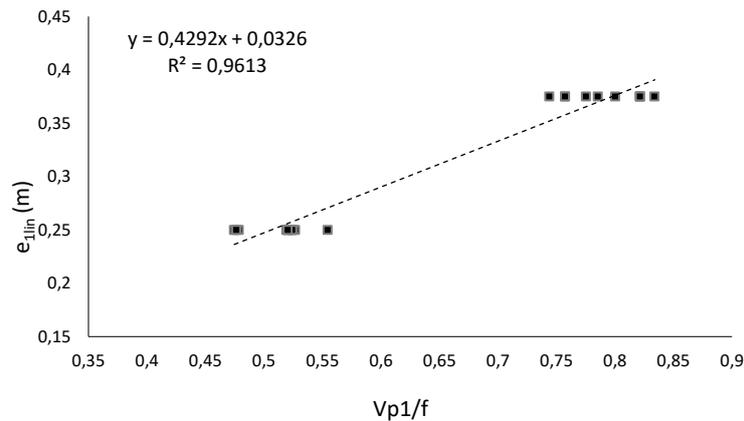


Figure 77. Représentation de l'estimation de la profondeur de l'interface e_1 en fonction du rapport de la vitesse V_{P1} et la fréquence f pour les simulations des différentes configurations

Ici aussi on fait une régression linéaire complète où l'on prend en compte comme variables des données du Tableau 33, soit l'amplitude A , la fréquences f et le rapport vitesse sur fréquence V_{P1}/f . On trouve un résultat intéressant de profondeur e_{1reg} . Le Tableau 33 résume les coefficients obtenus à partir ce modèle de régression linéaire afin d'ajuster la profondeur e_{1reg} selon l'équation suivantes :

$$e_{1reg} = m_{14} \frac{V_{P1}}{f} + m_{24}f + m_{34}A + m_{44} \frac{V_{P2}}{f} + b_{44} \quad (II-32)$$

Avec m_{14} , m_{24} , m_{34} et m_{44} les coefficients pondérant respectivement chaque paramètre V_{P1}/f , f , A et V_{P2}/f et b_{44} l'ordonnée à l'origine vérifiant l'équation ci-dessus.

Tableau 33. Coefficients de pondération des paramètres A , f , V_{P1}/f et V_{P2}/f

Paramètres	m_{14}	m_{24}	m_{34}	m_{44}	b_{44}
Coefficients	0,449	8,99E-07	7,71E-06	-0,016	0,015

Le Tableau 34 présente les épaisseurs obtenues à partir de la formule de l'Impact-Echo e_{1IE} , la relation linéaire limité e_{1a_1} , la relation linéaire e_{1lin} et la régression linéaire e_{1reg} ainsi que les taux d'erreur respectifs $Err_{e_{1IE}}$ (%), $Err_{e_{1a_1}}$ (%) et $Err_{e_{1reg}}$ (%). La profondeur e_{1reg} obtenue à partir de la régression linéaire présente le taux d'erreur le plus faible et par conséquent donne les meilleurs résultats, en effet une erreur moyenne de l'ordre de l'ordre de 3,5% a été observée. La profondeur e_{1lin} , obtenue à partir de la courbe de tendance linéaire donne des taux d'erreur moyenne de l'ordre

3,6% contre 4,7% pour les taux d'erreur obtenus à partir de la formule de l'Impact-Echo e_{1IE} et 10,7% pour la relation linéaire limité e_{1a_4} (ne prenant pas en compte l'ordonnée à l'origine b_4).

Tableau 34. Comparaison des différentes profondeurs d'interfaces e_1 obtenue à partir des différentes méthodes

	Simulation	e_1	e_{1IE}	$Err_{e_{1IE}}$ (%)	e_{1a_1}	$Err_{e_{1a_1}}$ (%)	e_{1lin}	$Err_{e_{1lin}}$ (%)	e_{1reg}	$Err_{e_{1reg}}$ (%)
Monocouche	Simulation 1	0,25	0,249	0,3	0,223	10,83	0,256	2,23	0,255	2,18
	Simulation 2	0,375	0,372	0,8	0,333	11,25	0,365	2,54	0,368	1,85
	Simulation 3	0,25	0,253	1,2	0,226	9,53	0,259	3,53	0,262	4,91
	Simulation 4	0,375	0,377	0,5	0,337	10,09	0,370	1,38	0,375	0,01
Bicouche	Simulation 1	0,25	0,239	4,3	0,205	17,81	0,238	4,75	0,238	4,95
	Simulation 2	0,25	0,262	4,8	0,225	9,99	0,258	3,07	0,254	1,79
	Simulation 3	0,375	0,411	9,6	0,353	5,94	0,385	2,76	0,382	1,81
	Simulation 4	0,375	0,411	9,6	0,353	5,94	0,385	2,76	0,383	2,16
	Simulation 5	0,25	0,277	10,9	0,238	4,80	0,271	8,26	0,273	9,06
	Simulation 6	0,25	0,260	4,1	0,223	10,64	0,256	2,42	0,258	3,18
	Simulation 7	0,375	0,379	1,0	0,325	13,30	0,358	4,60	0,359	4,39
	Simulation 8	0,375	0,379	1,0	0,325	13,30	0,358	4,60	0,359	4,18
Bicouche contenant un	Simulation 1	0,25	0,237	5,1	0,204	18,52	0,236	5,46	0,232	7,18
	Simulation 2	0,25	0,262	4,9	0,225	9,99	0,258	3,07	0,254	1,65
	Simulation 3	0,375	0,411	9,6	0,353	5,94	0,385	2,76	0,382	1,81
	Simulation 4	0,375	0,417	11,2	0,358	4,53	0,391	4,18	0,389	3,60
	Simulation 5	0,25	0,238	4,7	0,205	18,17	0,237	5,11	0,238	4,71
	Simulation 6	0,25	0,260	4,1	0,223	10,64	0,256	2,42	0,258	3,28
	Simulation 7	0,375	0,372	0,8	0,319	14,82	0,352	6,11	0,353	5,92
	Simulation 8	0,375	0,400	6,7	0,344	8,39	0,376	0,32	0,378	0,81

Les taux d'erreurs moyens obtenus à partir de la régression linéaire e_{1reg} et la relation linéaire e_{1lin} sont plus bas que celui donné par la formule Impact-Echo e_{1IE} . Les profondeurs des interfaces e_{1reg} obtenues à partir de la régression linéaire présentent le pourcentage d'erreur le plus faible (3,5%). Cette méthode fait intervenir à la fois la fréquence du pic f , la vitesse de propagation des ondes de compressions V_{P1} , l'amplitude du pic A et la vitesse de propagation des ondes de compression dans le milieu 2, V_{P2} . Tandis que la relation linéaire, qui ne fait intervenir que la fréquence du pic f , la vitesse de propagation des ondes de compressions V_{P1} , estime les profondeurs e_{1lin} avec une erreur de 3,6%. Cette différence de seulement entre ces deux méthodes 0,1% ne justifie pas la prise en compte de l'amplitude du pic A et de la vitesse de propagations des ondes de compression dans la deuxième couche V_{P2} . Par conséquent l'équation (II-31) de la relation linéaire peut être utilisée. Cette équation est similaire à la formule de l'impact-Echo mais

nécessite l'introduction d'un nouveau coefficient de correction prenant en compte à la fois la géométrie de la structure et les propriétés des matériaux constituant la structure. Tableau 32 fait aussi apparaître de bons niveaux de corrélations entre la fréquence f_d , indicatrice du défaut ou bien V_{P1}/f_d , et l'amplitude du pic du défaut A_d , V_{P2}/f_d et f , f_d et f . Dans la mesure où une seule profondeur de défaut a été testée dans cette partie, il est difficile d'en déduire des indications intéressantes. Par contre faire varier la profondeur du défaut permettrait d'approfondir cette piste.

II.4. Conclusion

L'analyse fréquentielle est l'approche primaire pour l'interprétation des réponses temporelles mesurées suite à un essai Impact-Echo. La réponse temporelle mesurée est transformée en réponse fréquentielle en utilisant la fonction mathématique 'transformée de Fourier'. Les fréquences importantes apparaissent sous forme de pics distincts dans le spectre de fréquences. Dans ce chapitre, un code EF a été mis en place visant à simuler un essai Impact-Echo appliqué sur une structure sous forme de plaque bicouche contenant un défaut situé dans la deuxième couche. Ce code EF a été développé par étapes afin d'identifier les différentes variations pouvant apparaître suite au rajout des différents éléments de géométrie et de structure.

Tout au long des simulations, l'influence du comportement du spectre de fréquences en fonction de la géométrie et des matériaux a été constatée, en particulier pour les simulations des structures sous forme de plaques bicouches contenant un défaut. Pour ces simulations, l'onde générée par impact mécanique va se réfléchir à partir des interfaces internes du défaut, des interfaces externes sans oublier les réflexions des bords latéraux. Ce qui se reflète en l'apparition de plusieurs pics, pouvant parfois fausser l'interprétation des résultats, en détectant par exemple, des défauts qui n'existent pas. Ou encore, ces multiples pics peuvent induire une confusion entre ceux dus à la présence de défauts et ceux dus aux interfaces. Le spectre de fréquences étant déjà assez compliqué, s'y ajoutent encore des pics dus aux différents modes de vibration de la structure. La réponse obtenue à partir d'une simulation EF d'une structure sous forme de plaque bicouche contenant des défauts devient rapidement difficile à interpréter.

Une analyse statistique a été réalisée tout au long du développement de la simulation, et a permis de mettre en évidence l'introduction d'un nouveau coefficient de correction. En effet, de cette analyse statistique des résultats, on a pu dégager une formule similaire à celle de l'Impact-Echo mais avec un nouveau coefficient de correction à déterminer.

Dans le but de comprendre l'origine de l'apparition des différents pics de fréquences et dans un souci de maîtrise du spectre de fréquences, plusieurs simulations ont été développées conformément à un plan d'expérience factoriel numérique qui sera présenté et détaillé au chapitre suivant.

Chapitre III.

Plan d'expériences numériques

III.1. Introduction

Les premiers résultats présentés au chapitre précédent, ont montré que les simulations des essais Impact-Echo réalisées sur les plaques monocouches permettent d'estimer leurs épaisseurs avec des taux d'erreur assez faibles. Dès l'introduction de la deuxième couche, le spectre de fréquences commence à présenter des pics à des fréquences qui ne peuvent pas être liées aux réflexions à partir des interfaces ou bien des différentes surfaces réfléchives de la structure. Ces pics, pouvant être associés à la vibration de la structure, peuvent fausser l'interprétation des résultats issus d'une simulation d'un essai Impact-Echo. L'objectif de ces travaux de thèse est d'essayer d'identifier ainsi que de localiser des défauts situés dans le remplissage (deuxième couche) situé au-delà des voûtes et des murs de tête (première couche) d'un pont. Pour atteindre cet objectif, dans les simulations, un défaut est introduit dans la deuxième couche de la plaque bicouche. Pour ces dernières simulations, le spectre de fréquences est souvent incompréhensible et l'interprétation assez complexe.

Différents paramètres, ou couple de paramètres, sont susceptibles d'influencer le comportement du spectre de fréquences comme nous l'avons vu au chapitre précédent. Ce constat a mis en évidence la nécessité d'introduire un plan d'expériences factoriel numérique, qui permettrait

d'interpréter les variations des spectres de fréquence issus des simulations EF d'essais Impact-Echo appliqués à une structure sous forme de plaque bicouche contenant un défaut. Ces variations du spectre de fréquence, considérées comme variables dépendantes du plan d'expériences factoriel numériques, sont analysées en fonction des différentes variables d'entrées et de leurs interactions.

Dans une première partie, quelques généralités sur les plans d'expériences factoriels sont présentées. Ensuite, on introduit les facteurs (variables indépendantes) et leurs niveaux tout en justifiant le choix de ces facteurs et de leurs niveaux considérés. On présente aussi les différentes variables de sortie (variables dépendantes) issues de la réponse temporelle ou du spectre de fréquences, susceptibles de donner des informations sur l'état d'une structure suite à un test Impact-Echo. Puis, on présente les résultats issus de ce plan d'expériences factoriel numériques, ainsi qu'une évaluation de ce plan. Enfin dans une dernière partie, des relations qui permettent de lier les facteurs d'entrée aux variables de sorties sont établis.

Dans tout ce qui suit nous allons nous référer à 'plan d'expériences' en évoquant le plan d'expériences factoriel numérique.

III.2. Généralités sur les plans d'expériences

Un plan d'expériences (en anglais *design of experiments* ou DOE) est la suite ordonnée d'essais d'une expérimentation, chacun permettant d'acquérir de nouvelles connaissances en contrôlant une ou plusieurs variables d'entrée. Les plans d'expériences sont utiles pour obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Parmi les différents plans d'expériences, les plans factoriels sont les plus simples à mettre en œuvre. Ils permettent de mettre en évidence l'existence d'interactions entre les facteurs. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche une relation entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i , une fonction du type :

$$y = f(x_i) \quad (\text{III-1})$$

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées. Un expérimentateur qui lance une étude, s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle 'la réponse', c'est la grandeur d'intérêt (variable dépendante). La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables indépendantes. Au lieu du terme 'variable indépendante' on utilisera le mot 'facteur'. La réponse dépend donc d'un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure 78). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée 'niveau'. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut. L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par (-1) et le niveau haut par $(+1)$. On obtient ces valeurs de facteurs en normant les valeurs réelles hautes et basses du facteur.

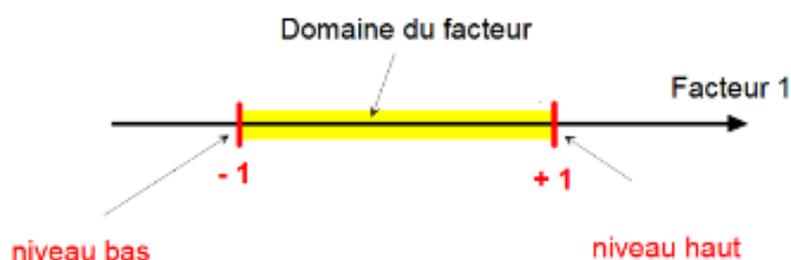


Figure 78. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut (Goupy, 2006)

III.3. Plan d'expériences : Facteurs d'entrée

L'objectif de ce plan d'expérience est d'évaluer le potentiel des simulations numériques des essais Impact-Echo à détecter l'existence du défaut, et si possible à déterminer sa position, dans les structures en forme de plaques bicouches contenant des défauts, dans la deuxième couche. La complexité du spectre de fréquences obtenu suite à ce type de simulation, rend ce dernier fortement complexe et par conséquent difficilement exploitable. Cette complexité est relative à l'interférence des pics dus aux réflexions des ondes à partir de l'interface et à partir du défaut, avec ceux traduisant les réflexions des ondes à partir des bords latéraux de chacune des couches de la structure et avec les pics dus à la vibration de la structure. Afin de comprendre l'origine de chaque pic du spectre de fréquences et afin de mieux maîtriser dernier, une étude numérique factorielle est donc introduite. Cette dernière consiste en une étude menée sur des simulations en faisant varier différents 'facteurs', susceptibles de modifier la réponse de la simulation numérique. Plusieurs facteurs influent de manière directe ou indirecte sur le comportement de la réponse d'un essai Impact-Echo. Seulement, quatre facteurs d'entrée à différents niveaux sont retenus pour cette étude :

- Coefficient de réflexion R ;
- Epaisseur de la première couche e_1 ;
- Profondeur du défaut par rapport à l'interface d ;
- Coefficient d'amortissement ξ ,

Avec e_1 et d deux facteurs liée à la géométrie de la structure, R un facteur lié aux propriétés des matériaux la constituant et ξ un facteur purement numérique qui intervient dans le calcul de l'amortissement de Rayleigh. Des études préliminaires ont montré que ces quatre facteurs sont ceux qui influencent le plus la réponse d'une simulation. Il est important de mentionner que le choix des valeurs des niveaux de chaque facteur, présentés au Tableau 35, n'est pas aléatoire et que chaque valeur retenue obéit à un ou plusieurs critères énoncés dans l'état de l'art. Le choix des différents niveaux est détaillé dans les paragraphes suivants.

Tableau 35. Facteurs du plan d'expériences factoriel

Facteurs	R	e_1 [m]	d [m]	ξ
Niveaux	0,45	0,25	0,07	0,0001
	0,71	0,375	0,0875	0,0002
	-	-	0,105	0,0003

III.3.1. Coefficient de réflexion R

La mesure de la profondeur d'une interface entre deux matériaux ayant des propriétés mécaniques différentes n'est possible que si la réflexion des ondes au niveau de cette dernière est

suffisante. Comme mentionné dans le paragraphe I.5.2, la valeur absolue du coefficient de réflexion R (Eq. (III-2)) doit être supérieure à 0,24, dans le cas contraire une interface n'est à priori pas détectable (Sansalone et Streett, 1997). Le coefficient de réflexion est directement lié aux propriétés des matériaux et gouverne donc la proportion de l'onde réfléchie et la proportion de l'onde transmise à la seconde couche (Figure 79). Afin de pouvoir distinguer l'interface entre les deux couches, les niveaux de ce facteur sont choisis largement supérieurs à la limite de détectabilité établie (0,24). La limite inférieure de ce facteur $R = 0,45$, correspond à un coefficient de réflexion d'une structure bicouche constituée de roche ayant les propriétés d'un granite comme première couche et d'un sol fortement compacté comme deuxième. La limite supérieure de facteur $R = 0,71$, correspond à un coefficient de réflexion d'une structure bicouche constituée de béton comme première couche et de sol faiblement compacté comme deuxième. Les paramètres des différentes couches correspondant aux deux différents niveaux du facteur sont résumés dans le Tableau 36. Ces propriétés des matériaux ont été choisies afin de se situer dans des conditions réelles des matériaux structuraux.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{III-2})$$

Tableau 36. Paramètres correspondants aux différents matériaux constituant les bicouches dans le cas des deux niveaux du facteur 'coefficient de réflexion'

Facteurs	Milieu	E [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]	V_p [m/s]	Z [kg/m ² .s]
$R = 0,45$	Milieu 1	3,2	0,2	2300	3931	9,04x10 ⁶
	Milieu 2	0,38	0,33	2150	1613	3,47x10 ⁶
$R = 0,71$	Milieu 1	7,5	0,3	2750	6059	1,67x10 ⁷
	Milieu 2	0,38	0,33	1400	2000	2,80x10 ⁶

Il faut noter que si l'onde transmise se réfléchit sur le défaut, le choix que l'on fait de R permettant la transmission du milieu 1 vers le milieu 2, n'est pas forcément favorable à la transmission du milieu 2 vers le milieu 1 au retour de l'onde réfléchie par le défaut vers la surface. C'est la raison pour laquelle nous nous intéresserons à des variables de sortie autres que le pic correspondant à la fréquence de réflexion.

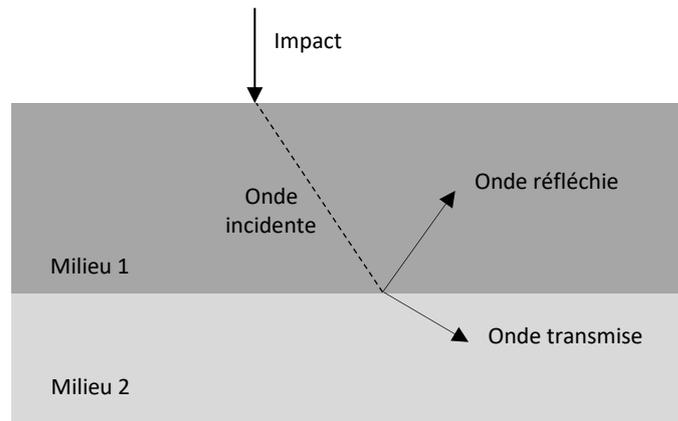


Figure 79. Parcours d'une onde générée par impact dans une structure composée de deux couches en mettant en évidence les phénomènes de réflexion et de réfraction

III.3.2. Epaisseur de la première couche e_1

L'épaisseur de la première couche de la structure bicouche simulée est le deuxième facteur de du plan d'expériences numériques. Ce facteur est directement lié à la géométrie de la structure simulée. L'intérêt de cette étude porte sur la détection du défaut situé dans le milieu 2, on se place donc dans des conditions où l'interface entre les deux milieux est à priori détectable afin ne pas compliquer l'interprétation des résultats. Les auteurs Martin et al., (1998); McCann et Forde, (2001); et Sansalone et Streett, (1997) s'accordent à dire que pour une résolution latérale supérieure à $\lambda/2$ un défaut est détectable et sa profondeur peut être déterminée. Par conséquent l'épaisseur e_1 doit obéir à l'équation suivante :

$$e_1 > \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (\text{III-3})$$

Les niveaux choisis pour ce facteur e_1 correspondent à des valeurs supérieures au maximum de la moitié de la longueur d'onde minimale du milieu 1 correspondant aux matériaux $R = 0,45$ et $R = 0,71$ respectivement comme l'indique l'équation ci-dessous :

$$e_1 > \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{\lambda_{minR=0,45}}{2} \\ \frac{\lambda_{minR=0,71}}{2} \end{array} \right. \quad (\text{III-4})$$

En se basant sur l'Eq. (III-4) et les paramètres des couches donnés au Tableau 36 on obtient :

$$e_1 > \max \begin{cases} 20,8 \text{ cm} \\ 13,5 \text{ cm} \end{cases} \quad (\text{III-5})$$

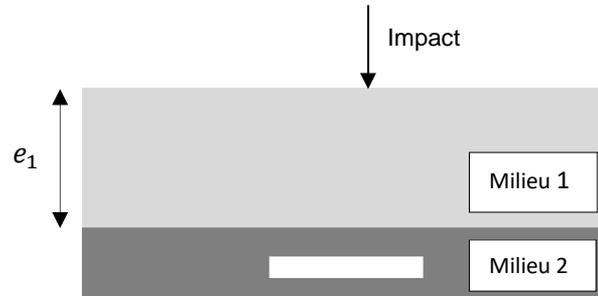


Figure 80. Coupe longitudinale de la géométrie d'épaisseur e_1 simulée sur Cast3M©

Afin de simplifier l'étude et étant donné que le but n'est pas de détecter l'épaisseur de la deuxième couche mais plutôt de localiser le défaut situé dans cette dernière, l'épaisseur de la deuxième couche ne sera pas considérée comme facteur de ce plan d'expériences numériques. Les deux niveaux du facteur épaisseur de la première couche relatifs au milieu 1 sont présentés au Tableau 35.

III.3.3. Profondeur du défaut d

Ce troisième facteur est également lié à la géométrie de la structure à simuler. Trois niveaux sont considérés pour la profondeur d du défaut en se basant sur le même principe de l'épaisseur de la première couche. Les valeurs considérées correspondent à des valeurs supérieures au maximum de la moitié de la longueur d'onde minimale du milieu 2. Pour les fixer, on tient compte des deux couples de matériaux ayant des coefficients de réflexion de $R = 0,45$ et $R = 0,71$. L'intérêt de l'introduction de ce facteur est, dans un premier temps, d'étudier l'influence de la présence du défaut sur le comportement du spectre de fréquence, et d'étudier l'influence de la distance d du défaut par rapport à sa détectabilité. Les niveaux de ce facteur sont présentés au Tableau 35.

$$d > \max \begin{cases} \frac{\lambda_{\min R=0,46}}{2} \\ \frac{\lambda_{\min R=0,71}}{2} \end{cases} \quad (\text{III-6})$$

$$d > \max \begin{cases} 5,5 \text{ cm} \\ 6,8 \text{ cm} \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

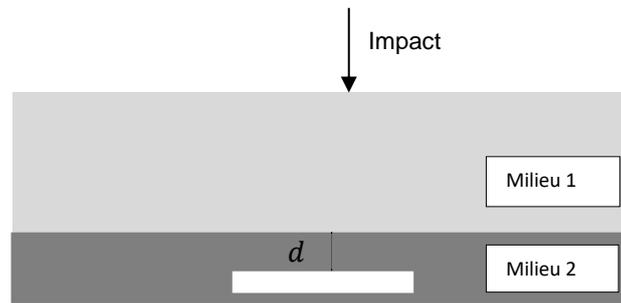


Figure 81. Coupe longitudinale de la géométrie simulée sur Cast3M© contenant le défaut à une profondeur d de l'interface

III.3.4. Coefficient d'amortissement ξ

Le coefficient d'amortissement est le quatrième facteur de ce plan d'expériences. Ce facteur est purement numérique et intervient dans le calcul de l'amortissement de Rayleigh, introduit au paragraphe II.2.8.3, implémenté dans le code Cast3M©. Contrairement à l'amortissement visqueux pur ou l'amortissement hystérétique, cet amortissement permet de prendre en compte un amortissement global forfaitaire traduisant la dissipation d'énergie dans le système physique.

Des études antérieures, ont permis de caler ce dernier entre 0,0001 et 0,0003. Trois niveaux sont choisis pour ce facteur (Tableau 35), afin de déterminer l'influence de sa variation sur la réponse d'une simulation Impact-Echo.

III.3.5. Conclusion sur les facteurs d'entrée

Les facteurs d'entrée susceptibles d'influencer le plus la réponse de la simulation numérique ainsi que leurs niveaux ont été sélectionnés : l'épaisseur de la première couche e_1 , la profondeur du défaut d , le coefficient de réflexion R et enfin le coefficient d'amortissement ξ . Un fois les différents niveaux de ces facteurs d'entrée déterminés, l'ensemble des simulations numériques ($2 \times 2 \times 3 \times 3 = 36$ simulations) résultant de la combinaison des différents niveaux des facteurs sont lancées. Le Tableau 37 présente le récapitulatif des différentes simulations numériques en fonction des différents niveaux des facteurs d'entrée.

Tableau 37. Plan d'expérience factoriel numérique

Paramètres Essai	Valeurs codées				Valeurs réelles			
	e_1	d	R	ξ	e_1 [m]	d [m]	R	ξ
Essai 1	-1	-1	-1	-1	0,25	0,07	0,45	0,0001
Essai 2	1	-1	-1	-1	0,375	0,07	0,45	0,0001
Essai 3	-1	0	-1	-1	0,25	0,0875	0,45	0,0001
Essai 4	1	0	-1	-1	0,375	0,0875	0,45	0,0001
Essai 5	-1	1	-1	-1	0,25	0,105	0,45	0,0001
Essai 6	1	1	-1	-1	0,375	0,105	0,45	0,0001
Essai 7	-1	-1	1	-1	0,25	0,07	0,71	0,0001
Essai 8	1	-1	1	-1	0,375	0,07	0,71	0,0001
Essai 9	-1	0	1	-1	0,25	0,0875	0,71	0,0001
Essai 10	1	0	1	-1	0,375	0,0875	0,71	0,0001
Essai 11	-1	1	1	-1	0,25	0,105	0,71	0,0001
Essai 12	1	1	1	-1	0,375	0,105	0,71	0,0001
Essai 13	-1	-1	-1	0	0,25	0,07	0,45	0,0002
Essai 14	1	-1	-1	0	0,375	0,07	0,45	0,0002
Essai 15	-1	0	-1	0	0,25	0,0875	0,45	0,0002
Essai 16	1	0	-1	0	0,375	0,0875	0,45	0,0002
Essai 17	-1	1	-1	0	0,25	0,105	0,45	0,0002
Essai 18	1	1	-1	0	0,375	0,105	0,45	0,0002
Essai 19	-1	-1	1	0	0,25	0,07	0,71	0,0002
Essai 20	1	-1	1	0	0,375	0,07	0,71	0,0002
Essai 21	-1	0	1	0	0,25	0,0875	0,71	0,0002
Essai 22	1	0	1	0	0,375	0,0875	0,71	0,0002
Essai 23	-1	1	1	0	0,25	0,105	0,71	0,0002
Essai 24	1	1	1	0	0,375	0,105	0,71	0,0002
Essai 25	-1	-1	-1	1	0,25	0,07	0,45	0,0003
Essai 26	1	-1	-1	1	0,375	0,07	0,45	0,0003
Essai 27	-1	0	-1	1	0,25	0,0875	0,45	0,0003
Essai 28	1	0	-1	1	0,375	0,0875	0,45	0,0003
Essai 29	-1	1	-1	1	0,25	0,105	0,45	0,0003
Essai 30	1	1	-1	1	0,375	0,105	0,45	0,0003
Essai 31	-1	-1	1	1	0,25	0,07	0,71	0,0003
Essai 32	1	-1	1	1	0,375	0,07	0,71	0,0003
Essai 33	-1	0	1	1	0,25	0,0875	0,71	0,0003
Essai 34	1	0	1	1	0,375	0,0875	0,71	0,0003
Essai 35	-1	1	1	1	0,25	0,105	0,71	0,0003
Essai 36	1	1	1	1	0,375	0,105	0,71	0,0003

III.4. Plan d'expériences : Variables de sortie

La méthode Impact-Echo, malgré ses nombreux avantages, présente l'inconvénient de se baser uniquement sur la lecture d'un seul paramètre, qui est la position du pic dominant le spectre sur l'axe des fréquences. Cette fréquence, selon les conditions de géométrie et de matériaux, peut ou non, nous renseigner sur la présence d'interface ou de défaut, et permettre aussi de localiser ces derniers. Les premiers résultats présentés dans le chapitre précédent ont mis en évidence différents constats.

- Premièrement, le spectre de fréquence peut présenter un unique pic qui ne correspond ni à la présence de l'interface, ni à celle du défaut. Ce pic pourrait être dû par exemple à la vibration de la structure.
- Deuxièmement, un pic unique peut apparaître et il correspond bien à la réflexion des ondes de compression à partir de l'interface entre les deux couches, mais le pic correspondant aux réflexions des ondes à partir du défaut est, lui, invisible (les ondes de compression n'atteignent pas le défaut, ou bien leurs réflexions sont trop faibles pour atteindre la surface de mesure). L'inconvénient majeur de ces deux cas de figure, est que le spectre de fréquences d'une structure sous forme de plaque bicouche contenant un défaut, se comporte comme une plaque bicouche saine (car le spectre présente un unique pic). C'est un résultat qui peut fausser l'interprétation d'un essai Impact-Echo.
- Le troisième phénomène correspond à un spectre de fréquence où l'interface et le défaut sont détectables, mais ces pics ne dominent pas le spectre et, ou bien l'un, ou bien l'autre, ou bien les deux sont noyés entre d'autres pics et par conséquent ces pics sont difficilement identifiables.

Par conséquent introduire des paramètres de lecture d'un essai Impact-Echo autre que la fréquence du pic « dominant » le spectre de fréquence peut s'avérer intéressant. Dans ce qui suit, différents paramètres mesurés dans les domaines temporel (un domaine généralement abandonné dans la méthode de l'Impact-Echo) et fréquentiel, pouvant être influencés par de la variation de l'un ou de plusieurs facteurs d'entrée du plan d'expérience numérique, sont présentés. L'objectif de cette démarche est d'essayer de s'affranchir du paramètre unique (la fréquence du pic dominant) dans l'interprétation d'un essai Impact-Echo.

III.4.1. Variables de sortie : Domaine temporel

L'analyse fréquentielle est l'approche primaire pour l'interprétation des réponses temporelles mesurées suite à un essai Impact-Echo. En effet, la réponse temporelle est transformée en réponse fréquentielle en utilisant la fonction mathématique 'transformée de Fourier'. Les fréquences importantes apparaissent sous forme de pics distincts dans le spectre de fréquence. Toutefois, dans ce paragraphe on s'intéresse au comportement des réponses des différentes simulations dans le domaine temporel. A l'issue de chaque simulation sur Cast3M©, quatre accélérations sont mesurées

en quatre points à proximité du point de chargement (ou d'impact) comme illustré dans la Figure 36. Les variables de sorties (issues des réponses mesurées) susceptibles d'être influencées par les variations des niveaux des facteurs d'entrée sont présentées au Tableau 38. Elles sont extraites des accélérations obtenues dans les différentes simulations sur Cast3M© via un calcul à l'aide de Matlab®. L'objectif est de savoir si la variation des niveaux des facteurs d'entrée influence ces variables de sorties.

La variable ε_{max} ou ε_{min} permet de regarder ce qui est dominant dans le signal temporel et d'identifier à quelle variable d'entrée cela est dû. Les aires sous le signal Air ENVAccABS, AirAccABS et AirENVAcc permettent de rendre compte de plusieurs paramètres à la fois comme la longueur d'onde, l'amplitude du signal et son amortissement. Les variables α , $\alpha_{Air\ ENVAccABS}$ et $\alpha_{AirENVAcc}$ quant à elles, caractérisent la décroissance du signal, donc la capacité de la structure ou du milieu à amortir le signal. Elles vont donc permettre de voir si la forme de la structure influe sur l'amortissement.

Tableau 38. Variables de sorties propres au domaine temporel

Paramètres	Définition
ε_{max}	Détermine le niveau d'accélération maximale du signal temporel
ε_{min}	Détermine le niveau d'accélération minimale du signal temporel
Air ENVAccABS	Calcule l'aire située au-dessous de la valeur absolue du signal
$\alpha_{Air\ ENVAccABS}$	Amortissement du signal Temporel ABS (extrait à partir de la courbe de tendance)
AirENVAcc	Calcul l'air située sous les enveloppes du signal
$\alpha_{AirENVAcc}$	Amortissement de l'enveloppe du signal
AirAccABS	Air calculer à partir de la courbe de tendance du signal
α	Amortissement calculer à partir de la courbe de tendance du signal

III.4.2. Variables de sorties : Domaine fréquentiel

Les spectres de fréquences sont obtenus par transformation des réponses temporelles mesurées en utilisant la fonction mathématique 'Transformée de Fourier'. La périodicité des réflexions entre la surface d'impact et la face de réflexion se traduit par l'apparition de pics distincts dans le spectre de fréquence. La fréquence de ce pic permet d'estimer la distance parcourue par l'onde de compression entre la surface d'impact et la face de réflexion. L'interprétation des spectres de fréquences résultant des essais Impact-Echo se base sur la lecture de la position des pics sur l'axe de fréquence. Les quatre accélérations issues des simulations Cast3M© sont ainsi transformées

dans le domaine de Fourier pour obtenir les spectres de fréquences. Les spectres de fréquences obtenus sont traités sur Matlab®.

Les variables suivies de la notation NF représentent les variables collectées sur les spectres de fréquences où la réponse temporelle n'a pas été fenêtrée avant d'appliquer la transformée de Fourier (FFT). Les variables suivies de la notation F représentent les variables collectées sur les spectres de fréquences où la réponse temporelle a été fenêtrée avant d'appliquer la transformée de Fourier (FFT). Le fenêtrage de Blackman-Harris a été utilisé. Cette fenêtrage présente un lobe central plus large que les autres fenêtrages et des lobes secondaires minimisés, ce qui entraîne la minimisation des fuites spectrales, par rapport aux fenêtrages Hamming et Hanning de longueur équivalente (Medina and Garrido, 2007).

Les variables de sorties susceptibles d'être influencées par les variations des niveaux des facteurs d'entrée sont présentées au Tableau 39 et illustrées dans la Figure 82.

Tableau 39. Variables de sorties propres au domaine fréquentiel

Paramètres	Définition
$AirFFT_{NF1-4}$	Calcule l'aire de la zone située au-dessous de la transformée de Fourier non fenêtrée
$AirFFT_{F1-4}$	Calcule l'aire de la zone située au-dessous de la transformée de Fourier fenêtrée
$AirMSD_{NF}$	Calcule l'aire sous la densité spectrale multi-croisée non fenêtrée
$AirMSD_F$	Calcule l'aire sous la densité spectrale multi-croisée fenêtrée
$Npic_{NF}$	Calcule le nombre de pics pour la densité spectrale multi-croisée non fenêtrée
$Npic_F$	Calcule le nombre de pics pour la densité spectrale multi-croisée fenêtrée

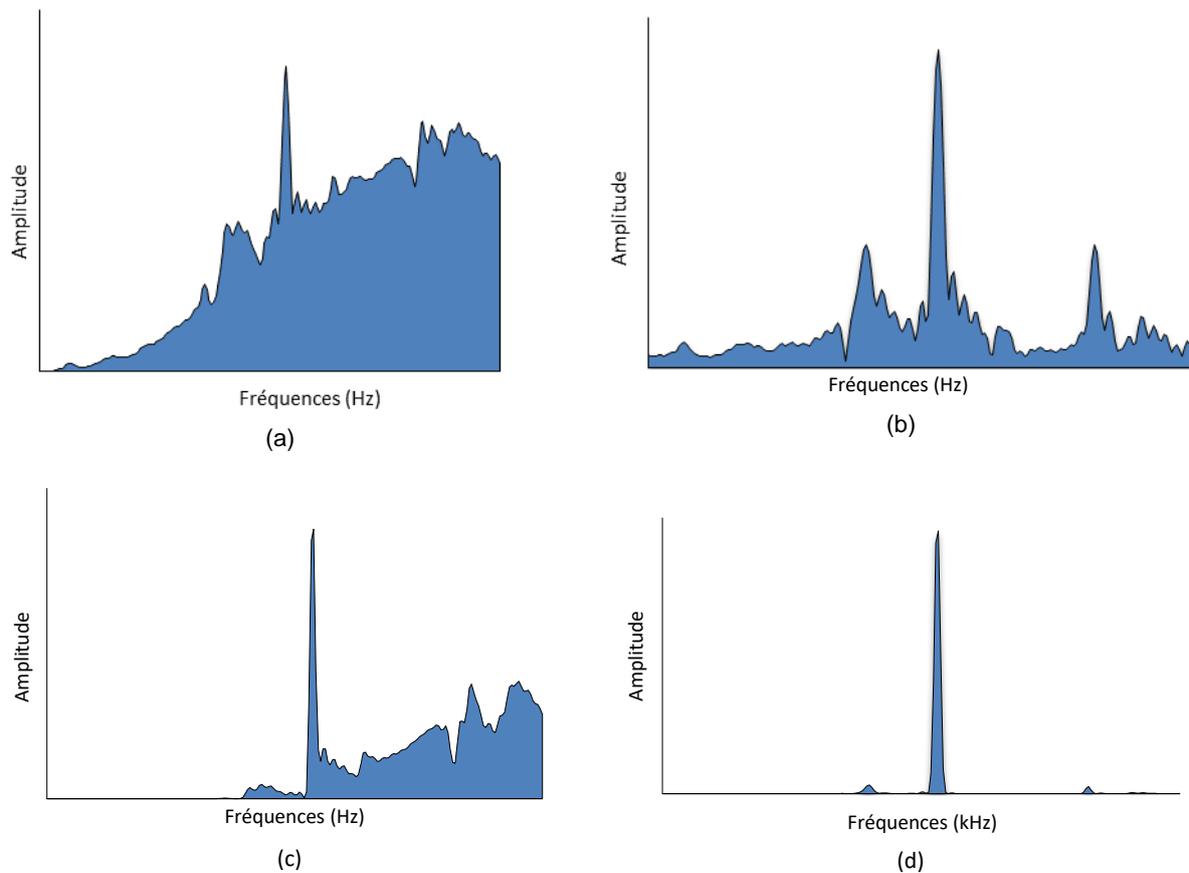


Figure 82. Représentation des variables de sortie du domaine fréquentiel (a). $\text{AirFFT}_{\text{NF}}$ (b). AirFFT (c). $\text{AirMSD}_{\text{NF}}$. (d). AirMSD_{F}

III.5. Analyse du plan d'expériences factoriel numériques

A l'issue de chaque simulation numérique réalisée sur Cast3M©, les quatre accélérations mesurées à proximité du point d'impact comme indiqué à la Figure 36, sont extraites et traitées avec Matlab® afin d'identifier les différentes variables de sortie introduites dans le paragraphe précédent. L'influence des différents facteurs d'entrée et de leurs interactions sur ces variables de sortie dans les domaines temporel et fréquentiel est présentée et discutée dans le paragraphe ci-dessous. En se basant sur les tables de l'ANOVA de chaque réponse, les degrés d'influence (à un niveau de signification de $\alpha=5\%$) des facteurs ou de leurs interactions sont notés comme suit :

- +++ Pour un effet maximal (fortement significatif)
- ++ Pour un effet moyen (moyennement significatif)
- + Pour un effet minimal (faiblement significatif)
- - Pour l'absence d'effet (non significatif).

III.5.1. Analyse de la variance

Afin d'étudier l'influence ou l'effet des facteurs d'entrée sur les différentes variables de sortie, une analyse de la variance doit être réalisée. En statistique, l'analyse de la variance l'ANOVA (ANalysis Of VAriance) est un outil utilisé pour comparer les moyennes des échantillons. Cette analyse s'applique lorsque l'on a des facteurs à différents niveaux qui ont une influence potentielle sur la loi d'une variable de sortie. On parle d'analyse à un facteur lorsque l'analyse porte sur un modèle décrit par un seul facteur de variabilité, d'analyse à deux facteurs ou d'analyse multifactorielle sinon. L'ANOVA permet donc d'étudier le comportement d'une variable de sortie en fonction d'un ou de plusieurs facteurs. La première étape de cette analyse consiste à proposer un modèle théorique en fonction de la problématique à étudier. Il est souvent possible d'écrire plusieurs modèles pour un même problème, en fonction des éléments que l'on souhaite intégrer dans l'étude. La forme générale de l'analyse de variance repose sur le test de Fisher.

III.5.1.1. Somme des carrés (SC)

La somme des carrés (SC) (Eq. (III-8)) est une mesure de variation ou d'écart par rapport à la moyenne. Elle représente la somme des carrés des différences par rapport à la moyenne. Dans l'analyse de variance (ANOVA), la somme totale des carrés permet d'exprimer la variation totale attribuable aux différents facteurs.

$$SC = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{III-8})$$

III.5.1.2. Variance (V)

En statistique et en théorie des probabilités, la variance est une mesure de la dispersion des valeurs d'un échantillon ou d'une distribution de probabilité. Elle exprime la moyenne des carrés des écarts à la moyenne, aussi égale à la différence entre la moyenne des carrés des valeurs de la variable et le carré de la moyenne, selon le théorème de König-Huygens. Ainsi, plus l'écart à la moyenne est grand, plus il est prépondérant dans le calcul total de la variance qui donnerait donc une bonne idée sur la dispersion des valeurs. Par exemple, supposons que $y_1, y_2, y_3, y_4, \dots, y_n$ représentent un échantillon de taille n , alors la variance de l'échantillon est :

$$V = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{SC}{n-1} \quad (\text{III-9})$$

III.5.1.3. Degré de liberté (DL)

En statistiques le Degré de Liberté (DL) désigne le nombre de variables aléatoires qui ne peuvent être déterminées ou fixées par une équation (notamment les équations des tests statistiques). Le nombre de degrés de liberté de la somme des carrés est égal au nombre d'éléments indépendants dans la somme des carrés. Les degrés de liberté pour chaque composant du modèle sont les suivants :

$$\begin{aligned} \text{DL des facteurs} &= r - 1 \\ \text{DL des erreurs} &= n_T - r \\ \text{DL Total} &= n_T - 1 \end{aligned} \quad (\text{III-10})$$

Avec n_T le nombre total d'observations et r le nombre de niveaux des facteurs.

III.5.1.4. Carré moyen (CM)

Le carré moyen (CM) est une estimation de la variance de la population. Cette valeur est la division de la somme correspondante des carrés par les degrés de liberté. Dans l'ANOVA, les carrés moyens permettent de déterminer si les facteurs sont significatifs.

$$\text{CM} = \text{SC}/\text{DL} \quad (\text{III-11})$$

III.5.1.5. Test de Fisher (F-ratio)

Le plan d'expérience permet de voir dans une série d'expérience quels facteurs influencent le résultat. Prenons l'exemple de d . Il peut prendre 3 niveaux (-1, 0, 1). Son degré de liberté est donc 2. On définit une moyenne par niveau :

$$m(i) = \frac{\sum_{j=1}^{12} x_{ij}}{12} \quad (\text{III-12})$$

Où j varie de 1 à 12 car quand e_1 prend une valeur, il y a 12 possibilités pour les autres facteurs, et i varie de 1 à 3 car il y a 3 valeurs possibles du facteur d . Les x_{ij} désignent les valeurs prises par la variable de sortie x sur laquelle on aimerait savoir si d a de l'influence. Soit m la moyenne générale :

$$m = \frac{\sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^3 x_{ij}}{36} \quad (\text{III-13})$$

On définit V la variance et $R(d)$ la variance résiduelle ou variance interclasse.

$$R(d) = \sum_{i=1}^3 \left[\sum_{j=1}^{12} (x_{ij} - m(i))^2 \right] \quad (\text{III-14})$$

$R(d)$ est indicatrice des variations du résultat indépendant de d . Si pour chaque niveau i de d , les résultats x_{ij} sont distribués autour de $m(i)$ selon une loi normale (indicatrice de l'effet du hasard), alors SC et $R(d)$ suivent une loi de Gauss. On définit V_R et V_A ainsi :

$$V_R = \frac{R(d)}{N - k} = \frac{R(d)}{36 - 12} \quad (\text{III-15})$$

Et

$$V_A = \frac{SC - R(d)}{k - 1} = \frac{SC - R(d)}{3 - 1} \quad (\text{III-16})$$

Le rapport V_A/V_R suit une loi de probabilité de Fisher-Snédecor $F(k - 1 ; N - k)$, soit donc $F(2 ; 24)$. Si $V_A/V_R \leq F_{\alpha}(2 ; 24)$, alors au seuil $\alpha = 0,05$, la contribution de la variation expérimentale de $SC - R(d)$ est négligeable devant la variation expérimentale de $R(d)$. Le facteur d n'exerce pas d'influence significative sur les résultats. La valeur $F_{0,05}(2 ; 24)$ est égale à 5,61.

III.5.2. Exploitation de la réponse temporelle

III.5.2.1. Niveaux d'accélération maximale ϵ_{max} et minimale ϵ_{min}

L'analyse de la variance a été faite à l'aide du logiciel Statgraphics Centurion. Dans ce paragraphe nous donnerons le résultat du logiciel et nous détaillerons un calcul. Le Tableau 40 présente les résultats issus du logiciel. Il décompose la variabilité du niveau d'accélération maximale de la première mesure ϵ_{max1} en contributions due aux divers facteurs et à leurs interactions. La contribution de chaque facteur est mesurée en éliminant les effets de tous les autres facteurs. Les P-Valeurs (probabilité du rapport V_A/V_R) testent la signification statistique de chacun des facteurs. Les facteurs et leurs interactions qui ont des P-Valeurs inférieures à 0,05 ($\alpha=5\%$) ont un effet statistiquement significatif sur les niveaux d'accélération maximale de la première mesure ϵ_{max1} au niveau de confiance $(1 - \alpha)$ de 95,0%. Les autres analyses de l'ANOVA des niveaux d'accélération minimale et maximale des différentes mesures sont présentées en Annexe 3.

On applique pour le facteur d avec la variable de sortie ϵ_{max} , la démarche présentée plus haut. On a $m = 668,16 m/s^2$, $SC = 4567511$. Le Tableau 41 suivant donne les valeurs relatives aux variances par niveau. On obtient $R(d) = 4567506$, et $SC - R(d) = 5,10$. Dans ces conditions $V_R = 190373$, $V_A = 0,463$ et $V_A/V_R = 2,43 \cdot 10^{-6}$. On a effectivement $V_A/V_R \leq 5,61$, donc d n'exerce pas d'influence sur l'accélération maximale.

Tableau 40. Effet de la variation des facteurs et leurs interactions sur les niveaux d'accélération maximale du signal ϵ_{max} et minimale ϵ_{min}

	ϵ_{max1}	ϵ_{max2}	ϵ_{max3}	ϵ_{max4}	ϵ_{min1}	ϵ_{min2}	ϵ_{min3}	ϵ_{min4}
PRINCIPAUX EFFETS								
A : e_1	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
B : d	++	+	+	++	+	+	+	+
C : R	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
D : ξ	+++	++	++	+++	++	++	++	++
INTERACTIONS								
AB	++	+	+	++	+	+	+	+
AC	+++	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++
AD	++	++	+	+++	+	++	++	+
BC	++	+	+	++	+	++	+	+
BD	-	-	-	-	-	-	-	-
CD	++	++	-	+++	+	+++	++	+
ABC	++	+	+	++	+	++	+	+
ABD	-	-	-	-	-	-	-	-
ACD	++	+	+	++	+	++	++	+
BCD	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 41. Valeurs relatives aux variances par niveau

d	m_i	$\sum_{j=1}^{12} (x_{ij} - m(i))^2$
0,07	667,9	1523807,5
0,0875	668,7	1519956,5
0,105	667,9	1523742,1

Interactions

Il est possible que deux facteurs n'aient pas d'influence, mais s'ils sont maximaux ensemble ou minimaux ensemble, ils ont une influence. Ils se peut aussi que si l'un est minimal et l'autre maximal,

ils interagissent alors sur le résultat. Pour étudier ce cas on développe une démarche similaire. Pour présenter cette démarche on prend l'exemple de l'effet de l'interaction de d et e_1 sur ε_{max1} .

Tableau 42. Effet de l'interaction de d et e_1 sur ε_{max1} .

$d \setminus e_1$	$j = -1$	$j = 1$	
$i = -1$	6 valeurs de ε_{max1} $m_{-1,-1}$ = moyenne des 6 valeurs ($m_{-1,-1}$)	6 valeurs de ε_{max1} $m_{-1,1}$ = moyenne des 6 valeurs ($m_{-1,1}$)	$m_{-1,tot}$ moyenne de la ligne Moyenne sur 12 valeurs
$i = 0$	6 valeurs de ε_{max1} $m_{0,-1}$ = moyenne des 6 valeurs ($m_{0,-1}$)	6 valeurs de ε_{max1} $m_{0,1}$ = moyenne des 6 valeurs ($m_{0,1}$)	$m_{0,tot}$ moyenne de la ligne Moyenne sur 12 valeurs
$i = 1$	6 valeurs de ε_{max1} $m_{1,-1}$ = moyenne des 6 valeurs ($m_{1,-1}$)	6 valeurs de ε_{max1} $m_{1,1}$ = moyenne des 6 valeurs ($m_{1,1}$)	$m_{1,tot}$ moyenne de la ligne Moyenne sur 12 valeurs
	$m_{tot,-1}$ moyenne de la colonne Moyenne sur 18 valeurs	$m_{tot,1}$ moyenne de la colonne Moyenne sur 18 valeurs	

On définit donc les grandeurs suivantes :

$$\begin{aligned}
 V(d, e_1) &= \sum_{i=1}^3 \left[\sum_{j=1}^2 \left(\sum_{k=1}^6 (\varepsilon_{max1\ ijk} - m_{i,j})^2 \right) \right] \\
 V(d) &= 2 \times 6 \sum_{i=1}^3 (m_{i,tot} - m)^2 \\
 V(e_1) &= 3 \times 6 \sum_{j=1}^2 (m_{tot,j} - m)^2 \\
 V(d, e_1) &= 6 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^3 (m_{i,j} - (m_{i,tot} + m_{tot,j}) + m)^2 \quad (III-17) \\
 V_d &= \frac{V(d)}{v_d - 1} = \frac{V(d)}{3 - 1} = \frac{V(d)}{2} \\
 V_{e_1} &= \frac{V(e_1)}{v_{e_1} - 1} = \frac{V(e_1)}{2 - 1} = V(e_1) \\
 V_{d,e_1} &= \frac{V(d, e_1)}{(v_d - 1)(v_{e_1} - 1)} = \frac{V(d, e_1)}{2} \\
 V_R &= \frac{R(d, e_1)}{v_d v_{e_1} (v - 1)} = \frac{R(d, e_1)}{2 \times 3 \times 5} = \frac{R(d, e_1)}{30}
 \end{aligned}$$

$V_{d,e_1}/V_R$ suit une loi de Fisher Snédécour, si

$$\frac{V_{d,e_1}}{V_R} \leq F_{0,05}(v_{d,e_1}; v_R) = F_{0,05}(2x1; 30) = 3,32 \quad (\text{III-18})$$

On peut conclure qu'il n'y a pas d'effet significatif de l'interaction entre e_1 et d si cette relation est vérifiée. Dans le cas de d et e_1 , on trouve un rapport de 0,00002, il n'y a donc pas d'effet significatif de l'interaction étudiée. $V(d)$ est l'effet principal du facteur d , $V(e_1)$ est l'effet principal du facteur e_1 . Par la suite seuls les résultats finaux regroupés dans le tableau 43 seront présentés et commentés. Parmi ces résultats ne nous intéressent que les résultats de type +++ , les autres ne représentant pas une influence significative. En annexe se trouvent tous les résultats du plan d'expérience issus de du logiciel du logiciel Statgraphics Centurion. Pour simplifier la présentation, on va utiliser 2 notations : 0 s'il n'y a pas d'influence significative et 1 s'il y a une influence significative.

Le Tableau 43, présente les effets de la variation des facteurs et de leurs différentes interactions sur les deux premières variables de sortie : les niveaux d'accélérations maximales ϵ_{max} et minimales ϵ_{min} . A titre de rappel, ces résultats sont extraits des différentes tables de l'ANOVA présentées en Annexe 3.

Tableau 43. Résultats finaux du plan d'expérience

	ϵ_{max1}	ϵ_{max2}	ϵ_{max3}	ϵ_{max4}	ϵ_{min1}	ϵ_{min2}	ϵ_{min3}	ϵ_{min4}
PRINCIPAUX EFFETS								
A : e_1	1	1	1	1	1	1	1	1
B : d	0	0	0	0	0	0	0	0
C : R	1	1	1	1	1	1	1	1
D : ξ	1	0	0	1	0	0	0	0
INTERACTIONS								
AB	0	0	0	0	0	0	0	0
AC	1	1	1	1	1	0	1	1
AD	0	0	0	1	0	0	0	0
BC	0	0	0	0	0	0	0	0
BD	0	0	0	0	0	0	0	0
CD	0	0	0	1	0	1	0	0
ABC	0	0	0	0	0	0	0	0
ABD	0	0	0	0	0	0	0	0
ACD	0	0	0	0	0	0	0	0
BCD	0	0	0	0	0	0	0	0

On peut constater, d'après ce tableau, que l'épaisseur de la première couche e_1 et le coefficient de réflexion R ainsi que leur interaction (e_1 & R) ont une influence significative sur pratiquement

tous les niveaux d'accélération maximales et minimales. En effet, l'onde de Rayleigh étant la plus énergétique, l'accélération causée par cette dernière sera plus énergétique que celle causée par les ondes de compression. L'accélération maximale mesurée est associée à l'accélération causée par la mesure de l'onde R. Cette onde a la particularité de se propager à la surface de la structure contrairement à l'onde P qui est une onde de volume et qui se propage dans l'épaisseur de la structure. Par conséquent, cette variable de sortie dépend essentiellement des dimensions et des propriétés de la première couche. Le coefficient d'amortissement ξ , a une influence significative uniquement sur les niveaux d'accélération maximales ε_{max1} et ε_{max4} . Son interaction avec l'épaisseur de la première couche e_1 (ξ & e_1) a une influence significative uniquement sur le niveau d'accélération maximale ε_{max4} alors que son interaction avec le coefficient de réflexion R (ξ & R) a une influence significative sur le niveau d'accélération maximale ε_{max4} et le niveau d'accélération minimale ε_{min2} . Ce facteur purement numérique intervient dans le calcul de l'amortissement de Rayleigh. Plus ce facteur augmente, plus cette accélération maximale diminue. Le Tableau 43 montre que la position du défaut d ainsi que son interaction avec les trois autres facteurs d'entrée n'a aucune influence sur ces variables de sorties (ε_{max} et ε_{min}).

III.5.2.2. Effet sur l'amortissement du signal temporel α

Le Tableau 44 présente l'effet de la variation des facteurs et de leurs interactions sur l'amortissement de la valeur absolue du signal temporel α (Tableau 38). L'ensemble de ces résultats est extrait des différentes tables de l'ANOVA et est présenté en Annexe 3.

Tableau 44. Effet des facteurs et leurs interactions sur l'amortissement du signal temporel α

	α_1	α_2	α_3	α_4
PRINCIPAUX EFFETS				
A : e_1	0	0	0	0
B : d	0	0	0	0
C : R	0	1	1	1
D : ξ	1	1	1	1
INTERACTIONS				
AB	0	0	0	0
AC	0	1	0	1
AD	0	0	0	0
BC	0	0	0	0
BD	0	0	0	0
CD	0	0	0	0
ABC	0	0	1	0
ABD	0	0	0	0
ACD	0	0	0	0
BCD	0	0	0	0

Le coefficient de réflexion R et le coefficient d'amortissement ξ sont les seuls facteurs qui ont des effets significatifs sur l'amortissement du signal dans la plupart des mesures. L'épaisseur de la première couche e_1 et la profondeur du défaut d quant à eux ne présentent aucun effet significatif sur l'amortissement de des différentes mesures. L'amortissement α dépend donc essentiellement des matériaux traversés par l'onde ainsi que du coefficient d'amortissement ξ introduit dans la simulation. La position de la mesure d'accélération (A_1, A_2, A_3 ou A_4) influe sur les interactions entre e_1 et R uniquement. Rappelons que les accélérations sont mesurées à quatre point à 20%, 30%, 40% et 50% de l'épaisseur e_1 . L'interaction entre l'épaisseur de la première couche e_1 et le coefficient de réflexion $R(e_1 \& R)$ ne présente pas d'effet sur les amortissements α_1 et α_3 de la première et la troisième mesure, et un effet significatif sur les amortissements α_2 et α_4 de la deuxième et de la quatrième mesure. L'interaction entre l'épaisseur de la première couche e_1 , la profondeur du défaut d et le coefficient de réflexion $R(e_1 \& d \& R)$ présente un effet significatif sur l'amortissement de la troisième mesure α_3 , mais c'est un résultat un peu isolé qui peut simplement provenir de l'effet de l'interaction de R et e_1 seuls. Ici seul l'amortissement α est discuté. En effet l'interprétation pour les amortissements $\alpha_{Air\ ENV\ Acc\ ABS}$ et $\alpha_{Air\ ENV\ Acc}$ est similaire.

III.5.2.3. Effet sur l'aire de la réponse temporelle ABS AirAccABS

L'intégrale de la surface sous la courbe apporte une information globale. Elle reprend en particulier les informations apportées sur l'effet de ξ et R sur ε_{max} et ε_{min} . Le Tableau 45 présente l'effet de la variation des facteurs et leurs interactions sur l'aire sous la valeur absolue du signal temporel des différentes mesures (AirAccABS). L'épaisseur de la première couche e_1 , le coefficient de réflexions R ainsi que le facteur d'amortissement ξ sont les facteurs qui ont un effet significatif sur cette variable et ce pour toutes les mesures. La profondeur du défaut d , quant à elle ne présente pas d'effet significatif sur AirAccABS. L'interaction entre l'épaisseur de la première couche e_1 et le coefficient de réflexion $R(e_1 \& R)$ présente un effet significatif sur l'aire de la valeur absolue des signaux temporels mesurés au premier, au troisième et au quatrième point. Au deuxième point de mesure cette interaction n'a pas un effet considéré comme significatif sur cette variable. Ce qui paraît curieux au vu de la tendance des autres points de calcul. L'interaction entre le coefficient d'amortissement ξ et le coefficient de réflexion $R(\xi \& R)$ présente un effet significatif sur l'aire de la valeur absolue des signaux temporels mesurés au premier et deuxième point. Ici aussi seul l'amortissement AirAccABS est discuté. En effet, l'interprétation pour AirENVAccABS et AirENVAcc est similaire.

Tableau 45. Effet de la variation des facteurs et leurs interactions sur l'aire de la valeur absolue de la réponse temporelle (AirAccABS)

	AirAccABS ₁	AirAccABS ₂	AirAccABS ₃	AirAccABS ₄
PRINCIPAUX EFFETS				
A : e_1	1	1	1	1
B: d	0	0	0	0
C: R	1	1	1	1
D: ξ	1	1	1	1
INTERACTIONS				
AB	0	0	0	0
AC	1	0	1	1
AD	0	0	0	0
BC	0	0	0	0
BD	0	0	0	0
CD	0	1	1	0
ABC	0	0	0	0
ABD	0	0	0	0
ACD	0	0	0	0
BCD	0	0	0	0

III.5.3. Exploitation de la réponse fréquentielle

III.5.3.1. Effet de AirFFT_{NF} et AirFFT_F

Le Tableau 46 présente l'effet de la variation des facteurs et leurs interactions sur l'aire située au-dessous de la transformée de Fourier non fenêtrée (NF) et fenêtrée (F) calculée à partir des accélérations obtenues aux différents points de mesures. L'épaisseur de la première couche e_1 ainsi que le coefficient de réflexion R , sont les facteurs qui ont le plus d'effet sur l'aire de la zone située au-dessous de la transformée de Fourier non fenêtrée AirFFT_{NF}. La profondeur du défaut d et le coefficient d'amortissement ξ n'ont, quant à eux, pas d'effet significatif sur cette même variable de sortie. Contrairement à AirFFT_{NF}, l'épaisseur de la première couche e_1 n'a pas un effet significatif sur la zone située au-dessous de la transformée de Fourier fenêtrée AirFFT_F, et seul le coefficient de réflexion R présente un effet significatif sur AirFFT_F. Seule l'interaction entre l'épaisseur de la première couche e_1 et le coefficient de réflexion R (e_1 & R) présente un effet significatif sur AirFFT_{NF1} calculée pour le point Acc₁. Pour la variable AirFFT_N, aucune interaction ne présente d'effet significatif. On peut remarquer que fenêtrage appliqué aux différents points de mesure à une influence sur ces variables. En effet, il est possible de perdre des informations comme par exemple l'influence de l'épaisseur de la première couche sur l'aire située sous la transformée de Fourier AirFFT suite à l'application de la fenêtre de Blackman-Harris. Il faut par conséquent appliquer le fenêtrage avec précaution.

Tableau 46. Effet de la variation des facteurs et leurs interactions sur l'aire située sous la transformée de Fourier Non fenêtrée et l'aire située au de la transformée de Fourier fenêtrée

	AirFFT _{NF1}	AirFFT _{NF2}	AirFFT _{NF3}	AirFFT _{NF4}	AirFFT _{F1}	AirFFT _{F2}	AirFFT _{F3}	AirFFT _{F4}
PRINCIPAUX EFFETS								
A : e_1	1	1	1	1	0	0	0	0
B: d	0	0	0	0	0	0	0	0
C: R	1	1	1	1	1	1	1	1
D: ξ	0	0	0	0	0	0	0	0
INTERACTIONS								
AB	0	0	0	0	0	0	0	0
AC	1	0	0	0	0	0	0	0
AD	0	0	0	0	0	0	0	0
BC	0	0	0	0	0	0	0	0
BD	0	0	0	0	0	0	0	0
CD	0	0	0	0	0	0	0	0
ABC	0	0	0	0	0	0	0	0
ABD	0	0	0	0	0	0	0	0
ACD	0	0	0	0	0	0	0	0
BCD	0	0	0	0	0	0	0	0

III.5.3.2. Effet de l'aire sous la MSD NF et F

La première colonne du Tableau 47 présente les effets des facteurs et de leurs interactions sur l'aire située au-dessous de la variable de sortie AirMSD_{NF}. L'épaisseur du premier milieu e_1 et le coefficient de réflexion R ainsi que leurs interactions ont un effet significatif sur l'aire située au-dessus de la MSD Non Fenêtrée.

La profondeur du défaut d et le coefficient d'amortissement ξ , ainsi que toutes les autres interactions entre les différents facteurs n'ont pas d'effet significatif sur AirMSD_{NF}. La deuxième colonne de ce même tableau présente les effets des facteurs et de leurs interactions sur l'aire située au-dessous la AirMSD_F. Sur cette variable, aucun facteur n'a un effet significatif. Il en est de même pour les différentes interactions entre les différents facteurs. Ici aussi on peut remarquer qu'en appliquant le fenêtrage de Blackman-Harris aux réponses obtenues, on perd donc les informations liées aux facteurs d'entrées tel que l'épaisseur de la première couche e_1 et le coefficient de réflexion R .

Tableau 47. Effet de la variation des facteurs et leurs interactions sur les aires au-dessous des MSD NF et MSD F

	AirMSD _{NF}	Air MSD F
PRINCIPAUX EFFETS		
A : e_1	1	0
B: d	0	0
C: R	1	0
D: ξ	0	0
INTERACTIONS		
AB	0	0
AC	1	0
AD	0	0
BC	0	0
BD	0	0
CD	0	0
ABC	0	0
ABD	0	0
ACD	0	0
BCD	0	0

III.5.3.3. Effet du nombre de pics pour la MSD_{NF} et MSD_F

La première colonne du Tableau 48 présente les effets des différents facteurs ainsi que leurs interactions sur le nombre de pics de la MSD non fenêtré NbMSD_{NF}. Le coefficient de réflexion R est le seul facteur qui présente un effet significatif sur cette variable de sortie. Les trois autres facteurs, l'épaisseur de la première couche e_1 , la profondeur du défaut d ainsi que le coefficient d'amortissement ξ ont, quant à eux, n'ont pas d'effet significatif sur NbMSD_{NF}. Pourtant, l'interprétation traditionnelle de l'Impact-Echo est basée sur la présence d'un pic dominant unique. On retrouve ainsi le problème soulevé au chapitre précédent. L'interaction entre les différents facteurs ne présente aucun effet significatif sur le nombre de pics situés sur le MSD non fenêtré. La deuxième colonne du Tableau 48 présente les effets des facteurs et de leurs interactions sur le nombre de pics situés dans la MSD fenêtré NbMSD_F. Ici, la profondeur du défaut d présente le seul effet significatif sur le nombre de pics situés dans la MSD fenêtrée. L'interaction entre la profondeur du défaut d et le coefficient de réflexion R (d & R) ainsi que l'interaction entre l'épaisseur de la première couche e_1 la profondeur du défaut d et le coefficient de réflexion R (e_1 & d & R) présentent un effet significatif sur NbMSD_F. La présence du défaut modifie donc le nombre de pics, ce qui peut être un effet structurel.

Tableau 48. Effet de la variation des facteurs et de leurs interactions sur les variables $NbMSD_{NF}$ et $NbMSD_F$

	$NbMSD_{NF}$	$NbMSD_F$
PRINCIPAUX EFFETS		
A : e_1	0	0
B: d	0	1
C: R	1	0
D: ξ	0	0
INTERACTIONS		
AB	0	0
AC	0	0
AD	0	0
BC	0	1
BD	0	0
CD	0	0
ABC	0	1
ABD	0	0
ACD	0	0
BCD	0	0

III.5.4. Conclusion

Les facteurs d'entrée du plan d'expérience présentent des effets significatifs en fonction de la variable de sortie. Le coefficient de réflexions R , est le facteur qui présente un effet sur la majorité des variables de sortie, suivi par l'épaisseur de la première couche e_1 . Le facteur d'entrée d qui présente la profondeur du défaut est le facteur qui le moins d'effet sur les variables de sortie sauf sur le nombre de pics pour la MSD fenêtrée $NbMSD_F$. On a aussi pu constater que même si un facteur ne présente pas un effet significatif sur une variable de sortie, son interaction avec un autre facteur, ayant un effet significatif, peut s'avérer avoir un effet significatif sur cette dernière. On a aussi pu constater qu'à l'introduction de la fenêtre de Blackman-Harris, l'effet des facteurs d'entrée ainsi que de leurs interactions peut varier. En effet, ce fenêtrage induit la perte d'informations liées aux facteurs d'entrées tels que l'épaisseur de la première couche e_1 ou le coefficient de réflexion présente R .

III.6. Interprétation de l'essai Impact-Echo

III.6.1. Facteurs d'entrée

Le problème posé initialement était comment obtenir des informations sur le remplissage situé derrière une première couche pouvant être assimilée à un mur de tête ou une voûte d'un pont en maçonnerie avec un essai Impact Echo. Quatre facteurs d'entrée ont été choisis, e_1 , R , d et ξ , ces paramètres décrivent les résultats finaux pouvant être extraits d'une mesure. Ce qui est obtenu directement à l'issue de la mesure, sont les variables de sortie de la simulation.

Le problème simulé admet une solution unique que l'on a calculée sous forme des variables de sortie et des valeurs qu'elles prennent. Le problème qui nous intéresse est le problème inverse, on a les résultats de mesure (variables de sorties) et l'on cherche à remonter aux facteurs d'entrée (e_1 , R , d et ξ). La solution de ce problème inverse n'est a priori pas unique. On va donc chercher à déterminer une solution de ce problème.

Les variables de sorties présentées au paragraphe III.4 sont bien corrélées avec la distance relative de 20%; 30%; 40% et 50% des différentes mesures par rapport à l'épaisseur de la première couche e_1 à la source d'impact. La Figure 83 illustre un tel exemple de corrélation. Par conséquent prendre la pente P et l'ordonnée à l'origine Ord de la droite au lieu des quatre mesures en question nous permet d'agréger ces mesures et d'avoir 2 données plutôt que 4 variables dépendantes des 4 différentes mesures. Cette démarche est donc essentielle à la simplification des modèles d'une part, mais aussi à la prise en compte du fait que l'expérimentation ne fera pas toujours 4 mesures, et ne les positionnera pas toujours sur les points choisis pour le plan d'expérience. D'autres part dans le plan d'expérience on a choisi des distances proportionnelles à l'épaisseur de la première couche e_1 , une donnée a priori inconnue.

Sur les différentes sorties temporelles et fréquentielles présentée au paragraphe III.4, seules les variables de sorties présentées au Tableau 49 sont retenues pour la suite de l'étude. En effet, nous avons sélectionné uniquement les variables de sorties pouvant être obtenus à la fois à partir des simulations numériques réalisées aux chapitres II ou III et celle obtenues au chapitre IV qui présente les essais expérimentaux afin d'évaluer la simulation numérique. Les différents pentes et ordonnées à l'origine obtenues à partir des différentes mesures pour chaque variable de sortie sont présentés au Tableau 27 de l'Annexe 3.

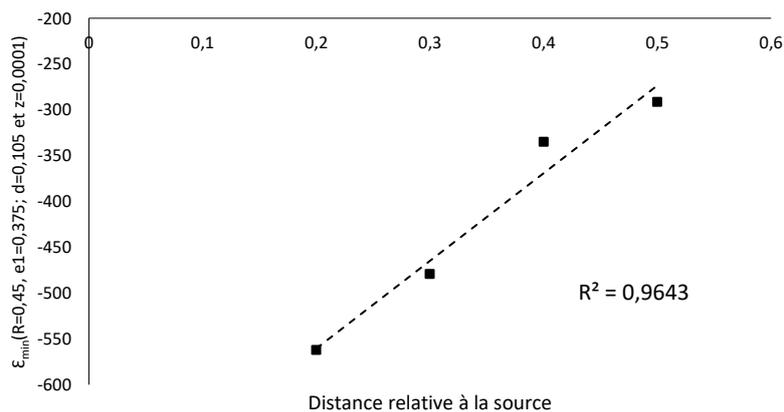


Figure 83. Exemple de lien entre l'accélération et la distance relative à la source pour l'accélération minimal ϵ_{\min} correspondant aux facteurs d'entrées suivants : $R=0,45$, $e_1=0,375$; $d=0,105$ et $z=0,0001$

Tableau 49. Variables de sorties retenues pour la suite de l'étude

Paramètres	Nb de mesures	Pente	Ordonné à l'origine
ε_{max}	4	$P_{\varepsilon_{max}}$	$Ord_{\varepsilon_{max}}$
ε_{min}	4	$P_{\varepsilon_{min}}$	$Ord_{\varepsilon_{min}}$
Air ENVAccABS	4	$P_{Air\ ENVAccABS}$	$Ord_{Air\ ENVAccABS}$
$\alpha_{Air\ ENVAccABS}$	4	$P_{\alpha_{Air\ ENVAccABS}}$	$Ord_{\alpha_{Air\ ENVAccABS}}$
AirENVAcc	4	$P_{AirENVAcc}$	$Ord_{AirENVAcc}$
$\alpha_{AirENVAcc}$	4	$P_{\alpha_{ENV}}$	$Ord_{\alpha_{ENV}}$
AirAcABS	4	$P_{AirAcABS}$	$Ord_{AirAcABS}$
α	4	P_{α}	Ord_{α}
AirFFT _{NF}	4	$P_{AireFFTNF}}$	$Ord_{AireFFTNF}}$

III.6.1.1. Epaisseur de la première couche e_1

Une régression linéaire complète est calculée par la méthode des moindres carrés afin de prendre en compte différents variables de sorties indépendantes dans le calcul de e_1 . Pour réaliser cette régression linéaire on prend en compte les variables de sorties retenues présentées au Tableau 49. Ces variables sont présentées en Annexe 3. Cette régression linéaire (Eq. (III-19)) va permettre d'estimer l'épaisseur de la première couche e_1 . Le Tableau 50 résume les coefficients obtenus à partir de ce modèle de régression linéaire afin d'ajuster le coefficient e_{1reg} selon l'équation suivantes :

$$e_{1reg} = a_1 P_{Air\ ENVAccABS} + a_2 Ord_{Air\ ENVAccABS} + a_3 P_{\alpha_{Air\ ENVAccABS}} + \dots + b \quad (III-19)$$

Avec a_1, a_2, \dots, a_{18} les coefficients pondérant respectivement des variables de sortie et b l'ordonnée à l'origine vérifiant l'équation ci-dessus. Ces paramètres sont présentés au Tableau 50.

Le Tableau 51 présente les estimations des épaisseurs de la première couche e_{1reg} calculées à partir du modèle présenté dans l'équation (III-19). Cette régression permet d'estimer l'épaisseurs de la première couche e_1 avec un taux d'erreur moyen assez faible de 0,33%. Le coefficient b est de 0,3, il se situe au milieu des deux valeurs imposées de e_1 . Les coefficients a_i permettent d'estimer la variation autour de $b = 0,3$. Cette estimation est très bonne pour tous les points ayant servi à établir la relation.

Tableau 50. Coefficient de pondération des variables de sorties

Coefficient	Variabes de sorties	Valeurs
a_1	$P_{Air\ ENV\ Acc\ ABS}$	$2,01E-01$
a_2	$Ord_{Air\ ENV\ Acc\ ABS}$	$2,18E+00$
a_3	$P_{\alpha\ Air\ ENV\ Acc\ ABS}$	$-8,49E-07$
a_2	$Ord_{\alpha\ Air\ ENV\ Acc\ ABS}$	$-1,21E-05$
a_5	$P_{Air\ ENV\ Acc}$	$5,08E-03$
a_6	$Ord_{Air\ ENV\ Acc}$	$-4,87E-01$
a_7	$P_{\alpha\ ENV}$	$2,09E-05$
a_8	$Ord_{\alpha\ ENV}$	$1,72E-04$
a_9	$P_{Air\ Ac\ ABS}$	$1,85E-01$
a_{10}	$Ord_{Air\ Ac\ ABS}$	$-1,95E+00$
a_{11}	P_{α}	$-2,86E-05$
a_{12}	Ord_{α}	$-1,94E-04$
a_{13}	$P_{\epsilon\ min}$	$4,35E-04$
a_{14}	$Ord_{\epsilon\ min}$	$3,56E-03$
a_{15}	$P_{\epsilon\ max}$	$2,05E-05$
a_{16}	$Ord_{\epsilon\ max}$	$5,40E-04$
a_{17}	$P_{Air\ FF\ TNF}$	$5,83E-06$
a_{18}	$Ord_{Air\ FF\ TNF}$	$3,89E-05$
Ordonnée à l'origine b	-	$3,08E-01$

Tableau 51. Estimation de l'épaisseur de la première couche e_{1reg} à partir du modèle de régression

Simulation	e_1 (m)	e_{1reg} (m)	Erreur (%)
Simulation 1	0,25	0,251	0,45
Simulation 2	0,375	0,374	0,37
Simulation 3	0,25	0,251	0,20
Simulation 4	0,375	0,375	0,00
Simulation 5	0,25	0,253	1,28
Simulation 6	0,375	0,377	0,48
Simulation 7	0,25	0,247	1,35
Simulation 8	0,375	0,374	0,17
Simulation 9	0,25	0,251	0,35
Simulation 10	0,375	0,374	0,28
Simulation 11	0,25	0,249	0,20
Simulation 12	0,375	0,375	0,04
Simulation 13	0,25	0,249	0,29
Simulation 14	0,375	0,374	0,28
Simulation 15	0,25	0,252	0,75
Simulation 16	0,375	0,376	0,24
Simulation 17	0,25	0,248	0,71
Simulation 18	0,375	0,377	0,47
Simulation 19	0,25	0,250	0,07
Simulation 20	0,375	0,375	0,06
Simulation 21	0,25	0,250	0,05
Simulation 22	0,375	0,376	0,15
Simulation 23	0,25	0,251	0,24
Simulation 24	0,375	0,374	0,16
Simulation 25	0,25	0,249	0,34
Simulation 26	0,375	0,373	0,47
Simulation 27	0,25	0,250	0,12
Simulation 28	0,375	0,376	0,17
Simulation 29	0,25	0,250	0,11
Simulation 30	0,375	0,375	0,06
Simulation 31	0,25	0,251	0,37
Simulation 32	0,375	0,375	0,11
Simulation 33	0,25	0,250	0,02
Simulation 34	0,375	0,376	0,38
Simulation 35	0,25	0,249	0,55
Simulation 36	0,375	0,373	0,42
Erreur Moyenne			0,33

III.6.1.2. Coefficient de réflexion R

Une régression linéaire complète est calculée par la méthode des moindres carrés afin de prendre en compte différentes variables de sorties indépendantes dans le calcul de R . Pour calculer cette

régression linéaire on prend en compte les variables de sorties. Ces variables sont présentées en Annexe 3. Cette régression linéaire (Eq (III-20)) va permettre d'estimer le coefficient de réflexions R . Le Tableau 52 résume les coefficients obtenus à partir ce modèle de régression linéaire afin d'ajuster le coefficient R_{reg} selon l'équation suivante :

$$R_{reg} = a_1 P_{Air\ ENVAccABS} + a_2 Ord_{Air\ ENVAccABS} + a_3 P_{\alpha Air\ ENVAccABS} + \dots + b \quad (III-20)$$

Avec a_1, a_2, \dots, a_{18} les coefficients pondérant respectivement des variables de sortie et b l'ordonnée à l'origine vérifiant l'équation ci-dessus. Ces paramètres sont présentés au Tableau 52.

Tableau 52. Coefficient de pondération des variables de sorties

Coefficient	Variables de sorties	Valeurs
a_1	$P_{Air\ ENVAccABS}$	1,16E-01
a_2	$Ord_{Air\ ENVAccABS}$	6,95E-01
a_3	$P_{\alpha Air\ ENVAccABS}$	-3,72E-07
a_4	$Ord_{\alpha Air\ ENVAccABS}$	-5,98E-06
a_5	$P_{Air\ ENVAcc}$	-1,11E-01
a_6	$Ord_{Air\ ENVAcc}$	-1,01E+00
a_7	$P_{\alpha ENV}$	1,29E-05
a_8	$Ord_{\alpha ENV}$	8,90E-05
a_9	$P_{Air\ AcABS}$	-1,16E-01
a_{10}	$Ord_{Air\ AcABS}$	-4,92E-02
a_{11}	P_{α}	-1,36E-05
a_{12}	Ord_{α}	-8,77E-05
a_{13}	$P_{\epsilon min}$	4,37E-05
a_{14}	$Ord_{\epsilon min}$	4,29E-04
a_{15}	$P_{\epsilon max}$	-4,32E-05
a_{16}	$Ord_{\epsilon max}$	-2,32E-04
a_{17}	$P_{AireFFTNE}$	-7,06E-07
a_{18}	$Ord_{AireFFTNE}$	-9,95E-06
Ordonnée à l'origine b	-	9,39E-01

Le Tableau 53 présente les estimations des épaisseurs de la première couche R_{reg} calculées à partir du modèle présenté dans l'équation (III-20). Cette régression permet d'estimer l'épaisseur de la première couche R avec un taux d'erreur moyen assez faible de 0,1%. Le terme constant b est de 0,94, bien en dehors de l'intervalle [0,45 ; 0,76]. La partie non constante de la fonction va donc servir à diminuer la valeur de b . La valeur maximale de l'erreur relative est de 0,3%.

Tableau 53. Estimation du coefficient de réflexion R_{reg} à partir du modèle de régression

Simulation	R	R_{reg}	Erreur (%)
Simulation 1	0,45	0,449	0,134
Simulation 2	0,45	0,450	0,085
Simulation 3	0,45	0,451	0,165
Simulation 4	0,45	0,450	0,021
Simulation 5	0,76	0,761	0,132
Simulation 6	0,76	0,760	0,033
Simulation 7	0,76	0,759	0,184
Simulation 8	0,76	0,760	0,024
Simulation 9	0,45	0,451	0,316
Simulation 10	0,45	0,450	0,031
Simulation 11	0,45	0,449	0,171
Simulation 12	0,45	0,451	0,113
Simulation 13	0,76	0,761	0,157
Simulation 14	0,76	0,760	0,044
Simulation 15	0,76	0,761	0,078
Simulation 16	0,76	0,760	0,055
Simulation 17	0,45	0,450	0,011
Simulation 18	0,45	0,451	0,275
Simulation 19	0,76	0,761	0,094
Simulation 20	0,76	0,760	0,039
Simulation 21	0,45	0,450	0,016
Simulation 22	0,45	0,451	0,276
Simulation 23	0,76	0,759	0,105
Simulation 24	0,76	0,760	0,025
Simulation 25	0,45	0,450	0,032
Simulation 26	0,45	0,449	0,319
Simulation 27	0,45	0,450	0,018
Simulation 28	0,45	0,449	0,145
Simulation 29	0,76	0,760	0,034
Simulation 30	0,76	0,760	0,049
Simulation 31	0,76	0,760	0,036
Simulation 32	0,76	0,760	0,033
Simulation 33	0,45	0,449	0,117
Simulation 34	0,45	0,450	0,031
Simulation 35	0,76	0,759	0,142
Simulation 36	0,76	0,759	0,106
Erreur Moyenne			0,1

III.6.1.3. Amortissement numérique ξ

Ici aussi, une régression linéaire complète est calculée par la méthode des moindres carrés afin de prendre en compte différents variables de sorties indépendantes dans le calcul de l'amortissement numérique ξ . Pour calculer cette régression linéaire on prend en compte les variables de sorties. Ces variables sont présentées en Annexe 3. Cette régression linéaire (Eq (III-

21)) va permettre d'estimer le coefficient de réflexions ξ . Le Tableau 54 résume les coefficients obtenus à partir ce modèle de régression linéaire afin d'ajuster le coefficient ξ_{reg} selon l'équation suivante :

$$\xi_{reg} = a_1 P_{Air\ ENVAccABS} + a_2 Ord_{Air\ ENVAccABS} + a_3 P_{\alpha Air\ ENVAccABS} + \dots + b \quad (III-21)$$

Avec a_1, a_2, \dots, a_{18} les coefficients pondérant respectivement des variables de sortie et b l'ordonnée à l'origine vérifiant l'équation ci-dessus. Ces paramètres sont présentés au Tableau 54.

Tableau 54. Coefficients de pondération des variables de sorties

Coefficient	Variabes de sorties	Valeurs
a_1	$P_{Air\ ENVAccABS}$	-7,13E-04
a_2	$Ord_{Air\ ENVAccABS}$	-1,57E-04
a_3	$P_{\alpha Air\ ENVAccABS}$	4,68E-09
a_2	$Ord_{\alpha Air\ ENVAccABS}$	6,21E-08
a_5	$P_{Air\ ENVAcc}$	5,50E-04
a_6	$Ord_{Air\ ENVAcc}$	8,56E-05
a_7	$P_{\alpha ENV}$	-7,89E-08
a_8	$Ord_{\alpha ENV}$	-5,40E-07
a_9	$P_{AirAcABS}$	2,40E-03
a_{10}	$Ord_{AirAcABS}$	5,88E-03
a_{11}	P_{α}	6,76E-08
a_{12}	Ord_{α}	3,97E-07
a_{13}	$P_{\epsilon min}$	6,07E-07
a_{14}	$Ord_{\epsilon min}$	2,52E-06
a_{15}	$P_{\epsilon max}$	-5,39E-07
a_{16}	$Ord_{\epsilon max}$	-7,59E-06
a_{17}	$P_{AireFFT NF}$	2,03E-08
a_{18}	$Ord_{AireFFT NF}$	1,92E-07
Ordonnée à l'origine b	-	-1,25E-04

Le Tableau 55 présente les estimations l'amortissement numérique ξ_{reg} calculées à partir du modèle présenté dans l'équation (III-21). Cette régression permet d'estimer l'amortissement numérique ξ avec un taux d'erreur moyen assez faible de 3%. Le terme constant ($b = -0,000125$) est situé en dehors de l'intervalle de variation de ξ , les coefficient a_i du modèle permettent à la fonction d'atteindre les différentes valeurs de ξ . L'écart relatif maximal est de 12%, mais en absolu, il s'agit d'un résultat de 0,000112 au lieu de 0,0001. On retrouve ici le fait qu'une faible variation de ξ , n'entraîne pas une forte variation des ϵ_{max} .

Tableau 55. Estimation de l'amortissement numérique ξ_{reg} à partir du modèle de régression

Simulation	ξ	ξ_{reg}	Erreur (%)
Simulation 1	0,0001	0,000112	12,009
Simulation 2	0,0001	0,000102	2,073
Simulation 3	0,0001	0,000094	5,830
Simulation 4	0,0001	0,000100	0,219
Simulation 5	0,0001	0,000099	0,782
Simulation 6	0,0001	0,000097	2,857
Simulation 7	0,0001	0,000102	2,354
Simulation 8	0,0001	0,000096	4,435
Simulation 9	0,0003	0,000289	3,743
Simulation 10	0,0003	0,000302	0,770
Simulation 11	0,0003	0,000307	2,190
Simulation 12	0,0003	0,000299	0,393
Simulation 13	0,0003	0,000285	4,926
Simulation 14	0,0003	0,000294	2,049
Simulation 15	0,0003	0,000300	0,063
Simulation 16	0,0003	0,000293	2,367
Simulation 17	0,0001	0,000095	4,524
Simulation 18	0,0001	0,000095	4,543
Simulation 19	0,0001	0,000092	7,636
Simulation 20	0,0001	0,000094	5,506
Simulation 21	0,0003	0,000305	1,583
Simulation 22	0,0003	0,000293	2,294
Simulation 23	0,0003	0,000305	1,639
Simulation 24	0,0003	0,000294	2,053
Simulation 25	0,0002	0,000196	1,966
Simulation 26	0,0002	0,000206	3,091
Simulation 27	0,0002	0,000199	0,438
Simulation 28	0,0002	0,000204	1,753
Simulation 29	0,0002	0,000204	1,894
Simulation 30	0,0002	0,000212	5,772
Simulation 31	0,0002	0,000202	0,768
Simulation 32	0,0002	0,000209	4,484
Simulation 33	0,0002	0,000203	1,566
Simulation 34	0,0002	0,000198	1,068
Simulation 35	0,0002	0,000210	5,014
Simulation 36	0,0002	0,000212	6,229
Erreur Moyenne			3,080

III.6.1.4. Profondeur du défaut d

Une régression linéaire complète calculée par la méthode des moindres carrés afin de prendre en compte différents variables de sortie indépendantes dans le calcul de d . Pour calculer cette

régression linéaire on prend en compte les variables de sorties présentées au paragraphe I.3. Ces variables sont présentées en Annexe 3. Cette régression linéaire (Eq (III-22)) va permettre d'estimer la profondeur du défaut d avec un taux d'erreur moyen de 0,3%. Le Tableau 56 résume les coefficients obtenus à partir ce modèle de régression linéaire afin d'ajuster le coefficient d_{reg} selon l'équation suivante :

$$d_{reg} = a_1 P_{Air\ ENVAccABS} + a_2 Ord_{Air\ ENVAccABS} + a_3 P_{\alpha Air\ ENVAccABS} + \dots + b \quad (III-22)$$

Avec a_1, a_2, \dots, a_{18} les coefficients pondérant respectivement des variables de sortie et b l'ordonnée à l'origine vérifiant l'équation ci-dessus. Ces paramètres sont présentés au Tableau 56.

Tableau 56. Coefficient de pondération des variables de sorties

Coefficient	Variabes de sorties	Valeurs
a_1	$P_{Air\ ENVAccABS}$	-1,45E-01
a_2	$Ord_{Air\ ENVAccABS}$	-5,92E+00
a_3	$P_{\alpha Air\ ENVAccABS}$	3,18E-06
a_2	$Ord_{\alpha Air\ ENVAccABS}$	1,54E-04
a_5	$P_{Air\ ENVAcc}$	-2,99E+00
a_6	$Ord_{Air\ ENVAcc}$	-2,76E+01
a_7	$P_{\alpha ENV}$	-2,13E-05
a_8	$Ord_{\alpha ENV}$	-2,92E-04
a_9	$P_{Air\ AcABS}$	4,49E+00
a_{10}	$Ord_{Air\ AcABS}$	5,89E+01
a_{11}	P_{α}	2,85E-05
a_{12}	Ord_{α}	1,75E-04
a_{13}	$P_{\epsilon min}$	-6,25E-04
a_{14}	$Ord_{\epsilon min}$	-5,60E-03
a_{15}	$P_{\epsilon max}$	2,05E-04
a_{16}	$Ord_{\epsilon max}$	2,22E-03
a_{17}	$P_{Air\ FFTNF}$	-1,25E-05
a_{18}	$Ord_{Air\ FFTNF}$	-1,16E-04
Ordonnée à l'origine b	-	3,21E-02

Le Tableau 57 présente les estimations de la profondeur du défaut d_{reg} calculée à partir du modèle présenté dans l'équation (III-22). Cette régression permet d'estimer la profondeur du défaut d avec un taux d'erreur moyen assez faible de 5,6%. Comme pour ξ , b est situé en dessous de l'intervalle de variation [0,07 ; 0,105]. L'erreur de 5,6% est important. Le maximum de l'erreur relative est de 14,8%, soit une variation de 0,03 m ce qui est de l'ordre de grandeur de l'étendue de l'intervalle initial. On retrouve donc ce que prévoyait l'analyse de la variance, c'est-à-dire que la profondeur du défaut n'est pas corrélée aux différentes grandeurs mesurables lors d'un essai.

Tableau 57. Estimation de la profondeur du défaut d_{reg} à partir du modèle de régression

Simulation	d (m)	d_{reg} (m)	Erreur (%)
Simulation 1	0,07	0,072	2,326
Simulation 2	0,07	0,062	10,805
Simulation 3	0,105	0,109	3,908
Simulation 4	0,105	0,105	0,349
Simulation 5	0,07	0,066	5,635
Simulation 6	0,07	0,073	4,836
Simulation 7	0,105	0,113	7,577
Simulation 8	0,105	0,096	8,652
Simulation 9	0,07	0,071	0,758
Simulation 10	0,07	0,068	3,059
Simulation 11	0,105	0,100	4,643
Simulation 12	0,105	0,093	11,508
Simulation 13	0,07	0,080	13,830
Simulation 14	0,07	0,080	13,812
Simulation 15	0,105	0,105	0,200
Simulation 16	0,105	0,097	7,849
Simulation 17	0,0875	0,083	5,324
Simulation 18	0,0875	0,094	7,198
Simulation 19	0,0875	0,091	3,608
Simulation 20	0,0875	0,087	0,298
Simulation 21	0,0875	0,096	10,259
Simulation 22	0,0875	0,095	8,203
Simulation 23	0,0875	0,084	3,950
Simulation 24	0,0875	0,084	4,334
Simulation 25	0,07	0,071	1,011
Simulation 26	0,07	0,074	6,169
Simulation 27	0,105	0,098	6,808
Simulation 28	0,105	0,103	1,993
Simulation 29	0,07	0,071	1,598
Simulation 30	0,07	0,080	14,812
Simulation 31	0,105	0,093	11,000
Simulation 32	0,105	0,102	2,437
Simulation 33	0,0875	0,088	0,996
Simulation 34	0,0875	0,094	7,235
Simulation 35	0,0875	0,084	3,952
Simulation 36	0,0875	0,088	0,902
Erreur Moyenne			5,607

III.6.1.5. Conclusion

Dans ce paragraphe, pour chacun des 4 paramètres, il a été établi une relation linéaire permettant de retrouver le paramètre initial à l'aide des variables issues de la mesure. Ces relations ont été testées sur les données ayant servi à les établir. Cette vérification correspond donc à une erreur qui

a été minimisée par les moindres carrés. On trouve une erreur moyenne faible pour e_1 et R , acceptable pour ξ mais difficilement admissible pour d .

III.6.2. Vérification sur les simulations du Chapitre II

L'objectif de ce paragraphe est de vérifier l'applicabilité des modèles de régression linéaire obtenus au paragraphe précédent, sur les simulations réalisées au chapitre II. Ces modèles ont permis d'estimer les 4 variables d'entrée, à savoir, l'épaisseur de la première couche e_1 , le coefficient de réflexion R , l'amortissement numérique ξ et la profondeur du défaut d avec des taux d'erreur moyen de 0,33%, 0,1%, 3,1% et 5,6% respectivement. Cette vérification a pour but de vérifier ce que donnent les fonctions approchées pour des jeux de données n'appartenant pas au plan d'expérience. Cela apporte une validation numérique, où l'on maîtrise le signal d'entrée et la détermination des réponses du système. Les Tableau 58 et 59 présentent les estimations des facteurs d'entrée ainsi que les taux d'erreurs moyens. Le modèle de régression de l'épaisseur de la première couche permet d'estimer e_1 avec un taux d'erreur moyen de 18,47%. Le modèle du coefficient de réflexion permet d'estimer R avec un taux d'erreur moyen de 16,12%. Les modèles de régression pour l'estimation du l'amortissement numérique et de l'épaisseur de défaut permettent d'estimer ces derniers avec des taux d'erreur de 116,63% et 29,48%.

Les valeurs de e_1 se trouvent à l'intérieur de l'intervalle $[0,25 ; 0,375]$ utilisé pour le plan d'expérience. Par contre l'intervalle de R sur lequel a été bâti la fonction approchée ne contient pas les valeurs du monocouche, il en est de même pour d . Cela explique la valeur de e_1 obtenue avec 80% d'erreur et confirme que la solution de l'inversion n'est pas unique. Les simulations bicouches, donnent pour e_1 et R de bons résultats si e_1 et R sont tous 2 proches des valeurs du plan. C'est le cas des simulations 2, 4, 5 et 7 pour un bicouche ne contenant pas de défaut. Si $R = 0,53$ ou si $R = 0,65$, l'erreur relative sur R et celle sur e_1 sont toutes les deux très importantes. Pour ces 4 mêmes simulations, la détermination de ξ et d par les fonctions approchées entraînent une erreur relative importante (en moyenne 35%) sur ξ et détectent un défaut à une profondeur de 10 cm environ pour trois des quatre simulations. Dans ces simulations bicouches, seule la profondeur d n'est pas dans l'intervalle de variation. Lorsque e_1 et R sont proches d'un point de calcul, les valeurs approchées sont correctes. Par contre la valeur approchée de ξ pour ces mêmes points présente une erreur maximale de 61% ce qui rend la fonction trouvée peu fiable. De même les valeurs approchées de d sont loin de la valeur $d = 0$ attendue. En effet, on trouve un maximum de 0,43 pour les 8 simulations et seulement 0,10 pour les 4 simulations proches des points de calcul. La valeur de 0,10 peut sembler acceptable, mais l'étendu de la variation de l'intervalle initial de calcul $[0,07 ; 0,105]$ est de 0,035 bien inférieur à l'écart entre la valeur de calcul ($d = 0$) et la valeur trouvée ($d = 0,10$).

Dans le cas des 8 simulations bicouches avec défaut, les résultats sur e_1 et R confirment ce que l'on a constaté dans le cas des bicouches sans défaut : l'erreur est faible si e_1 et R sont proches des points de calcul, ce qui est le cas pour les simulations 2, 4, 5 et 7. Les valeurs approchées de ξ sont toujours relativement éloignées des valeurs attendues mais c'est le cas dans presque toutes les simulations. Par contre les valeurs de profondeur des défauts d trouvées sont acceptables sauf pour la dernière simulation, même si le point est éloigné du point de calcul.

Cette vérification nous a permis de voir que l'on obtenait des valeurs approchées de e_1 et R assez bonne et de la profondeur d , relativement correcte, si les valeurs attendues sont proches d'un point ayant servi au calcul. Par contre l'erreur est importante pour des points éloignés (simulation 1, 3, 6 et 8 pour les bicouches contenant des défauts), ce qui signifie que pour construire une fonction approchée permettant d'interpréter les résultats de l'Impact-Echo, il faudrait augmenter le nombre de points de calcul, c'est-à-dire prendre plus de valeurs de e_1 , et plus de valeurs de R .

Tableau 58. Estimation de l'épaisseur de la première couche e_1 et du Coefficient de réflexion R

Simulation	e_1 (m)	e_{1reg} (m)	Erreur (%)	R	R_{reg}	Erreur (%)
Mono 1	0,25	0,452	80,66	1,00	0,53	46,77
Mono 2	0,375	0,566	50,88	1,00	0,56	44,00
Mono 3	0,25	0,275	9,91	1,00	0,77	22,72
Mono 4	0,375	0,419	11,66	1,00	0,78	21,89
bi1	0,25	0,142	43,17	0,53	0,34	34,76
bi2	0,25	0,297	18,78	0,44	0,45	0,99
bi3	0,375	0,202	46,10	0,53	0,35	33,35
bi4	0,375	0,383	2,04	0,44	0,45	1,36
bi5	0,25	0,213	14,65	0,71	0,74	4,45
bi6	0,25	0,198	20,87	0,65	0,74	13,69
bi7	0,375	0,377	0,50	0,71	0,76	6,55
bi8	0,375	0,431	14,99	0,65	0,76	16,64
bid1	0,25	0,251	0,45	0,53	0,45	14,59
bid2	0,25	0,259	3,78	0,44	0,45	0,80
bid3	0,375	0,374	0,37	0,53	0,45	14,55
bid4	0,375	0,378	0,67	0,44	0,45	0,72
bid5	0,25	0,253	1,28	0,71	0,76	6,94
bid6	0,25	0,167	33,20	0,65	0,75	14,08
bid7	0,375	0,377	0,48	0,71	0,76	6,84
bid8	0,375	0,431	15,04	0,65	0,76	16,67
	Erreur Moyenne		18,47	Erreur Moyenne		16,12

Tableau 59. Estimation du coefficient d'amortissement ξ et de la profondeur du défaut d

Simulation	ξ	ξ_{reg}	Erreur (%)	d (m)	d_{reg} (m)	Erreur (%)
Mono 1	0,0002	0,0013	566,74	0	-0,61	-
Mono 2	0,0002	0,0011	472,42	0	-0,48	-
Mono 3	0,0002	0,0008	322,78	0	0,05	-
Mono 4	0,0002	0,0007	228,54	0	-0,07	-
bi1	0,0002	0,0004	123,67	0	0,34	-
bi2	0,0002	0,0002	0,46	0	0,09	-
bi3	0,0002	-0,0001	125,17	0	0,43	-
bi4	0,0002	0,0001	42,38	0	0,11	-
bi5	0,0002	0,0001	35,69	0	0,02	-
bi6	0,0002	0,0003	44,37	0	0,06	-
bi7	0,0002	0,0001	61,31	0	0,10	-
bi8	0,0002	0,0002	16,98	0	-0,02	-
bid1	0,0002	0,0001	44,00	0,07	0,07	2,33
bid2	0,0002	0,0001	33,46	0,07	0,11	52,15
bid3	0,0002	0,0001	48,96	0,07	0,06	10,81
bid4	0,0002	0,0001	33,55	0,07	0,07	3,46
bid5	0,0002	0,0001	50,39	0,07	0,07	5,64
bid6	0,0002	0,0002	12,63	0,07	0,07	5,04
bid7	0,0002	0,0001	51,42	0,07	0,07	4,84
bid8	0,0002	0,0002	17,73	0,07	-0,04	151,56
	Erreur Moyenne		116,63	Erreur Moyenne		29,48

III.7. Conclusion et discussion

Le plan d'expériences factoriel numériques a été introduit dans le but d'étudier la variation du comportement du spectre de fréquence et du domaine temporel d'un essai Impact-Echo en fonction de différents facteurs. Les quatre facteurs qui ont été retenus pour cette étude concernent la géométrie de la structure (l'épaisseur de la première couche e_1 et la profondeur du défaut d), les matériaux constitutifs de la structure (le coefficient de réflexion R) et un facteur purement numérique intervenant dans le calcul de l'amortissement de Rayleigh (le coefficient d'amortissement ξ).

Le paramètre de l'interprétation traditionnelle des résultats issus d'un essai Impact-Echo est purement fréquentiel. La réponse, considérée initialement pour cette interprétation, se base sur la lecture de la position du pic pouvant être présent dans le spectre de fréquences. Cette réponse semble être limitée. Par conséquent, l'introduction de nouveaux paramètres de sortie était nécessaire. C'est ainsi que nous avons choisi d'exploiter, à la fois, différents paramètres issus des réponses temporelle et fréquentielle respectivement.

D'après l'ensemble des simulations, résultant des combinaisons du plan d'expériences factoriel numériques, on peut constater que les facteurs principaux ont un effet sur la quasi-totalité des variables de sorties temporelles en rapport avec cette dernière. On a pu constater également que le facteur associé à la profondeur du défaut d , est le facteur qui présente le moins d'effet sur les différentes variables de sortie. Malgré sa faible intensité, cet effet est néanmoins présent et prouve l'existence de ce défaut ainsi que son influence sur les différentes variables de sortie et par conséquent sur les simulations numériques. La réponse temporelle obtenue à l'issue d'une simulation numérique permet donc de donner des informations sur la présence d'anomalies ou de défauts mais ne permet ni de localiser ce défaut, ni de déterminer sa nature.

L'exploitation de la réponse fréquentielle a montré que les facteurs principaux et leurs interactions présentent un effet qui peut varier en fonction des variables et de leur position de mesure. Contrairement à toutes les autres variables de sortie, que ce soit en rapport avec la réponse temporelle ou fréquentielle, il a été constaté que la profondeur du défaut d , a un effet maximal sur uniquement le nombre de pics situés sur la densité spectrale multi-croisée non fenêtrée. Cet effet est perdu avec la densité spectrale multi-croisée fenêtrée probablement à cause du fenêtrage appliqué sur les réponses temporelles qui induit une perte d'informations. L'interprétation des résultats, si un fenêtrage est appliqué doit donc être réalisée avec précaution

Des relations linéaires ont été établies pour les 4 facteurs d'entrée par la méthode des moindres carrés. Elles ont permis de lier les facteurs d'entrée aux variables de sortie permettant ainsi de retrouver le paramètre initial à l'aide des variables issues de la mesure. Ces relations ont été testées, dans un premier temps, sur les données ayant servi à les établir. Cette vérification correspond donc à une erreur qui a été minimisée par les moindres carrés. On trouve une erreur moyenne faible pour e_1 et R , acceptable pour ξ mais difficilement admissible pour d . Ensuite, ces mêmes relations ont été testées sur les variables de sorties obtenue à partir des essais du chapitre précédent. Ces dernières permettent d'estimer l'épaisseur de la première couche e_1 avec un taux d'erreur moyen de 18,47%. Le modèle du coefficient de réflexion permet d'estimer R avec un taux d'erreur moyen de 16,12%. Les modèles de régression pour l'estimation du l'amortissement numérique ξ et de l'épaisseur de défaut d permettent d'estimer ces derniers avec des taux d'erreur de 116,63% et 29,48%. Cette vérification nous a permis de voir que l'on obtenait des valeurs approchées de e_1 et R assez bonne et de la profondeur d , relativement correcte, si les valeurs attendues sont proches d'un point ayant servi au calcul. Par contre l'erreur est importante pour des points éloignés ce qui signifie que pour construire une fonction approchée permettant d'interpréter les résultats de l'Impact-Echo, il faudrait augmenter le nombre de points de calcul, c'est-à-dire prendre plus de valeurs de e_1 , et plus de valeurs de R . Les valeurs approchées de ξ quant à elles, sont toujours relativement éloignées des valeurs attendues mais c'est le cas dans presque toutes les simulations.

Chapitre IV.

Approche expérimentale

IV.1. Introduction

Ce dernier chapitre est consacré à une série d'expérimentations, conduites au laboratoire dans le but de valider les résultats des simulations numériques obtenus aux deux chapitres précédents. Rappelons que la géométrie simulée dans les chapitre II et III est constituée d'une structure bicouche contenant un défaut dans la deuxième couche. L'objectif de la simulation de cette géométrie, était de pouvoir représenter une partie d'un pont, la première couche pouvant être assimilée à une voûte ou un mur de tête et la deuxième couche pouvant être assimilée à un matériau de remplissage situé au-delà. Une première série d'essais est réalisée pour identifier les caractéristiques des matériaux. Leurs ordres de grandeur étaient introduits dans l'état de l'art, mais ici on choisit de travailler avec trois matériaux : le béton comme matériau composant la première couche, l'arène granitique puis la terre crue comme matériaux composant la deuxième couche. Une deuxième série correspond à l'étude numérique : murs de différentes épaisseurs avec un remblai derrière. Une troisième série a été ajoutée à une échelle plus réduite de l'éprouvette 16x32 accolée à un deuxième matériau.

Dans un premier temps, une structure construite au laboratoire et constituée d'une seule couche (représentant la première couche du bicouche) est présentée et le matériau la constituant est caractérisé. Ensuite différents essais, réalisés dans le but d'identifier le matériau qui pourra constituer la deuxième couche de la structure, sont présentés. Enfin, les résultats des différents essais Impact-Echo, effectués sur la structure afin de déterminer les épaisseurs, sont présentés et confrontés à ceux obtenus numériquement dans les chapitres précédents.

IV.2. Géométrie de la structure

L'objectif de ce chapitre est de valider expérimentalement la simulation d'un essai Impact-Echo, développée dans le code éléments finis Cast3M©, présentée dans le deuxième chapitre. L'essai Impact-Echo est réalisé sur une structure bicouche contenant un défaut comme indiqué sur la Figure 84. Pour ce faire, une structure similaire à celle simulée, est construite au laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité (GC2D) à Egletons. Le choix de la géométrie de la structure, des dimensions et des matériaux la constituant sont décrits dans la partie ci-dessous. La géométrie et les dimensions de la structure sont présentées dans la Figure 85.(a). La structure est coulée en forme de U et est composée de trois murs de différentes épaisseurs comme indiqué sur la Figure 85.(b). Les dimensions de cette structure sont résumées dans le Tableau 60.

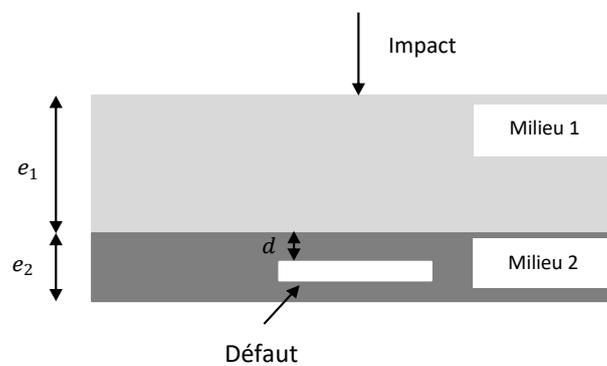


Figure 84. Géométrie de la structure bicouche simulée sur Cast3m© contenant un défaut

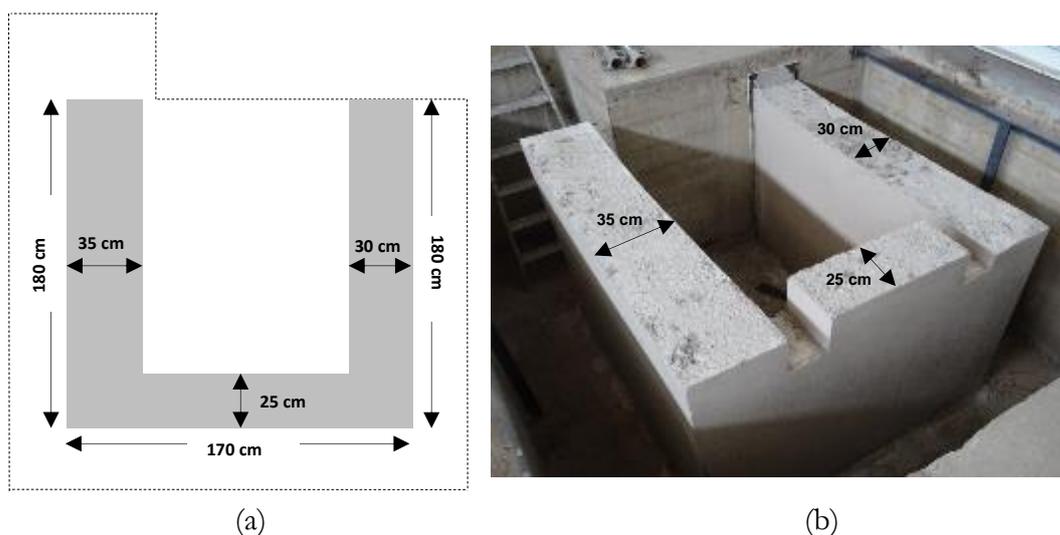


Figure 85. Géométrie de la structure en U : (a). Dimensions de la structure.
(b) Structure coulée au laboratoire

Tableau 60. Dimensions des trois murs constituant la structure en U

	Mur 1	Mur 2	Mur 3
Épaisseur [cm]	25	30	35
Hauteur [cm]	140	120	140
Largeur [cm]	170	180	180

Le mur 1, le mur 2 et le mur 3 feront référence respectivement aux murs d'épaisseurs 25cm, 30cm et 35cm. Ces épaisseurs ont été choisies de sorte qu'elles soient supérieures à la moitié de la longueur d'onde minimale générée par impact afin de pouvoir détecter leurs épaisseurs et ceci, comme énoncé au paragraphe I.6.3.1. L'outil d'impact comme on peut le voir sur la Figure 86, consiste en une bille de 2cm de diamètre, soudée sur une tige en acier et montée sur un manche afin d'assurer le rebond. Le diamètre de cet outil d'impact et le matériau le constituant permettent d'exciter une gamme de fréquence pouvant aller jusqu'à 14,5kHz (Eq. I-20). Par conséquent, en supposant une vitesse moyenne de propagation des ondes P dans le béton de l'ordre de 4000m/s et en appliquant l'équation (Eq. II-23) les épaisseurs doivent être supérieures à au moins 13cm afin d'être détectées.



Figure 86. Système d'Impact avec une bille de 2 cm de diamètre élaboré au laboratoire GC2D

IV.3. Caractérisation de la première couche de la structure

Le matériau constituant la structure construite est le béton (Figure 87) alors que notre objectif est de travailler sur des matériaux tels que la pierre ou la maçonnerie qui peuvent composer les ouvrages anciens comme les ponts en maçonnerie.

Le béton a été retenu comme matériau de la première couche de la structure exploitée pour la validation expérimentale. En effet, ce choix a été fait vue la similitude du comportement de la méthode Impact-Echo vis à vis des matériaux comme le béton, la maçonnerie ou la pierre (Sansalone and Streett, 1997), et que la méthode a été initialement développée sur le béton, et enfin à cause de sa facilité de mise en œuvre. D'autre part les simulations ont été réalisées pour des matériaux homogènes.

Nous choisissons donc le béton, de façon à se rapprocher des conditions simulées et ne pas faire apparaître trop d'interfaces.

Le béton coulé est un béton standard C25/30 XF1 avec un diamètre maximal de granulats de $D=16\text{mm}$. La taille des granulats est un facteur d'hétérogénéité. Plus la taille des granulats augmente plus l'amplitude de l'accélération mesurée diminue avec la distance de propagation. En effet, lorsqu'une onde interagit avec une hétérogénéité du matériau, elle subit de la diffraction. Une partie de son énergie est déviée et redistribuée dans tout l'espace (Chekroun, 2008).

Afin de pouvoir déterminer la vitesse de propagation des ondes de compressions dans le béton utilisé pour couler la structure, un total de cinq échantillons sous forme d'éprouvettes 16x32 a été prélevé. Conformément au protocole, quatre des cinq éprouvettes ont été immergées dans l'eau pendant 28 jours et une cinquième a été laissée au sec afin de détecter toute variation pouvant apparaître suite à cette humidification. Pour déterminer la vitesse de propagation des ondes de compression dans les différents matériaux et les structures, différents essais en fonction de la structure testée ont été réalisés :

- Des essais non destructifs réalisés avec le Pundit PL-200 appliqué en configuration directe sur les éprouvettes 16x32 en béton et sur la structure coulée en U ;
- Des essais destructifs de compressions mécaniques afin de déterminer le module d'Young des éprouvettes 16x32 ;
- Des essais non destructifs réalisés avec le système Impact-Echo appliqué en configuration indirecte sur les éprouvettes 16x32 ainsi que sur la structure coulée.



Figure 87. Coulage de la première couche constituant la structure en U

IV.3.1. Mesure de la vitesse de propagation des ondes dans les éprouvettes

Cet essai, réalisé avec le Pundit PL-200 de Proceq, est un essai non destructif qui opère en configuration directe, et qui consiste à mesurer le temps que met une onde à parcourir une distance d'un point A (émetteur) à un point B (récepteur) à travers un matériau (Figure 88.(a)). Ce dispositif se

compose d'un boîtier avec un écran haute résolution et une paire de transducteurs (Figure 88.(b)). Le Pundit PL-200 génère des ondes avec des fréquences autour de 54kHz alors que l'Impacteur du système Impact-Echo génère des fréquences ne pouvant aller que jusqu'à 14,5kHz. Il peut être utilisé pour mesurer les ondes de compression ou les ondes de cisaillement selon le type de capteurs utilisés. Une fois ce temps de parcours déterminé, une vitesse de propagation peut être calculée, en supposant que la distance de parcours soit connue. Le temps de propagation de l'onde est mesuré sur les cinq éprouvettes 16x32 extraites lors du coulage. Les résultats obtenus ainsi que les vitesses de propagation calculées sont présentés dans le Tableau 61. La vitesse moyenne (V_{p_moy}) entre les différentes éprouvettes est de $V_{p_moy} = 4183,9 \pm 54,7 \text{ m/s}$ ($\sigma = 68,9$ étant l'écart-type); elle correspond aux vitesses de propagation des ondes de compression dans le béton pouvant être retrouvées dans la littérature (Sansalone and Streett, 1997).

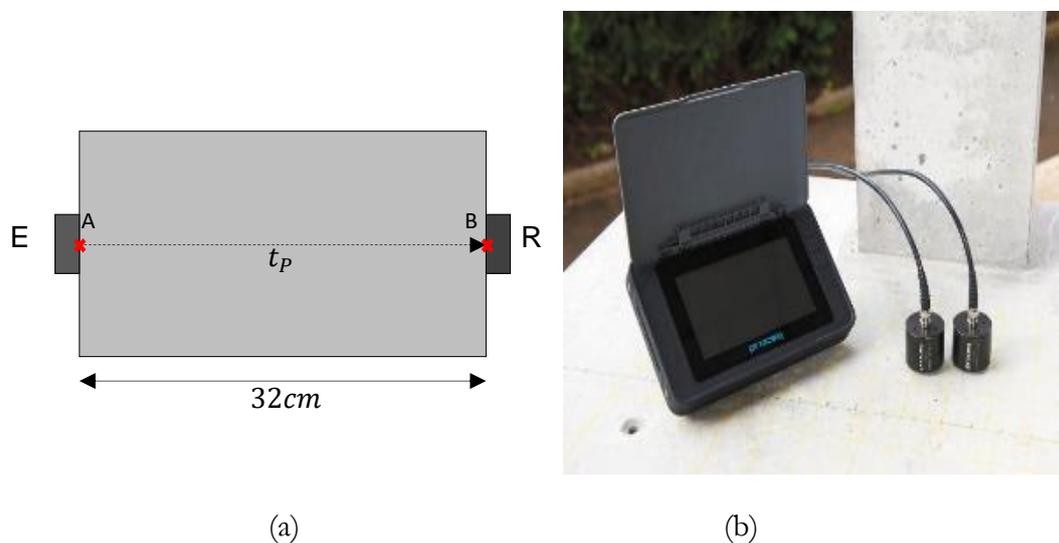


Figure 88 .Dispositif du Pundit PL-200 Proceq : (a) Principe de mesure du temps de parcours en configuration directe. (b) Dispositif du Pundit PL-200

Tableau 61. Temps de parcours et vitesse de propagation des ondes de compression dans les éprouvettes 16x32

Eprouvette	Etat	$t_p [\mu\text{s}]$	$V_p [\text{m/s}]$	$V_{p_moy} [\text{m/s}]$	$\sigma [\text{m/s}]$
H ₁	sec	7,80E-05	4102,6	4183,9	70,6
H ₂	humide	7,50E-05	4266,7		
H ₃	humide	7,70E-05	4155,8		
H ₄	humide	7,80E-05	4102,6		
H ₅	humide	7,60E-05	4210,5		

IV.3.2. Essais de compression mécanique sur les éprouvettes

Sur les cinq éprouvettes, seules quatre ont été testées en compression mécanique (Figure 89), afin de déterminer leurs résistances caractéristiques et par conséquent le module d'Young correspondant. Ce paramètre permettra de calculer les vitesses de propagation des ondes dans les éprouvettes. Une fois les essais réalisés, les modules d'Young sont déterminés à partir (Annexe 4) des caractéristiques de résistance du béton selon l'Eurocode 2. En introduisant la masse volumique et les coefficients de Poisson correspondant aux éprouvettes, la vitesse de propagation peut être calculée à partir de l'équation (I-7). Les valeurs de résistance obtenues ainsi que leurs modules d'Young correspondants et les vitesses de propagation théoriques sont présentés dans le Tableau 62. A partir de ces essais, une vitesse moyenne peut donc être obtenue. Cette vitesse moyenne égale à $3661 \pm 80,6 \text{ m/s}$, est moins importante que la vitesse moyenne ($V_{p_moy} = 4037 \pm 68,9$) calculée à partir de l'essai non destructif dans le paragraphe précédent. On retrouve donc le fait que le module d'Young statique et le module dynamique sont différents.



Figure 89. Essai de compression sur les échantillons d'éprouvettes prélevées lors du coulage de la structure

Tableau 62. Résistance mécanique, module d'Young et vitesse de propagation des ondes de compression dans les éprouvettes 16x32cm

Eprouvette	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅
Etat	Sec	Humide	Humide	Humide	Humide
Poids [kg]	14,6	14,8	14,7	14,6	14,7
Volume [m ³]	6,33E-03	6,33E-03	6,33E-03	6,33E-03	6,33E-03
ρ [kg/m ³]	2304,7	2330,5	2325,7	2312,2	2320,7
Force (kN)	325,3	236,8	287,9	-	239,5
f_{ck} (MPa)	16,2	11,8	14,3	-	11,9
f_{cm} (MPa)	24,2	19,8	22,3	-	19,9
E (GPa)	29	27	29	-	27
V_p [m/s]	3739,1	3587,9	3722,2	-	3595,4
V_{p_moy} [m/s]	-	3635,2			
σ [m/s]	-	75,4			

IV.3.3. Mesure de la vitesse de propagation des ondes dans la structure en béton

Dans cette partie, les vitesses moyennes des propagations des ondes de compressions dans chaque mur de la structure sont mesurées. Cet essai, comme dans le paragraphe IV.3.1 est réalisé avec le Pundit PL-200 de Proceq. Les ondes de compressions traversent le mur, sont mesurées avec le Pundit en configuration directe. Les vitesses de propagation des ondes de compression sont calculées à partir des temps de parcours pour traverser le mur. La vitesse de chaque mur est moyennée sur six mesures en six points différents comme on peut le voir sur la Figure 90. La mesure en chaque point est la moyenne de trois répétitions. Les temps de parcours des ondes de compression mesurés ainsi que leurs vitesses respectives calculées sont données en Annexe 4. Le Tableau 63 résume les temps de parcours moyens et les vitesses moyennes calculées pour chaque mur. On peut constater que les écarts types (σ_{moy}) des temps de parcours et des vitesses moyennes sont plus importants pour le mur d'épaisseur 30cm. En effet, une défaillance a été constatée dans le coffrage ce qui a causé une inhomogénéité dans l'épaisseur de ce mur. Dans ce cas, cette épaisseur peut varier de plusieurs cm surtout dans la moitié basse du mur là où les essais ont été réalisés.

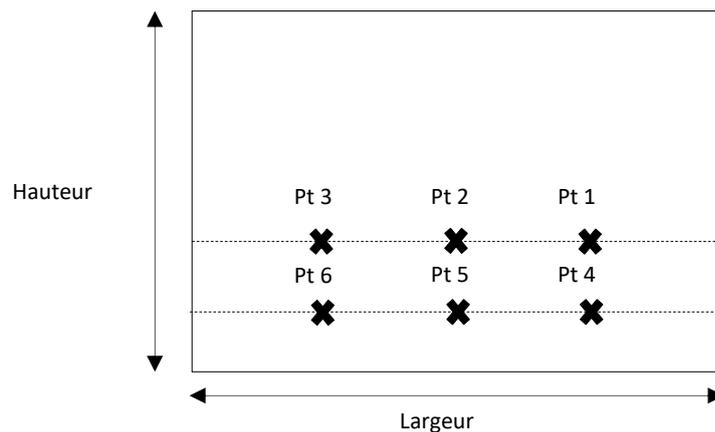


Figure 90. Les différents points de mesure des temps de parcours des ondes de compression avec le Pundit PL-200 en configuration directe

Tableau 63. Temps de propagation et vitesses moyenne dans les différents murs de la structure en U

Murs	$V_{P_{moy}}$ [m/s]	$\sigma_{V_{P_{moy}}}$ [m/s]
Mur 25 cm	4138,6	57,4
Mur 30 cm	3509,9	96,6
Mur 35 cm	4251,1	22,1

IV.3.4. Détermination de l'épaisseur des murs de la structure avec l'Impact-Echo

L'application de la méthode Impact-Echo sur une structure sous forme de plaque permet d'estimer l'épaisseur de cette dernière si la vitesse de propagation des ondes de compression à travers le matériau constituant la plaque est connue (Sansalone and Streett, 1997). Nous avons, dans le paragraphe précédent, pu moyenner les vitesses de propagation des ondes de compression sur chaque face du mur constituant la structure. Comme décrit au premier chapitre, la méthode Impact-Echo opère en configuration indirecte, un critère qui est l'un des atouts majeurs de cette dernière. Ceci signifie qu'une seule face accessible est nécessaire à la réalisation de cet essai. Les ondes mécaniques sont générées par l'outil d'impact représenté dans la Figure 86 et les mesures sont réalisées en trois points à proximité de l'impact à l'aide de trois accéléromètres. Un modèle de ces accéléromètres est représenté dans la Figure 91. Les propriétés des trois capteurs utilisés dans ces essais sont présentées en Annexe 4. Lors des essais les capteurs sont fixés sur les structures avec du scotch à double face. En plus de sa facilité de mise en œuvre, ce type de montage a une influence mineure vis-à-vis de la bande passante et la résonance propre au capteur.



Figure 91. Capteur d'accélération ICP®

La Figure 92 illustre la position des accéléromètres et des différents points d'impact situés de part et d'autre de chaque capteur. Les impacts sont effectués en différents points afin d'étudier l'influence de la position d'impact par rapport au point de mesure sur les résultats des essais Impact-Echo. Une fois la surface impactée, les accélérations sont mesurées à l'aide des accéléromètres et sont ensuite automatiquement transformées dans le domaine fréquentiel par le logiciel d'acquisition et de traitement So Analyzer®. Une fois les transformées de Fourier calculées, le spectre de fréquence multi-croisé obtenu en multipliant les spectres de fréquences des trois accéléromètres est calculé (Medina and Garrido, 2007). Dans ce spectre multi-croisé, devrait apparaître un pic à une certaine fréquence qui traduira la périodicité des réflexions multiples entre la surface d'impact et la face opposée de la structure. Une fois cette fréquence identifiée, et la vitesse de propagation des ondes de compression connue dans le matériau composant la structure, une épaisseur de la structure peut être estimée.

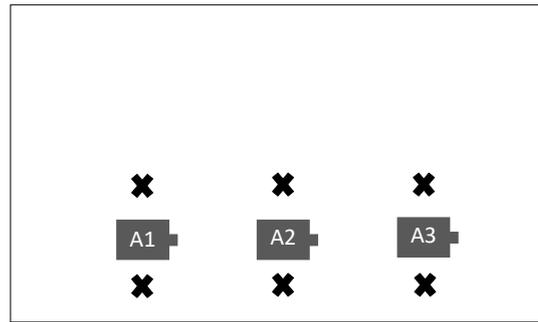


Figure 92. Emplacement des accéléromètres et des différents points d'impact

Dans les trois paragraphes précédents, on a pu estimer les vitesses moyennes de propagation des ondes mécaniques dans le béton. Les différentes valeurs des vitesses obtenues à partir des différents essais non destructifs réalisés sur les éprouvettes 16x32, ainsi que le mur 1 et le mur 3 composant la structure en forme de U sont résumées au Tableau 64. La moyenne des vitesses de propagation des ondes de compression est $V_{p_moy} = 4191,2 \pm 56,6m/s$.

Tableau 64. Récapitulatif des vitesses de propagation des ondes de compression obtenues selon les différents essais sur le béton

	Ep 16x32	Mur 25 cm	Mur 35 cm
Type d'essai	Pundit PL-200	Pundit PL-200	Pundit PL-200
$V_p [m/s]$	4183,9	4138,6	4251,1

En considérant cette vitesse moyenne de propagation des ondes de compressions égale à $4191,2m/s$, pour un essai Impact-Echo sur une structure sous forme de plaque en béton ayant une épaisseur de 25cm, le pic devrait être situé à la fréquence 7,9kHz. Les Figure 93 à Figure 98 présentent les spectres de fréquences multi-croisées obtenus en variant la position du point d'impact. Dans toutes ces figures on peut voir apparaître un pic distinct autour de 7,5kHz ou 7,6kHz. Ce qui permet d'estimer l'épaisseur du mur avec un pourcentage d'erreur inférieur à 3,7%. On peut remarquer que la position d'impact par rapport aux points de mesures n'influence pas la position du pic de fréquence. Le Tableau 65 présente le récapitulatif des paramètres et résultats obtenus à l'issue des essais Impact-Echo réalisées sur le mur de 25cm d'épaisseur. Différentes épaisseurs ont été calculées à partir des différentes vitesses de propagations obtenues à partir du Tableau 64. Ces épaisseurs varient de 26,1cm à 27,2cm ce qui représente des taux d'erreur de 4,6% à 8,8%. Les mêmes essais ont été réalisés sur les deux autres murs et les résultats sont présentés en Annexe 4.

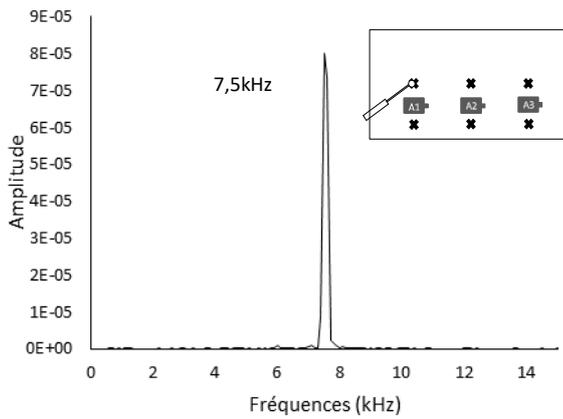


Figure 93. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessus du premier point de mesure sur le mur de 25cm d'épaisseur

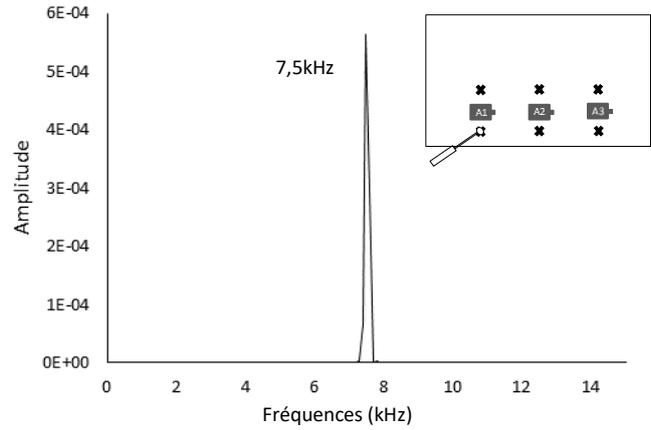


Figure 94. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessous du premier point de mesure sur le mur de 25 cm d'épaisseur

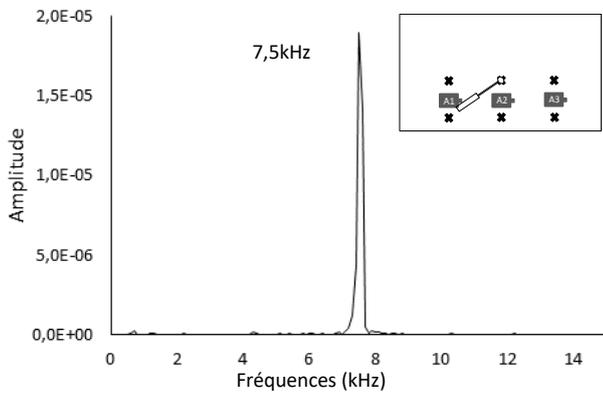


Figure 95. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessus du deuxième point de mesure sur le mur de 25 cm d'épaisseur

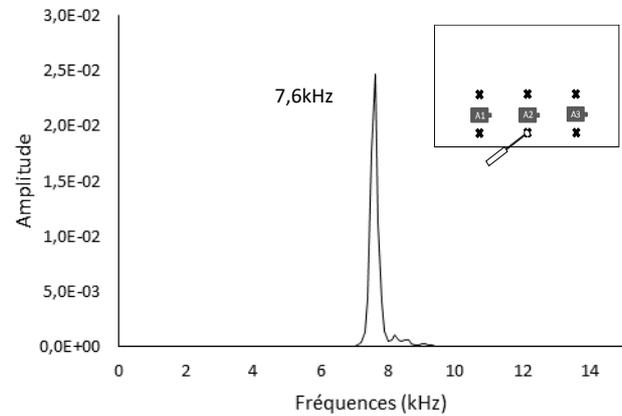


Figure 96. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessous du deuxième point de mesure sur le mur de 25 cm d'épaisseur

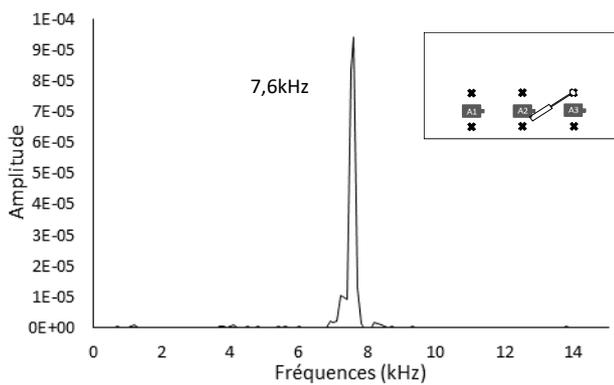


Figure 97. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessus du troisième point de mesure sur le mur de 25 cm d'épaisseur

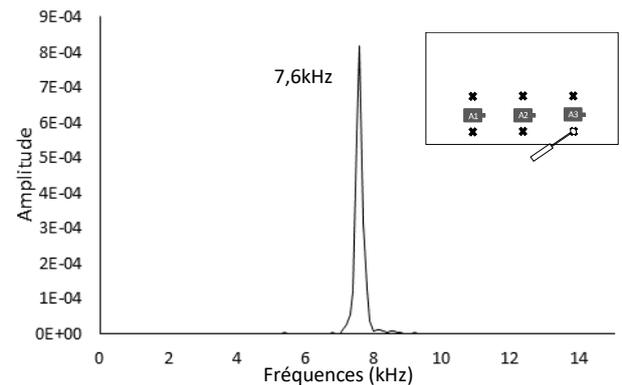


Figure 98. MSD calculée à partir d'un impact réalisé au-dessous du troisième point de mesure sur le mur de 25 cm d'épaisseur

Tableau 65. Récapitulatif des paramètres et résultats obtenues à l'issue des essais Impact-Echo réalisées sur le mur de 25cm d'épaisseur

Points	Ep 16x32cm V_{p-1}	Mur 25cm V_{p-2}	Mur 35cm V_{p-3}	f (kHz)	e_{1-1} (m)	e_{1-2} (m)	e_{1-3} (m)
Pt1 _{haut}	4183,9	4138,6	4251,1	7,5	0,268	0,265	0,272
Pt1 _{bas}	4183,9	4138,6	4251,1	7,5	0,268	0,265	0,272
Pt2 _{haut}	4183,9	4138,6	4251,1	7,5	0,268	0,265	0,272
Pt2 _{bas}	4183,9	4138,6	4251,1	7,6	0,264	0,261	0,268
Pt3 _{haut}	4183,9	4138,6	4251,1	7,6	0,264	0,261	0,268
Pt3 _{bas}	4183,9	4138,6	4251,1	7,6	0,264	0,261	0,268

IV.3.5. Validation de la simulation pour la première couche de la structure

Afin de vérifier la validité des simulations éléments finis développée aux chapitres précédents, nous avons tenté de superposer le spectre de fréquence obtenu suite à un essai Impact-Echo réalisé en laboratoire sur un mur d'épaisseur 25cm avec le spectre de fréquences obtenu suite à une simulation éléments finis réalisée sur une structure sous forme de plaque d'épaisseur 25cm. On peut constater à partir de la Figure 99, une superposition des deux MSD (expérimentale et numérique) aux pics à la fréquence 7,6kHz. Cette fréquence correspond à l'épaisseur du mur et de la plaque. Elle donne une estimation de l'épaisseur du mur à 25,2cm et 24,8cm pour les simulation expérimentale et numérique respectivement. Soit une estimation avec un taux d'erreur autour de 1%. On peut affirmer que cette simulation représente bien la réponse pouvant être obtenue à partir d'un essai Impact-Echo. Une différence considérable entre les amplitudes des deux spectres peut être observé. L'amplitude de la MSD numérique est jusqu'à 10^4 plus importante que la MSD expérimentale. Cette différence est expliquée par le fait que l'amplitude des simulations numériques dépend fortement d'un coefficient d'amortissement introduit dans la simulation ξ défini dans le Chapitre II et aussi du fait que l'amplitude du signal mesuré, dépend de l'amplitude du signal de l'impact lequel n'est pas le même dans la simulation et dans l'essai.

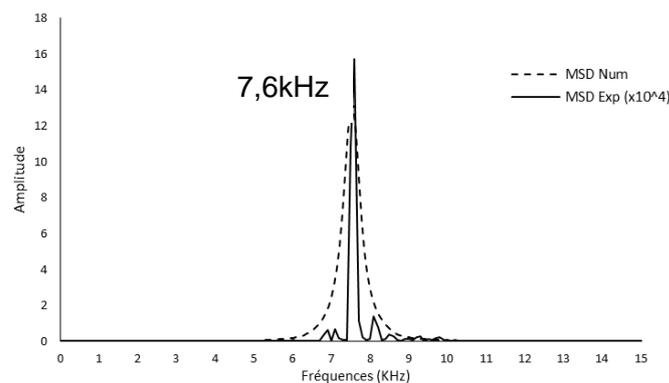


Figure 99. Superposition des spectres expérimentale et numérique

IV.4. Caractérisation de la couche de sol

Il s'agit dans cette partie d'étudier une structure composée de deux couches qui contient un défaut situé dans la deuxième couche. Cette deuxième couche va être assimilée à un matériau de remplissage. Le remplissage des anciens ponts est généralement composé d'un matériau de type sol ou sable. Dans l'optique de se mettre dans les conditions réelles de matériaux structurels, nous avons sélectionné comme deuxième couche de la structure en question de 'l'arène granitique', un sol disponible en laboratoire. Ce sol est connu comme étant un matériau fortement dissipatif vis-à-vis de la propagation des ondes mécaniques. Afin de minimiser la dispersion et donc de l'amortissement des ondes, ce sol sera fortement compacté. Pour optimiser ce compactage, nous avons réalisé l'essai Proctor. Le résumé du principe de fonctionnement de cet essai est présenté en Annexe 4.

IV.4.1. Essai Proctor

Le but de cet essai est de déterminer la teneur en eau (w) pour laquelle on atteint, pour un compactage donné, la densité sèche maximale du sol γ_d . Il existe une teneur en eau optimale permettant d'obtenir une densification maximale du squelette solide. Cette teneur est fonction de la surface spécifique des grains et de leur forme. Au-delà de cette teneur, la densité du sol diminue : une partie de l'énergie de compactage est reprise par l'eau, d'où un mauvais rendement énergétique du compactage. L'essai Proctor fournit donc une série de couples de valeurs (w, γ_d) que l'on porte sur un graphique orthogonal. La courbe obtenue est appelée diagramme PROCTOR (Annexe 4). Elle présente un maximum dont l'abscisse fournit la teneur en eau optimale recherchée, quelques fois dénommée « optimum PROCTOR ». La valeur typique de cette teneur en eau optimale se situe entre 10 % et 20 %, avec un intervalle maximal d'environ 5% à 40%. Les résultats des essais PROCTOR sont présentés en annexe. D'après cet essai l'optimum Proctor est atteint à 7,5% de teneur en eau.

IV.4.2. Mesure de la vitesse de propagation des ondes dans les éprouvettes de sol

Les essais réalisés au paragraphe IV.3.1 sont réitérés pour les éprouvettes de sol granitique afin de déterminer la vitesse de propagation dans le ce type de sol. Trois éprouvettes de sol de différentes épaisseurs sont considérées : 3,5cm, 5cm et 6,5cm. Un exemple de ces éprouvettes est représenté à la Figure 100. Le sol a été humidifié afin d'obtenir la teneur en eau de 7,5% conformément aux résultats obtenus avec l'essai PROCTOR. Ensuite, il a été compacté, dans un moule Proctor de diamètre égal à 10,16cm, afin d'optimiser la propagation des ondes de compression. En effet, compacter le sol permet une dissipation moins importante des ondes de compression dans ce dernier. Une fois les éprouvettes de sol granitique extraites du moule Proctor, on mesure le temps de parcours de l'onde comme indiqué sur la Figure 101 et par la suite la vitesse de propagation des ondes de compression est calculée. Trois répétitions ont été effectuées pour chaque éprouvette. Dans le Tableau 66 seule la moyenne des trois répétitions pour chaque épaisseur d'éprouvette est présentée. En raison du compactage effectué de manière manuelle, des différences dans les vitesses de propagation des ondes

dans les différentes éprouvettes sont prévisibles. Ce qui peut expliquer l'écart type important entre les vitesses.



Figure 100. Exemple d'éprouvette d'arène granitique humidifié à 7,5% et compactée dans le moule Proctor

Tableau 66. Vitesse de propagation dans l'éprouvette de sol de différentes épaisseurs

$e_{sol}[cm]$	$V_P[m/s]$	$V_{Pmoy}[m/s]$	$\sigma [m/s]$
3,5	723,8	611,2	98,1
5	544,4		
6,5	565,4		

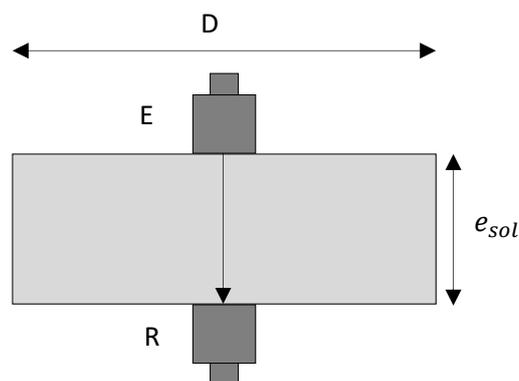


Figure 101. Mesure du temps de parcours de l'onde en configuration directe avec le Pundit

IV.5. Etude de la propagation des ondes dans un bicouche (béton/sol)

Les deux matériaux, le béton et l'arène granitique sont les matériaux choisis pour représenter respectivement la première et la deuxième couche de la structure à étudier. Malgré le caractère fortement dispersif du sol, nous avons pu observer la propagation des ondes de compression à travers les éprouvettes de sol de différentes épaisseurs. Cette vitesse reste néanmoins relativement faible, en particulier devant la vitesse de propagation des ondes de compression dans le béton.

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier la propagation des ondes dans le couple béton/Arène granitique. Afin de garantir cette propagation, il est nécessaire d'introduire une interface entre la couche de béton et la couche de sol qui assurerait le contact entre les deux matériaux. En effet, un mauvais contact entre les deux matériaux peut provoquer une rupture d'impédance qui inhiberait la transmission des ondes à la deuxième couche. Une couche de sol collé sur une des faces d'une éprouvette en béton 11x22 a été considérée comme l'interface de contact béton/sol (Figure 102). La mesure du temps de parcours de l'onde à travers l'éprouvette est réalisée avec le Pundit. Trois répétitions sont réalisées pour cette mesure et les résultats sont présentés au Tableau 67. La vitesse moyenne de propagation ($V_P = 3703,8 \pm 18,7$) de l'onde de compression dans l'éprouvette avec la face rugueuse est légèrement inférieure à la vitesse de propagation des ondes de compression (Tableau 64) dans l'éprouvette initiale 11x22.

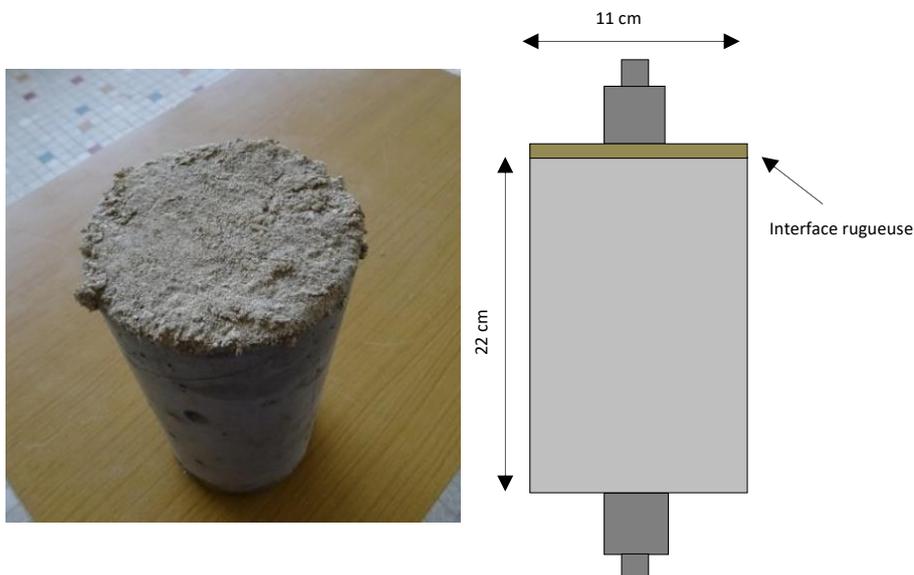


Figure 102. Couche de rugosité pour assurer le contact entre l'éprouvette en béton et l'éprouvette de sol

Tableau 67. Temps et vitesses de propagation calculés de l'onde P sur une éprouvette 11x22 avec une face de contact rugueuse

$D[cm]$	$t_p[\mu s]$	$V_{Pr}[m/s]$	$V_{Pmoy}[m/s]$	$\sigma [m/s]$	$V_{Pmoy}[m/s]$
22	59,4	3703,8	3703,8	18,7	3914,6
22	59,1	3722,5			
22	59,7	3685,1			

L'éprouvette composant la deuxième couche est une éprouvette en arène granitique d'épaisseur égale à 4,5 cm humidifiée à 7,5% et compactée dans un moule Portor de diamètre 15,2cm (Figure 103). Le temps de propagation des ondes de compression est aussi mesuré en moyennant trois répétitions et les résultats sont présentés au Tableau 68. La vitesse moyenne de propagation des ondes de compression est de $909,1m/s$.

Tableau 68. Temps et vitesses de propagation calculés de l'onde P sur une éprouvette de sol

$D[cm]$	$t_p[\mu s]$	$V_P[m/s]$	$V_{Pmoy}[m/s]$	$\sigma [m/s]$
4,5	49,6	907,2	909,1	3,2
4,5	49,3	912,8		
4,5	49,6	907,2		



Figure 103. Éprouvette d'épaisseur 4,5 cm constituant la deuxième couche

IV.5.1. Pundit bicouche

Une fois les vitesses de propagation des ondes de compression connues dans les deux matériaux, on mesure le temps de parcours à travers ces deux matériaux. La schématisation de cette configuration est présentée à la Figure 104. Trois répétitions pour cette mesure sont effectuées et les résultats des temps de parcours et des vitesses calculées sont présentés au Tableau 69. La vitesse moyenne de propagation des ondes de compression dans cette configuration est égale à $V_{P_moy} = 2131 \pm$

35,9m/s. En plus de déterminer la vitesse moyenne de propagation des ondes, cet essai permet de confirmer qu'une onde mécanique traverse l'interface et est mesurable.

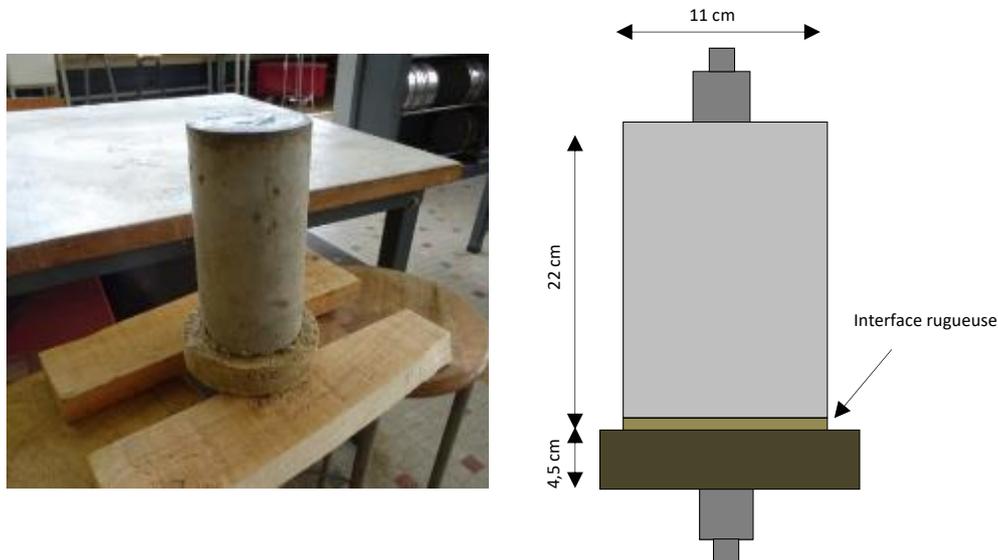


Figure 104. Disposition de l'éprouvette en béton sur l'éprouvette de sol

Tableau 69. Temps et vitesses de propagation calculés dans l'onde P pour une disposition de l'éprouvette en béton sur l'éprouvette de sol

$D[cm]$	$t_p[\mu s]$	$V_p[m/s]$	$V_{Pmoy}[m/s]$	$\sigma [m/s]$
0,265	122	2172,1	2131,8	35,9
0,265	126	2103,2		
0,265	125	2120		

IV.5.2. Impact-Echo

Une fois les vitesses de propagation des ondes de compression connues dans le béton et l'arène granitique, les essais Impact-Echo peuvent être réalisés afin d'estimer la position de l'interface entre le béton et le sol, et l'épaisseur totale de la configuration. En théorie, le pic correspondant à la profondeur de l'interface devrait être situé autour de 8,1 kHz et la fréquence correspondant à l'épaisseur de la configuration, calculée à partir de l'équation (II-30) devrait peut-être se situer autour de 4,7 kHz. La Figure 105 illustre la superposition des spectres de fréquences d'un essai Impact-Echo réalisé sur une éprouvette 22x11 posée sur du sable non compacté afin d'assurer une réflexion maximale des ondes de compression et une éprouvette béton posée sur une éprouvette sol d'épaisseur 4,5 cm (Figure 104).

Dans la Figure 105, on peut observer trois pics ; un pic autour de 5kHz, 8kHz et 9,5kHz. Le pic dominant le spectre de fréquence est celui situé autour de 8kHz. Ce pic correspond bien à la réflexion

des ondes à partir de l'interface entre l'éprouvette et la couche de sol. Le rapport des amplitudes du pic à 8kHz sur le pic à 5kHz est plus faible pour l'éprouvette bicouche. Le même constat est observé pour le rapport du pic à 8kHz sur le pic à 9,3kHz. Ce que l'on peut expliquer par le fait que l'on n'impacte pas au même point ou bien que l'un partie de l'onde est transmise au deuxième matériau.

On peut constater que le pic correspondant à l'épaisseur de la configuration entière n'apparaît pas sur le spectre de fréquence correspondant à la superposition de l'éprouvette de béton sur le sol. Cette absence peut être le résultat de deux hypothèses :

- La portion de l'onde réfléchiée est trop importante (73%) et par conséquent la portion transmise est faible (27%). L'onde a pu atteindre le fond mais la réflexion est trop faible pour atteindre la surface d'impact. En effet la portion de l'onde transmise du milieu 2 au milieu 1 lors du retour de l'onde vers la surface est de 27% de l'onde initialement transmise ce qui fait qu'uniquement 7% de l'onde initialement générée peut revenir à la surface, soit une portion trop faible pour être détectée
- En raison du caractère dispersif du sol pour les ondes mécaniques, l'onde transmise du milieu 1 au milieu 2 est trop faible pour atteindre le fond de la configuration

La dernière hypothèse est néanmoins invalide. En effet la propagation des ondes de compression à travers le sol a été constatée au paragraphe précédent en mesurant le temps de parcours de l'onde à travers la configuration. Si la propagation n'était pas possible, un temps de propagation n'aurait pas été obtenu.

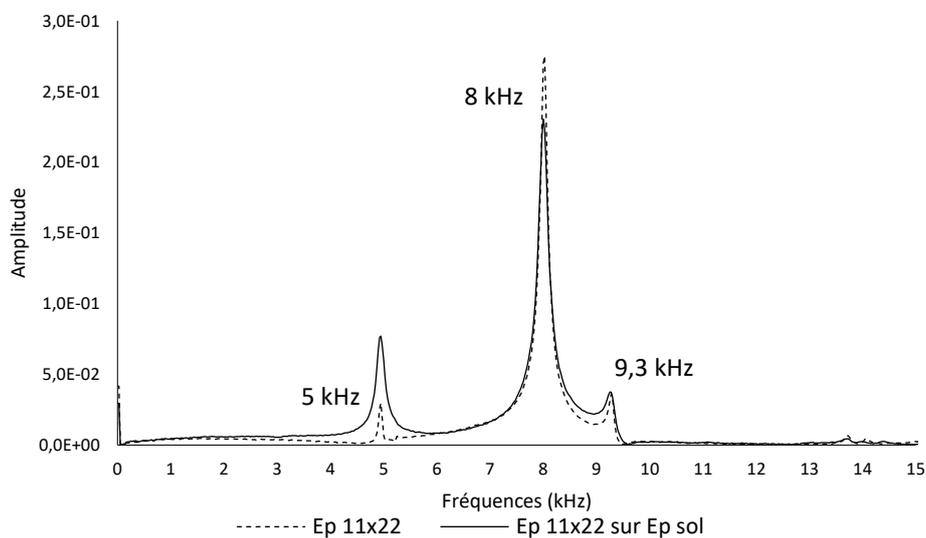


Figure 105 .Impact-Echo sur une éprouvette 11x22 posée sur sable et sur une éprouvette 11x22 placée sur une éprouvette de sol

IV.6. Caractérisation de la Brique en terre crue

En raison du caractère dispersif du sol, l'application de l'Impact-Echo sur une structure bicouche constituée d'un sol en tant que deuxième couche ne permet pas d'estimer l'épaisseur de la deuxième couche et par conséquent l'épaisseur de cette structure. Pour cela, nous avons relancé une campagne d'essais sur de la brique en terre crue en tant que matériau de remplacement de l'arène granitique. On souhaite garder un matériau réel et naturel. Ce matériau a été compacté artificiellement mais n'a pas subi d'autre transformation. Ce qui permet d'obtenir un indice des vides moins important que celui de l'arène granitique compactée. Les différents temps de parcours des ondes à travers les trois directions de la brique $5 \times 11 \times 22,5 \text{ cm}^3$ ont été mesurés afin d'estimer les vitesses de propagation des ondes dans ce matériau. Le Tableau 70 présente les mesures de temps et vitesses de propagation de l'onde P calculées sur la longueur, la largeur et l'épaisseur de la brique de terre crue, les différentes configurations sont présentées en Annexe.

La Figure 106, la Figure 107 et la Figure 108 représentent les spectres des fréquences obtenus suite à des essais Impact-Echo sur la longueur, la largeur et l'épaisseur de la brique. La Figure 106 présente un spectre de fréquence obtenu suite à un essai Impact-Echo réalisé afin d'estimer la longueur de la brique. Pour une épaisseur de 22,5 cm et une vitesse moyenne dans la direction de la longueur égale à 2011 m/s, le pic d'épaisseur devrait être situé autour de 4,3 kHz. Sur cette figure on voit apparaître un pic à cette fréquence. La Figure 107 illustre le spectre de fréquence obtenu à partir d'un essai Impact-Echo réalisé afin d'estimer la largeur de la brique. Pour une largeur égale à 11 cm et une vitesse moyenne de propagation des ondes de compression est égale 1749 m/s, le pic de fréquence devrait être situé autour de 7,6 kHz. Le pic autour de 2,9 kHz a une amplitude plus importante que le pic à 7 kHz. Or c'est ce dernier qui est indicateur de l'épaisseur. Le problème soulevé au chapitre II avec les simulations se trouve à nouveau dans ce cas expérimental aussi. Sur cette figure on peut voir apparaître deux pics ; un pic autour 2,9 kHz et autre pic autour 7 kHz. Enfin, la Figure 108 présente le spectre de fréquence obtenu à partir d'un essai Impact-Echo réalisé afin d'estimer l'épaisseur de la brique. Pour une épaisseur égale à 5 cm et une vitesse moyenne de propagation des ondes de compression égale à 2381 m/s, le pic de fréquence devrait être situé autour de 10,4 kHz. Sur cette figure on ne voit pas apparaître un pic à cette fréquence. Ce qu'on peut expliquer par le fait que l'épaisseur 5 cm est inférieure à la moitié de la longueur d'onde générée par impact ; or pour qu'on puisse obtenir le pic correspondant à cette épaisseur, il faut que l'épaisseur soit au moins supérieure à la moitié de la longueur d'onde minimale générée. Donc l'épaisseur de la brique doit être au moins supérieure à 7 cm.

Tableau 70. Temps et vitesses de propagation calculés de l'onde P sur la longueur, la largeur et l'épaisseur de la brique de terre crue

Configuration 1				
$D[cm]$	$t_p[\mu s]$	$V_P[m/s]$	$V_{Pmoy}[m/s]$	$\sigma [m/s]$
22,5	111,5	2017,9	2011,3	6,3
22,5	111,9	2010,7		
22,5	112,2	2005,3		
Configuration 2				
$D[cm]$	$t_p[\mu s]$	$V_P[m/s]$	$V_{Pmoy}[m/s]$	$\sigma [m/s]$
11	63,2	1740,5	1749,9	21,2
11	63,4	1735,0		
11	6,2	1774,2		
Configuration 3				
$D[cm]$	$t_p[\mu s]$	$V_P[m/s]$	$V_{Pmoy}[m/s]$	$\sigma [m/s]$
05	21,3	2347,4	2381,3	34,02
5	20,7	2415,5		
5	21	2380,9		

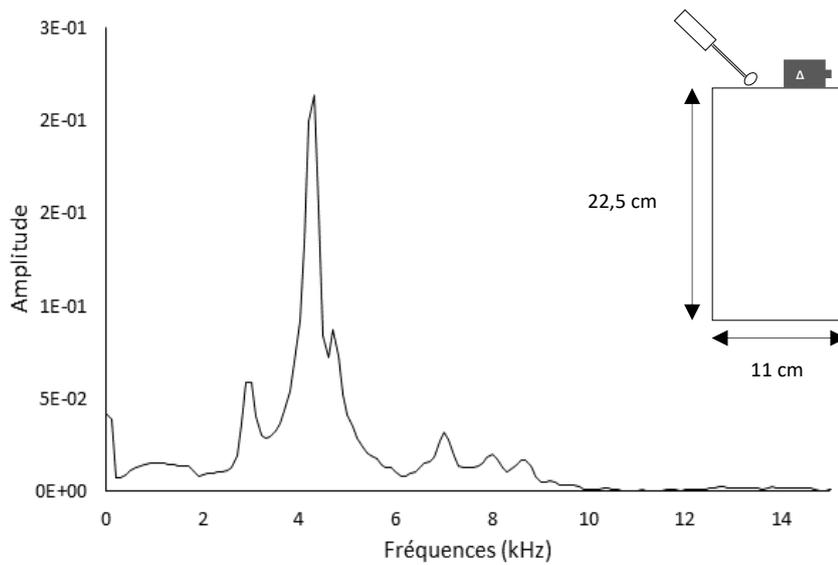


Figure 106. Spectre de fréquence obtenu à partir d'un essai Impact-Echo appliqué sur la longueur de la brique (Configuration 1)

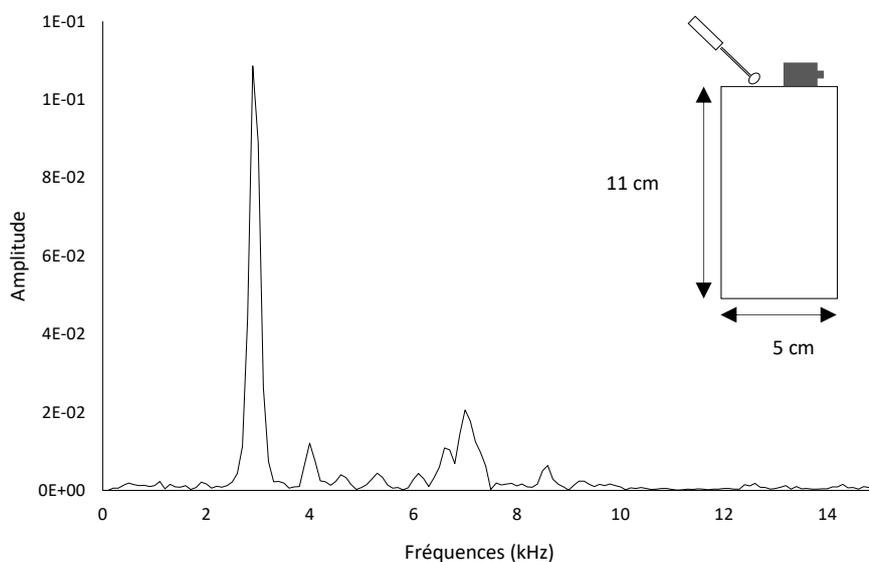


Figure 107. Spectre de fréquence obtenu à partir d'un essai Impact-Echo appliqué sur la largeur de la brique (Configuration 2)

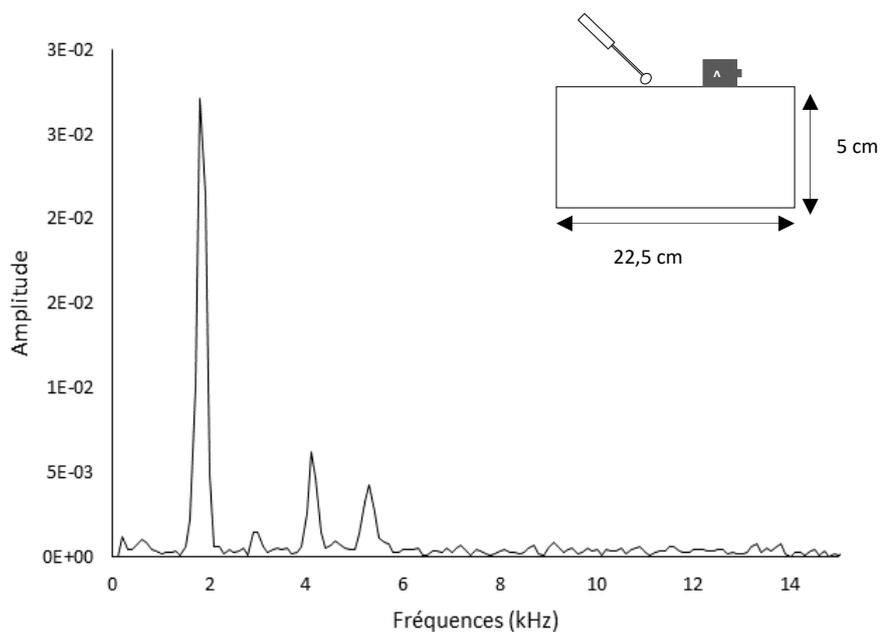


Figure 108. Spectre de fréquence obtenu à partir d'un essai Impact-Echo appliqué sur l'épaisseur de la brique (Configuration 3)

IV.7. Etude de la propagation des ondes dans un bicouche (béton/brique)

IV.7.1. Pundit bicouche

Tout comme au paragraphe IV.5.1, une fois les vitesses de propagation des ondes de compression connues dans les deux matériaux, on mesure le temps de parcours à travers ces deux matériaux. La schématisation de cette configuration est présentée sur la Figure 109. Trois répétitions pour cette mesure sont effectuées et les résultats des temps de parcours et des vitesses calculées sont présentés au Tableau 71. Cet essai, permet de confirmer la propagation des ondes dans cette configuration.

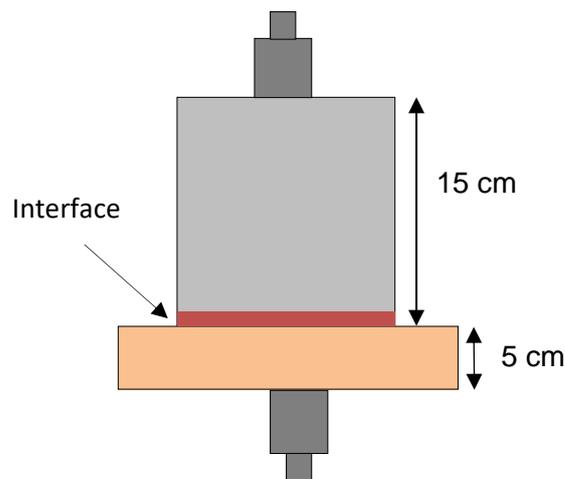


Figure 109. Disposition de la brique en terre crue sous l'éprouvette béton

Tableau 71. Temps et vitesses de propagation calculés de l'onde P sur une éprouvette de béton posée sur la brique de terre crue

D [cm]	t_p [μ s]	V_p [m/s]	$V_{p\text{moy}}$ [m/s]	σ [m/s]
20	65,3	3062,8	3067,5	16,9
20	64,8	3086,4		
20	65,5	3053,4		

IV.7.2. Impact-Echo

Une fois les vitesses de propagation des ondes de compression connues dans le béton et dans la brique en terre crue, les essais Impact-Echo peuvent être réalisés afin d'estimer la position de l'interface entre le béton et la brique en terre crue, et l'épaisseur totale de la configuration. Figure 110 illustre la configuration en question. Une éprouvette en béton $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ est placée sur deux briques d'épaisseur totale de 10 cm. L'interface entre l'éprouvette en béton et la brique est réalisée avec de la vaseline et les briques sont fixées en humidifiant les surfaces de contact entre les deux briques. En théorie, pour cette configuration, le pic correspondant à la profondeur de l'interface devrait être

situé autour de 11,9kHz pour l'éprouvette en béton $15 \times 15 \times 15 \text{cm}^3$ et la fréquence correspondant à l'épaisseur de la configuration (Béton + terre crue), calculée à partir de l'équation (I-16) devrait peut-être se situer autour de 6,4kHz.

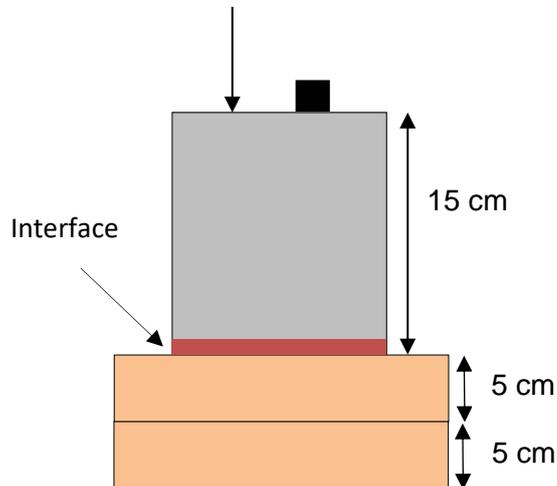


Figure 110. Disposition des briques en terre crue par rapport l'éprouvette béton

La Figure 111 présente le spectre de fréquence obtenu suite à l'essai. On peut constater l'existence d'un pic correspondant à la réflexion des ondes de compression à partir de l'interface entre l'éprouvette en béton et les deux briques. Ce pic apparaît autour de la fréquence 11,9kHz soit avec un taux d'erreur de 1,2%. Le pic correspondant à la réflexion des ondes de compression à partir de la face inférieure du couple de briques devrait être situé autour de 6,4kHz. Ce pic n'apparaît pas sur le spectre de fréquence. Cette absence peut être expliquée par trois hypothèses.

- Premièrement, la portion de l'onde réfléchi est trop importante et par conséquent la portion transmise est faible. Donc l'onde n'est pas assez énergétique pour atteindre le fond de la configuration.
- Ou bien l'onde a pu atteindre le fond mais la réflexion est trop faible pour atteindre la surface d'impact.
- Ou bien l'interface est majoritairement réfléchissante et il n'y pas d'onde transmise à la brique en terre crue.

La troisième hypothèse est néanmoins peu probable, en effet la propagation des ondes de compression à travers la terre crue a été constatée au paragraphe précédent en mesurant le temps de parcours de l'onde à travers la configuration. Si la propagation entre le béton et la brique en terre crue n'était pas possible, ce temps n'aurait pas été obtenu. Le coefficient de réflexion entre le béton et la terre crue est de $R = 0,32$. La majorité de l'onde est bien transmise au second milieu (0,68). Par contre le retour de l'onde du milieu 2 au milieu 1 n'est assuré qu'à hauteur de 0,22. Par conséquent

L'onde n'est pas assez énergétique pour être détectée à la surface de mesure. A titre de rappelle une onde ne peut être détectée que si $|R| > 0,24$.

Les Figure 111 et Figure 112 illustrent les spectres de fréquence issus d'essais Impact-Echo réalisés sur trois configurations :

- Une première configuration notée Conf₁ qui consiste en un essai Impact-Echo réalisé sur une éprouvette en béton 15x15x15 sur deux briques en terre crue,
- Une deuxième configuration notée Conf₂ qui consiste en un essai Impact-Echo réalisé sur une éprouvette en béton 15x15x15 sur une seule brique en terre crue,
- Une troisième configuration notée Conf₃ qui consiste en un essai Impact-Echo réalisé sur une éprouvette en béton 15x15x15 posée directement sur le sable non compacté afin d'assurer une réflexion maximale des ondes de compression.

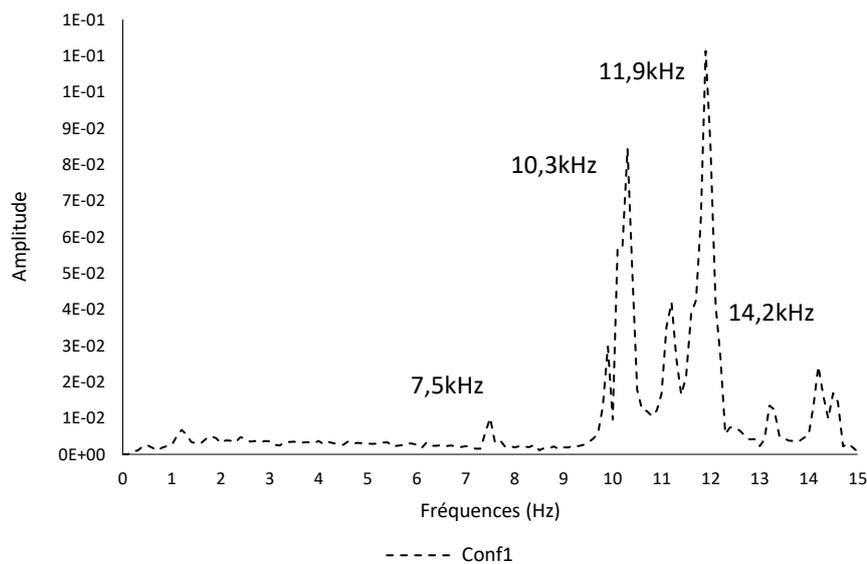


Figure 111. Impact-Echo sur une éprouvette en béton 15x15x15 cm³ sur deux briques de terre crue

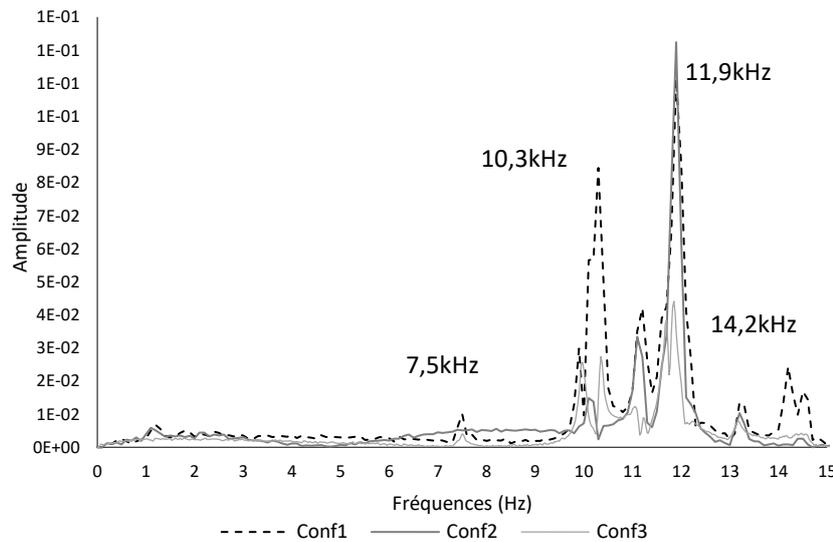


Figure 112. Impact-Echo sur une éprouvette en béton $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ sur une brique de terre crue (Conf2) et sur 2 briques en terre crue (Conf1) et posée directement sur un sable non compacté (Conf3)

A partir de la Figure 112 on peut constater que l'introduction de la première brique en terre crue (Conf₂) modifie le comportement du spectre de fréquence par rapport à l'éprouvette posée directement sur le sable (Conf₃). L'amplitude du pic correspondant à la réflexion des ondes à partir de l'interface entre l'éprouvette en béton et la brique en terre crue devient plus important par rapport aux autres pics présents dans le spectre de fréquence. Les pics autour des fréquences 10kHz et 10,3kHz pour le spectre de fréquence de la Conf₃ disparaissent et sont remplacés par un pic à la fréquence 10,1kHz. Il en est de même pour les deux pics autour de 11,8kHz qui sont remplacés par un pic à la fréquence 11,9kHz. Seule l'augmentation, la diminution ou la variation du nombre de pics les uns par rapport aux autres peut être discutée. En effet, l'amplitude des pics varient avec chaque impact car la répétabilité dans ce type d'essai ne peut être garantie. L'introduction de la deuxième brique en terre crue (Conf₁) modifie une nouvelle fois le comportement du spectre et le rapport entre les pics aux fréquences respectives de 11,9kHz et 10,3kHz diminue considérablement. La variation des spectres de fréquences d'une configuration à une autre suggère que la brique en terre crue (soit le matériau composant la deuxième couche) et le nombre de briques considéré lors de l'essai (soit la géométrie de la deuxième couche) influence le comportement de ce dernier. Même si les pics aux fréquences qui correspondent à l'épaisseur de la brique ou des deux briques n'apparaissent pas sur le spectre de fréquence, la variation de ce dernier en présence de ces briques suggère que l'onde de compression est bien transmise en arrivant à l'interface entre les deux éprouvettes en béton $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ et la ou les briques en terre crue. Ce qui nous ramène à notre première hypothèse qui suggère que l'onde traverse bien l'interface et atteint bien le fond de la configuration mais l'onde est trop faible pour revenir à la surface de mesure.

IV.8. Discussion

Les différents essais présentés dans ce chapitre ont été réalisés indépendamment des simulations numériques des chapitres précédents. Nous cherchons donc une solution qui permettrait d'exploiter les essais expérimentaux à l'aide des résultats, à savoir, les relations obtenues à l'issue des simulations numériques au Chapitre III. Cette démarche permettrait de valider la simulation numérique. L'inconvénient majeur rencontré lors de la réalisation des essais Impact-Echo de la campagne expérimentale c'est de ne pas pouvoir assurer une répétabilité du point de vue de la force de frappe ainsi que la vitesse de frappe. En effet, les ondes mécaniques ont été générées manuellement à l'aide du dispositif présenté au paragraphe I.6.2.1. Contrairement aux simulations numériques dont on dispose, où le signal d'entrée est contrôlé, et l'amplitude ainsi que son contenu fréquentiel sont connus. Ces paramètres gouvernent l'amplitude de l'impact, et donc l'amplitude des réponses temporelles et fréquentielles mesurées et, influent par conséquent, directement sur les variables de sorties présentées au paragraphe III.4. Afin de s'affranchir de ce problème, il faut normaliser l'amplitude des mesures de la campagne expérimentale afin de pouvoir exploiter les relations issues du plan d'expérience. L'objectif est de pouvoir ramener les courbes expérimentales à des courbes que l'on aurait obtenues si l'on avait excité les systèmes avec un signal de même amplitude que dans la simulation. Ici nous allons ajuster les amplitudes et non le contenu fréquentiel.

IV.8.1. Normalisation des données expérimentale

On dispose des mesure temporelles et fréquentielle des campagnes d'expérimentations et des simulations numériques. Ces mesures, et en particulier les mesures fréquentielles dépendent de la structure sur laquelle l'essai est réalisé (géométrie, matériaux ..). On recherche un coefficient unique par lequel on peut multiplier les amplitudes des différentes mesures expérimentales pour se ramener aux résultats d'une excitation similaire à la configuration de la simulation numérique. Comme les essais expérimentaux et la simulation numérique n'ont pas été réalisés sur les structures de mêmes formes, et que la forme peut jouer sur l'amplitude des pics, le choix de l'amplitude de normalisation ne se porte pas sur l'amplitude d'un pic du spectre. C'est pourquoi ce choix va plutôt se baser sur la distribution des amplitudes, et donc sur les caractéristiques de cette distribution.

Les Figure 113 et Figure 114 montrent les valeurs des amplitudes avec leurs distributions cumulées. A la Figure 113 on voit dans l'exemple de la simulation numérique 4 (Tableau 37), qu'on a une croissance régulière de la courbe cumulée. Cela signifie que chaque valeur possible d'amplitude est représentée un nombre à peu près égal de fois. Par contre on n'observe pas la même chose dans l'expérimentation (Figure 114). En effet il y a beaucoup de fréquences avec de faibles amplitudes. Si on ne représente que les amplitudes supérieures à 0,0015dB on obtient la courbe de la Figure 115. Cette courbe paraît du même genre que celle de la Figure 113. Cette similitude pose le problème des différents filtres subis par les mesures liées à la chaîne de mesure mais aussi liés aux choix expérimentaux. Ces filtres peuvent supprimer des mesures d'amplitude inférieure à un certain niveau ou supérieur à un autre niveau. Donc si pour les simulations on choisit comme norme le centile à

30%, l'amplitude expérimentale correspondante ne sera pas forcément le centile à 30%, à cause des différents filtres sur les amplitudes de la chaîne de mesure.

Le problème est donc de savoir quelle amplitude choisir et comment s'assurer que l'on transforme la distribution des amplitudes obtenues expérimentalement de façon à avoir une distribution approchant globalement les courbes obtenues à partir des simulations numériques. La Figure 115 montre que l'on n'a que 40 valeurs environ sur les 154 initiales qui seraient retenues si on appliquait un tel filtre. On pourrait aussi appliquer un filtre passe haut et dans ce cas on ne garde que les 114 premières valeurs. Le problème est que l'on ne sait pas quelles sont les amplitudes représentatives de la structure. Cela nous conduit à ne pas appliquer de filtre sans étude plus poussée, ce qui n'est pas l'objet de ce travail. Nous allons donc tester tous les centiles possibles sur les mesures expérimentales.

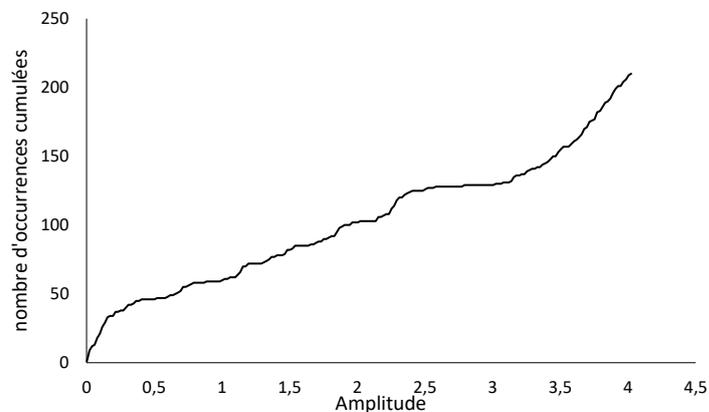


Figure 113. Fréquences cumulées des amplitudes de la simulation 4

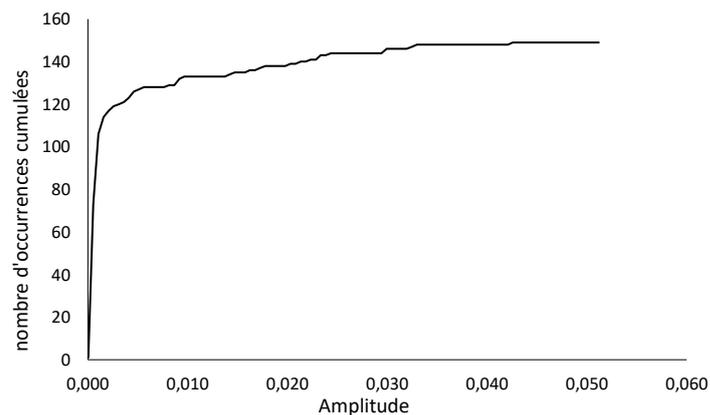


Figure 114. Fréquences cumulées des amplitudes de l'essai 1 béton/terre crue (Essai 35)

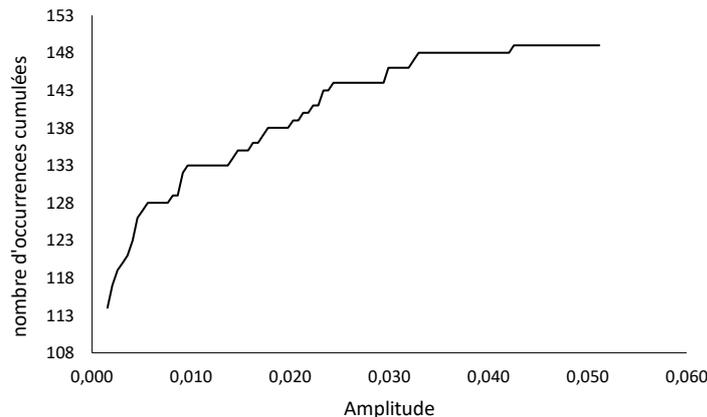


Figure 115. Fréquences cumulées des amplitudes de l'essai 1 béton/terre crue, avec une coupure (Essai 35)

Maintenant il faut choisir le centile que l'on prendra pour normaliser les simulations. On dispose de 36 simulations numérique (Tableau 37), et chaque simulation fournit 4 distributions d'amplitudes car les mesures réalisées en 4 points différents (Figure 36), chacune correspondant à une distance au point d'impact. On regarde donc les amplitudes simulées sur les 4 points de mesures. On choisit de travailler avec les centiles à 5%, 10%, 20% et 30%. Ce sont des centiles assez faibles, puisqu'on veut éviter les pics trop caractéristiques de la structure. Néanmoins cette valeur de l'amplitude caractérise la répartition et de ce fait caractérise toute la courbe. Dans un premier temps, il faut regarder comment utiliser les résultats issus des 4 points de mesures. De façon à pouvoir appliquer ces résultats aux données expérimentales, on va regarder la loi qui donne le centile en fonction de la distance, puisque la distance du point de mesure n'est pas la même pour toutes les expérimentations. On choisit comme loi une loi linéaire. Le Tableau 72 donne les moyennes sur les 36 simulations des valeurs caractéristiques de cette loi. La moyenne de 0,86 du coefficient de corrélation pour le centile 5% nous montre que la loi linéaire ne s'adapte pas correctement sur un certain nombre de simulations. Cela nous fait éliminer le centile à 5%. Le centile qui a le meilleur ajustement de sa valeur en fonction de la distance sur une loi linéaire est le centile à 30%. L'écart type sur la moyenne ou sur le terme constant est aussi très élevé. Cela nous amène à garder le centile à 30%, pour lequel la loi linéaire en fonction de la distance est la meilleure.

Tableau 72. Valeur caractéristique de la loi donnant les centiles choisis en fonction de la distance du point de mesure à l'impact

Centile	Pente		Terme constant		Coefficient de corrélation	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
5%	-0,132	0,140	0,045	0,025	-0,855	0,095
10%	-0,505	0,364	0,132	0,070	-0,932	0,039
20%	-1,887	1,347	0,355	0,200	-0,938	0,024
30%	-5,446	3,596	1,016	0,562	-0,951	0,025

La méthode retenue pour normaliser les essais expérimentaux est donc la suivante : On normalise avec le centile à 30% les réponses temporelles mesurées pour les simulations numériques. Ensuite on normalise avec un centile à déterminer (dépendant du dispositif de mesure) les mesures obtenues à partir de la campagne expérimentale. Cela permettra de trouver un coefficient par lequel multiplier les mesures pour pouvoir appliquer les relations trouvées au chapitre 3 aux essais expérimentaux de ce chapitre. La méthode choisie est donc la suivante : On commence par transformer les spectres de fréquences des simulations numériques en graphique représentant les amplitudes en fonction de leur distribution cumulée. On normalise donc cette distribution avec le centile à 30% les réponses temporelles mesurées. Cette transformation est illustrée à la Figure 116. Deux problèmes surgissent. La tentation de prendre la moyenne de $A(30\%)$ sur les 36 simulations numériques est grande mais vu que l'écart type sur la pente et le terme constant qui traduisent la relation entre les amplitudes des 4 points de mesure est élevée, on peut penser que la moyenne sera peu représentative des 36 simulations. Comme l'objectif est exploratoire, il s'agit de trouver comment comparer l'expérimentation et la simulation. On choisit de traiter les 36 possibilités de $A(30\%)$. En effet, certains points vont être de toute façon proches de la moyenne, une possibilité qui sera traitée, et d'autres points seront plus éloignés.

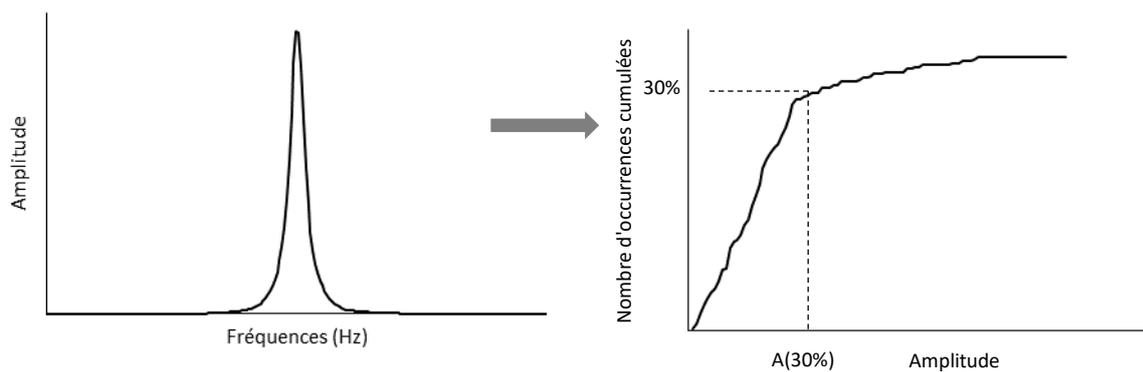


Figure 116. Spectre de fréquence d'une simulation numérique et sa transformation en graphique d'amplitudes en fonction de leurs distributions cumulées

Ensuite, nous allons effectuer la même démarche pour les spectres de fréquences obtenus à l'issue des mesures expérimentales (Figure 117). Or nous ne savons pas quel centiles $N\%$ choisir. C'est pourquoi on va tenter de tester 11 centiles différents (5%, 10%, 20%, ..., 100%). Ce choix des centiles permet de couvrir un large spectre de possibilités.

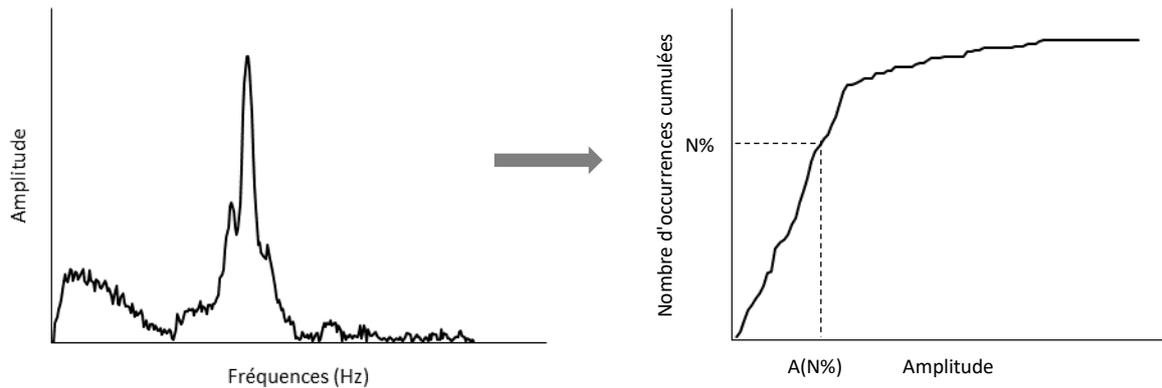


Figure 117. Spectre de fréquence d'une mesure expérimentale et sa transformation en graphique d'amplitudes en fonction de leurs distributions cumulées

Si finalement aucune ne donne de résultat satisfaisant, on pourra conclure qu'on ne peut pas se passer d'un système d'impact instrumenté (marteau instrumenté par exemple). En effet, la méthode Impact-Echo étant basé traditionnellement sur l'étude des spectres de fréquences issu de la transformé de Fourier, il n'est pas nécessaire de mesurer le signal de l'impact. Dans notre cas, cela s'avérerait plus pratique et simplifierait la normalisation et par conséquent l'interprétation des essais. On détermine alors 36 coefficients, chacun correspondant à une configuration de simulation numérique. On applique 36 fois les relations trouvées pour chacun des essais expérimentaux, ce qui va nous ramener à 36 possibilités pour e_1 , R , ξ et d pour chaque configuration expérimentale. Pour chacun des 36 résultats on calcule l'écart relatif par rapport à la configuration de simulation. On retient la solution qui a l'écart relatif le plus faible. Le centile % à choisir, est donc déterminé par une calibration initiale sur une configuration expérimentale connue. Cette démarche est résumée dans la Figure 118.

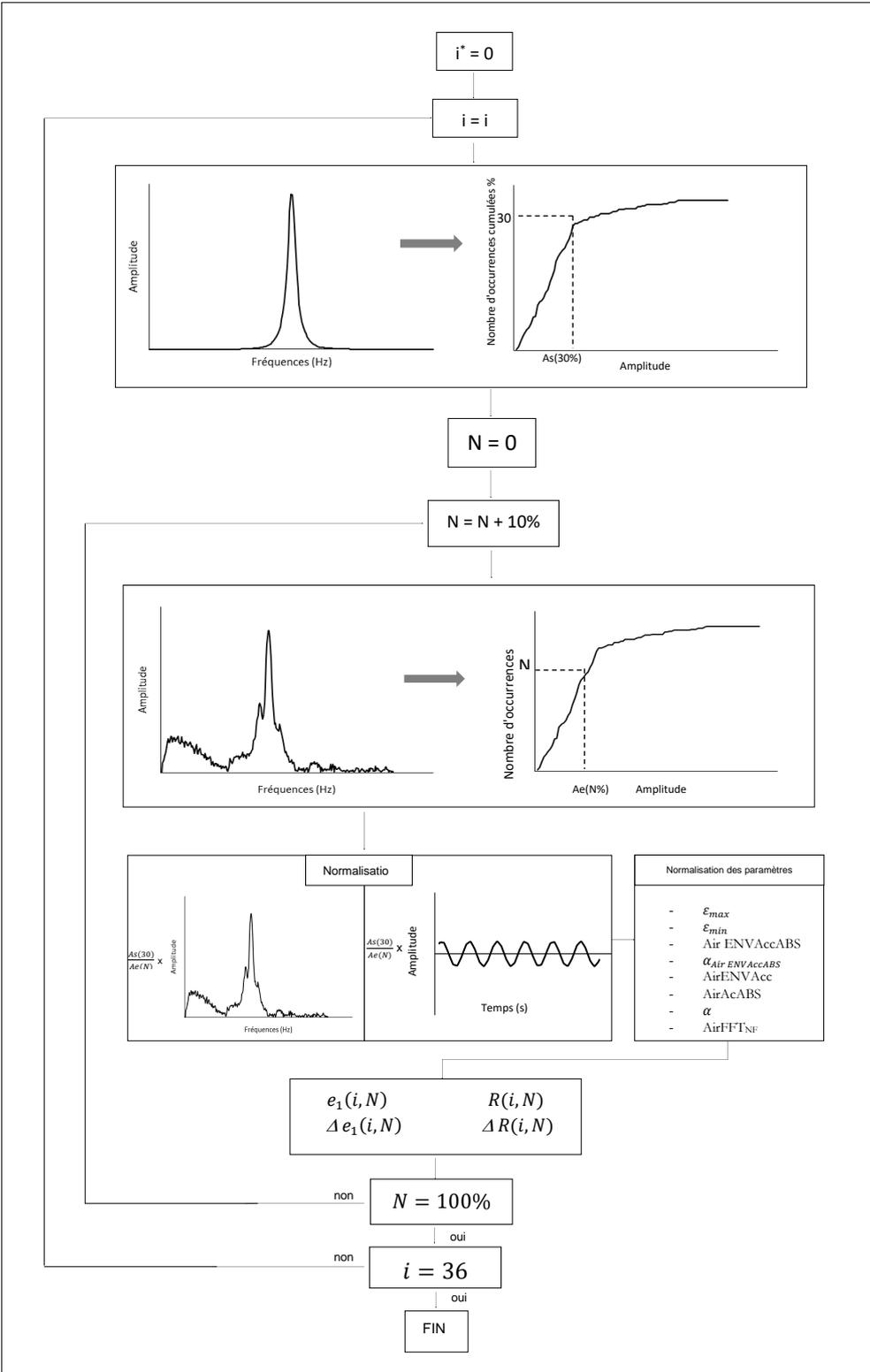


Figure 118. Organigramme résumant la méthode de normalisation

*i : numéro de la simulation numérique

IV.8.2. Détermination des facteurs d'entrée e_1 et R

Dans le chapitre précédent, 4 facteurs d'entrée ont été introduit. L'épaisseur du premier milieu e_1 , le coefficient de réflexion R , le coefficient d'amortissement ξ et la profondeur du défaut d . Ici seuls les deux premiers facteurs peuvent être déterminés. En effet, le coefficient d'amortissement ξ est facteur purement numérique qui intervient dans le calcul de l'amortissement de Rayleigh. La campagne expérimentale est réalisée sur des configurations monocouches ou bicouches ne contenant pas de défaut par conséquent la profondeur du défaut d elle aussi ne peut pas être déterminée. Les paramètres géométriques et de matériaux des différentes simulations ainsi que les variables de sorties obtenues à l'issue de ces essais sont présentées en Annexe 4.

Pour la détermination de l'épaisseur de la première couche e_1 des différents essais expérimentaux, le minimum dans les taux d'erreur est d'environ 60%, obtenu par des centiles à 90% et 100%. Ces centiles peuvent correspondent donc aux pics, qui peuvent être représentatifs d'une épaisseur e_1 , mais aussi de la structure. Pour l'estimation du coefficient de réflexion R pour les différents essais, le minimum d'environ 17% est obtenue avec le centile à 100% c'est à dire avec le pic d'amplitude.

Les Tableau 73 et Tableau 74 présentent les taux d'erreurs moyens dans l'estimation de l'épaisseur de la première couche e_1 et le coefficient de réflexion R obtenus pour différent centiles et ce pour chaque essai expérimental. Ces données ont été obtenues en appliquant la méthode décrite dans le paragraphe précédent pour différents centiles allant de 5% à 100%. On peut constater à partir des tableaux ci-dessous que les relations obtenues au chapitre précédent et appliquées aux essais expérimentaux ne permet pas de retrouver les facteurs d'entrée à savoir l'épaisseur de la première couche e_1 et le coefficient de réflexion R . En effet, les taux d'erreur moyen sont très importants et les facteurs estimés ne reflètent pas les paramètres des essais.

Tableau 73. Récapitulatif des taux d'erreurs moyens dans l'estimation de e_1 obtenues partir des différents centiles

Essai	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Essai1	455,9	382,6	310,4	266,5	237,4	205,8	190,7	170,0	157,5	139,6	125,7
Essai2	623,4	464,8	342,6	289,7	257,2	222,7	196,2	174,3	157,2	142,6	124,1
Essai3	1695,1	1045,1	613,7	422,0	328,2	262,5	230,2	210,6	182,2	150,1	135,2
Essai4	636,5	506,7	382,0	343,7	294,2	254,9	223,6	184,4	169,5	162,4	145,7
Essai5	987,6	790,1	558,2	422,7	345,2	271,5	226,5	170,2	135,0	88,4	64,5
Essai6	2772,5	2086,7	1528,9	1272,1	1007,1	870,0	757,9	638,0	501,0	394,3	174,2
Essai7	1236,3	927,0	646,1	501,3	429,8	361,9	300,8	261,7	224,2	183,6	126,7
Essai8	863,3	666,4	470,2	387,5	332,1	296,2	268,3	247,8	214,3	174,3	116,8
Essai9	2824,2	2095,5	1507,5	1152,6	997,7	893,6	767,3	627,9	432,1	286,6	165,0
Essai10	1107,9	614,5	448,7	323,4	264,2	186,2	152,1	118,2	79,2	60,0	106,3
Essai11	1354,7	935,9	653,3	483,3	383,1	301,3	227,7	162,6	108,6	87,0	74,1
Essai12	298,7	270,1	224,8	200,6	182,1	165,6	155,6	148,4	142,0	133,8	127,1
Essai13	479,0	327,5	276,8	247,3	227,6	207,5	189,2	173,7	161,7	140,7	130,2
Essai14	683,3	510,6	341,0	293,3	267,8	247,4	225,9	203,5	175,8	155,5	130,4
Essai15	1263,4	1103,6	747,4	623,6	527,2	447,0	384,0	339,4	264,9	166,4	57,6
Essai16	987,6	790,1	558,2	422,7	345,2	271,5	226,5	170,2	135,0	88,4	64,5
Essai17	8040,4	5260,6	3541,1	2642,3	2136,4	1843,7	1590,3	1382,2	1187,9	945,0	78,9
Essai18	1712,4	1140,8	763,2	568,8	467,6	411,2	340,9	273,7	233,7	190,4	58,5
Essai19	415,8	264,8	180,5	138,5	123,4	110,6	97,4	86,6	82,0	78,2	70,1
Essai20	1695,1	1045,1	613,7	422,0	328,2	262,5	230,2	210,6	182,2	150,1	135,2
Essai21	5793,0	3652,1	2319,8	1635,0	1331,7	1021,9	799,4	624,0	406,9	233,8	89,6
Essai22	1354,7	935,9	653,3	483,3	383,1	301,3	227,7	162,6	108,6	87,0	74,1
Essai23	624,3	423,4	253,0	227,4	166,3	138,3	119,7	101,4	81,9	75,2	68,6
Essai24	958,6	654,7	533,0	448,8	378,2	272,8	213,7	154,2	125,0	105,9	80,1
Essai25	1128,8	793,3	546,4	444,0	341,1	295,0	274,8	252,9	232,2	209,5	157,1
Essai26	1767,2	2039,2	1423,4	1049,5	845,6	688,9	542,7	435,9	343,7	249,0	133,1
Essai27	15509,4	8675,5	4304,7	2349,4	1444,1	1155,3	850,6	632,3	496,6	346,0	190,3
Essai28	18252,6	10233,5	5814,9	4032,1	4032,1	2940,7	1121,6	679,9	520,8	344,3	207,8
Essai29	63977,6	41759,6	24439,8	17385,4	12757,1	9522,7	5838,4	3516,3	2190,1	1349,3	344,3
Essai30	88897,7	54874,3	36450,2	27532,5	22286,2	17838,4	13734,6	10371,7	5330,5	2805,0	348,6
Essai31	98834,7	64788,3	43970,4	35780,7	29859,8	25318,0	21933,2	19129,2	16308,5	13394,5	221,7
Essai32	63582,4	46197,5	31549,0	24657,9	20973,9	17680,7	14826,5	12463,9	10089,1	6939,9	195,7
Essai33	57667,1	40736,0	27088,6	20249,5	15694,4	11846,3	8173,5	5593,3	3865,9	2183,2	434,4
Essai34	93659,0	60446,9	36461,3	27485,1	21565,6	17135,2	13038,7	9497,9	5509,0	3217,2	500,6
Essai35	1441,5	1084,7	767,4	603,3	508,2	448,1	396,3	367,9	350,8	314,3	289,3
Essai36	1870,0	1416,5	1039,4	827,8	684,6	572,0	500,2	451,6	401,3	339,6	289,5

Tableau 74. Récapitulatif des taux d'erreurs moyens dans l'estimation de R obtenues partir des différents centiles

Essai	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Essai1	512,75	403,95	296,82	231,68	188,49	141,48	119,18	88,36	69,90	43,28	22,73
Essai2	871,78	602,31	394,60	304,70	249,62	190,85	145,81	108,70	79,63	54,73	23,41
Essai3	581,10	348,35	193,87	125,26	91,65	68,13	56,55	49,56	39,39	27,89	22,56
Essai4	146,26	113,78	82,58	72,98	60,60	50,78	42,94	33,20	29,42	27,63	23,45
Essai5	402,69	321,21	225,51	169,58	137,63	107,21	88,62	65,42	50,86	31,66	21,79
Essai6	885,06	658,25	473,75	388,82	301,19	255,83	218,75	179,05	133,78	98,50	25,69
Essai7	608,69	445,58	297,41	221,01	183,30	147,49	115,27	94,59	74,87	53,45	23,44
Essai8	350,76	263,85	177,23	140,70	116,26	100,40	88,11	79,04	64,27	46,60	21,21
Essai9	428,80	317,94	228,47	174,48	150,90	135,07	115,85	94,71	64,85	42,71	24,21
Essai10	214,51	135,62	109,09	89,05	79,59	67,12	61,17	53,91	42,69	37,06	20,34
Essai11	1354,69	935,90	201,93	149,50	118,57	93,36	70,64	50,59	33,89	27,23	23,26
Essai12	214,03	181,92	131,00	103,89	83,05	64,54	53,36	45,43	38,11	28,80	21,31
Essai13	212,00	129,30	101,63	85,55	74,78	63,83	53,83	45,46	38,84	27,39	21,62
Essai14	117,91	87,56	57,74	49,35	44,86	41,27	37,50	33,58	28,69	25,11	20,71
Essai15	400,35	350,19	238,35	199,47	169,20	144,03	124,23	110,24	86,85	55,92	21,77
Essai16	402,69	321,21	225,51	169,58	137,63	107,21	88,62	65,42	50,86	31,66	21,79
Essai17	557,00	369,89	254,16	193,66	159,61	139,91	122,85	108,85	95,77	79,41	21,12
Essai18	572,31	368,62	234,08	164,83	128,76	108,67	83,60	59,65	45,42	29,99	17,03
Essai19	115,10	74,23	51,43	40,05	35,97	32,51	28,94	26,05	24,78	23,74	21,56
Essai20	581,10	348,35	193,87	125,26	91,65	68,13	56,55	49,56	39,39	27,89	22,56
Essai21	713,54	454,12	292,67	209,68	172,92	135,39	108,42	87,20	60,85	39,88	22,41
Essai22	418,34	289,13	201,93	149,50	118,57	93,36	70,64	50,59	33,89	27,23	23,26
Essai23	310,15	206,39	118,36	105,14	73,57	59,09	49,49	40,11	29,97	26,52	23,10
Essai24	259,23	177,86	145,29	122,75	103,82	75,60	59,79	43,91	36,03	30,91	24,01
Essai25	175,00	122,73	84,25	68,30	52,27	45,10	41,94	38,59	35,30	31,78	23,61
Essai26	636,50	514,25	355,73	259,46	206,97	166,64	129,01	101,48	77,78	53,39	23,57
Essai27	18218,76	9630,49	4137,71	1680,47	881,13	683,70	475,35	477,16	648,00	837,25	1032,87
Essai28	16001,64	8433,84	4263,91	2581,46	2581,46	927,16	496,40	581,93	732,29	898,82	1027,59
Essai29	51808,16	33397,55	19045,74	13200,26	9365,08	6684,90	3631,97	1708,09	916,49	537,45	920,66
Essai30	84842,52	51901,13	34062,88	25428,84	20349,39	16043,06	12069,67	5942,65	3211,14	1214,83	917,07
Essai31	59601,13	38684,38	25894,72	20863,27	17225,70	14435,39	12355,93	10633,78	8900,31	7110,10	982,74
Essai32	45819,16	32980,86	22163,41	17074,52	14353,99	11922,04	9814,33	8069,78	6315,91	3990,27	990,11
Essai33	20068,42	5337,53	3173,68	2089,31	1406,49	1002,60	462,86	462,86	508,38	775,17	1052,45
Essai34	25639,51	16137,41	9275,06	6706,95	5013,37	3745,80	2573,79	1574,58	817,31	461,42	1013,39
Essai37	5843,97	3993,82	2348,48	1497,27	1004,04	692,21	423,68	275,75	193,77	82,11	131,16
Essai38	8066,49	5714,44	3758,99	2661,53	1918,61	1334,75	962,57	709,90	449,51	153,72	135,52

IV.8.3. Interprétation des résultats

Les estimations de l'épaisseur de la première couche e_1 de la structure ainsi que le coefficient de réflexion R à l'interface entre les deux milieux pour les essais expérimentaux à partir des relations obtenues au chapitre précédent ne permettent pas de refléter les paramètres réels de géométrie (e_1) et de matériaux (R) des essais. Les taux d'erreurs moyens présentés aux Tableau 73 et Tableau 74, introduits au paragraphe précédent pour différents centiles, appuient ce constat. Ces deux phénomènes peuvent être expliqués par deux hypothèses différentes. Premièrement, les relations qui permettent d'estimer le e_1 et le R ont été calculées en variant les facteurs d'entrée uniquement de deux niveaux. Ces niveaux sont présentés au Tableau 75. Avec deux niveaux ou deux valeurs pour chaque facteur d'entrée, seule une relation linéaire peut être obtenue. Par conséquent pour avoir des relations plus robustes il faudrait mener un plan d'expériences en variant les facteurs d'entrées d'au moins de plus de deux niveaux. Deuxièmement, pour les essais de la campagne expérimentale, les valeurs considérées pour du facteur e_1 ne sont pas toutes situées dans l'intervalle du plan d'expérience, alors que pour le facteur R toutes les valeurs sont situées hors de l'intervalle considéré au plan d'expérience. Ces valeurs sont résumées au Tableau 75. Les paramètres de géométrie et de matériaux n'étant pas exclusivement situés dans les intervalles des simulations numériques du plan d'expérience rendent les relations établies à partir du plan d'expérience inexploitable.

Tableau 75. Niveaux du facteur des facteurs d'entrées R et e_1

Facteurs	R	e_1 [m]
Niveaux	0,45	0,25
	0,71	0,375

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre, une campagne expérimentale a été menée afin de valider la simulation par éléments finis, développée au deuxième chapitre, qui a porté sur la propagation des ondes mécaniques dans une structure bicouche contenant un défaut. Dans un premier temps, la géométrie en béton de la structure bâtie en laboratoire a été présentée. Des essais destructifs et non destructifs ont été réalisés afin de déterminer les vitesses de propagation des ondes de compression dans les matériaux. Ce paramètre est obligatoire pour l'interprétation des essais Impact-Echo. Ensuite, des essais destructifs ont été réalisés sur le matériau qui est susceptible de représenter la deuxième couche de la structure. Une première série d'essais a été menée afin de déterminer si le sol de type 'arène granitique' pouvait, sous conditions optimales, constituer la deuxième couche qui contiendra un défaut. Un essai Proctor a été réalisé sur un échantillon d'arène granitique pour déterminer l'optimum Proctor. Une fois l'optimum PROCTOR déterminé, des essais non destructifs ont été réalisés sur des éprouvettes de sol qui permettent de déterminer le temps que met l'onde de compression à traverser l'éprouvette de sol. Cet essai a pu prouver que la propagation de l'onde dans l'arène granitique est possible. Des essais sur

le couple béton/sol ont aussi été réalisés. Les essais en configuration directe (Pundit) pour mesurer le temps de parcours des ondes de compression permet d'avoir des résultats cohérents tandis que les essais réalisés en configuration indirecte avec l'Impact-Echo ne le permettent pas. En effet, seule la propagation de l'onde dans le béton (première couche) est constatée.

Suite à ce résultat, une deuxième série d'essai est réalisée sur la terre crue afin de déterminer si ce matériau peut constituer une deuxième couche expérimentale. Des essais non destructifs en configuration directe (Pundit) et configuration indirecte (Impact-Echo) sont réalisés afin de déterminer les vitesses de propagation des ondes de compression dans la brique en terre crue et d'estimer ses dimensions. Des résultats cohérents ont été obtenus pour les différents essais sur les deux matériaux. On peut également mesurer la vitesse de propagation des ondes de compression dans le couple béton/brique en terre crue à l'aide du Pundit en configuration directe. Les essais Impact-Echo réalisés sur le couple béton/brique en terre crue tout comme le couple béton/sol n'ont pas pu estimer l'épaisseur des deux couches mais seulement celle de la couche de béton. En effet, seul le pic correspondant à la réflexion des ondes à partir de l'interface entre le béton et la brique en terre crue a pu être identifié. Néanmoins nous avons pu prouver qu'une partie des ondes de compression qui arrivent à l'interface est bien transmise à la brique pour la Conf₂.

Dans une dernière partie, nous tentons d'exploiter les essais expérimentaux à l'aide des relations obtenues à l'issue des simulations numériques. C'est une démarche qui sert à valider la simulation numérique. Les estimations de l'épaisseur de la première couche e_1 ainsi que le coefficient de réflexion R pour les essais expérimentaux à partir des relations obtenues au Chapitre III ne permettent pas de refléter les paramètres de géométrie et de matériaux réels des essais. Nous avons pu expliquer ce phénomène par deux hypothèses. Premièrement, les relations qui permettent d'estimer le e_1 et le R ont été calculées en variant les facteurs d'entrée uniquement de deux niveaux. Avec deux niveaux ou deux valeurs de chaque facteur d'entrée seule une relation linéaire peut être obtenue. Par conséquent pour avoir des relations plus robustes il faudrait mener un plan d'expériences en variant les facteurs d'entrées de plus de deux niveaux. Deuxièmement, les paramètres de géométrie et de matériaux n'étant pas exclusivement situés dans les intervalles du plan d'expérience, cela rend les relations établies à partir du plan d'expérience difficilement applicables.

Conclusion et perspectives

Le patrimoine d'ouvrage d'art Européen et en particulier français est vieillissant. Des études (Bell, (2004) Orbán, (2004)) ont montré que la majorité des ponts en maçonnerie du réseau ferroviaire européen sont centenaires et ils sont aujourd'hui dans un état moyen à dégradé. Leur entretien est donc nécessaire afin de garantir la sécurité des usagers et de conserver le patrimoine Européen. La première étape de cette maintenance consiste en une évaluation adéquate qui pourrait établir un état de santé des ouvrages avec des moyens qui ne les dégraderaient pas ou un minimum. Ces moyens sont connus sous le nom de contrôles non destructifs. Cette thèse s'inscrit dans le cadre du diagnostic des ouvrages en maçonnerie, et en particulier les ponts, au moyen des méthodes soniques. Nous nous sommes intéressé, en particulier, à une méthode de propagation des ondes de compressions générées par impact connue sous le nom d'Impact-Echo.

Lors de la synthèse de l'état de l'art, la pathologie qui a retenu notre attention concerne les vides ou les défauts pouvant être situés dans le remplissage des ponts en maçonnerie, au-delà des voûtes ou des murs de têtes. Nous avons aussi pu dégager que la méthode Impact-Echo est la méthode la plus adaptée pour l'évaluation non destructive des structures en béton ou en maçonnerie si le test est parfaitement contrôlé. Ces deux constats nous ont conduit à étudier le potentiel de la méthode Impact-Echo appliquée au diagnostic des ponts en maçonnerie pour essayer de détecter les défauts dans les matériaux de remplissage.

Afin de tirer le meilleur profit de ce potentiel, nous avons développé une étude numérique permettant de simuler un Essai Impact-Echo sur une structure sous forme de plaque bicouche contenant un défaut dans la seconde. La première couche est assimilée à la voûte ou aux murs de tête et la deuxième couche est assimilée à une couche de remplissage. Au fur et à mesure du développement de la simulation, l'influence de la géométrie simulée ainsi que les matériaux introduits sur le comportement du spectre de fréquence a été constatée. Une fois le défaut introduit dans la simulation EF, le spectre de fréquence est devenu rapidement complexe et l'interprétation très ardue. Pour mieux comprendre l'origine de l'apparition des différents pics de fréquence et dans un souci de maîtrise du spectre de fréquence, plusieurs simulations ont été développées conformément à un plan d'expériences factoriel numériques. L'objectif étant d'étudier les variations du comportement du spectre de fréquences issues des simulations EF de l'essai Impact-Echo appliquées à une structure sous forme de plaque bicouche contenant un défaut.

Pour ce plan d'expériences factoriel numériques, quatre facteurs sont retenus. Deux facteurs liés à la géométrie de la structure (l'épaisseur de la première couche e_1 et la profondeur du défaut d), un facteur lié aux matériaux composant la structure (le coefficient de réflexion R) et un facteur purement numérique intervenant dans le calcul de l'amortissement de Rayleigh (le coefficient d'amortissement ξ). Le paramètre traditionnel d'interprétation des résultats issus d'un essai Impact-Echo est purement fréquentiel. La réponse, considérée initialement pour cette interprétation, se base uniquement sur la lecture de la position du pic pouvant être présent dans le spectre de fréquence. Par conséquent, l'introduction de nouveaux paramètres de sortie était nécessaire. En effet, nous avons choisi d'exploiter, à la fois, différents paramètres des réponses temporelle et fréquentielle respectivement. D'après l'ensemble des simulations, on peut constater que les facteurs principaux ont un effet sur la quasi-totalité des variables de sorties temporelles. On a pu constater également que le facteur associé à la profondeur du défaut d , est le facteur qui présente le moins d'effet sur les différentes variables de sortie. Malgré sa faible intensité, cet effet est néanmoins présent et prouve l'existence de ce défaut ainsi que son influence sur les différentes variables de sortie et par conséquent sur les simulations numériques. La réponse temporelle obtenue à l'issue d'une simulation numérique permet donc de donner des informations sur la présence d'anomalie ou de défauts mais ne permet ni de localiser ce défaut, ni de déterminer sa nature. A l'issue de ce chapitre nous avons pu dégager des relations linéaires pour les 4 facteurs d'entrée par la méthode des moindres carrés, qui ont permis de lier les facteurs d'entrée aux variables de sorties permettant de retrouver le paramètre initial à l'aide des variables issues de la mesure. Ces relations ont été testées, dans un premier temps, sur les données ayant servi à les établir. Cette vérification correspond donc à une erreur qui a été minimisée par les moindres carrés. On trouve une erreur moyenne faible pour e_1 et R , acceptable pour ξ mais difficilement admissible pour d . Ensuite, ces mêmes relations ont été testées sur les variables de sorties obtenue à partir des essais du Chapitre II. Cette vérification nous a permis de voir que l'on obtenait des valeurs approchées de e_1 et R assez bonne et de la profondeur d , relativement correcte, si les valeurs attendues sont proches d'un point

ayant servi au calcul. Par contre l'erreur est importante pour des points éloignés. Nous avons conclu que pour construire une fonction approchée permettant d'interpréter les résultats de l'Impact-Echo, il faudrait augmenter le nombre de points de calcul, c'est-à-dire prendre plus de valeurs de e_1 , et plus de valeurs de R .

Le dernier chapitre est consacré aux essais expérimentaux, et est réalisé en vue de la validation des résultats de la simulation par éléments finis. Un protocole expérimental a été mis en place pour mener une campagne d'essais de validation. Lors de l'établissement du protocole, nous tenons compte des conditions de géométrie (géométrie de la structure), des matériaux, du chargement et des conditions aux limites initialement introduits dans le code EF. Les résultats des différents essais Impact-Echo, effectués sur la structure afin de déterminer les épaisseurs, sont présentés. Nous avons aussi tenté d'exploiter les essais expérimentaux à l'aide des relations obtenus à l'issue des simulations numériques. Les estimations de l'épaisseur de la première couche e_1 ainsi que le coefficient de réflexion R pour les essais expérimentaux à partir des relations obtenues au Chapitre III ne permettent pas de refléter les paramètres de géométrie et de matériaux réels des essais. En effet, deux niveaux de chaque facteur ne permettent d'obtenir qu'une relation linéaire. De plus, les paramètres de géométrie et de matériaux ne sont pas tous situés dans les intervalles des simulations numériques du plan d'expérience ce qui rend les relations établies à partir du plan d'expérience inapplicables.

Comme perspective à ces travaux de recherche nous envisagerons les points suivants :

Optimiser et compléter la simulation numérique développée au Chapitre II, en introduisant par exemple la non-linéarité du sol (qui représente la deuxième couche de la structure bicouche). En effet, dans la simulation le sol a été supposé linéaire. On pourrait aussi envisager d'implémenter des frontières absorbantes qui permettrait d'absorber entièrement et non partiellement les ondes aux bords de la structure où l'on voudrait ne pas avoir de réflexion.

Enrichir le plan d'expérience factoriel numérique en rajoutant d'autres niveaux aux différents facteurs d'entrées, à savoir les facteurs traduisant les paramètres de géométrie et de matériaux. Cette démarche permettrait d'avoir des relations permettant d'estimer les facteurs d'entrée plus robuste et plus représentatives de ces dernières.

Utiliser une source d'impact instrumenté, où on pourrait contrôler les amplitudes et les fréquences générés pour réaliser les essais expérimentaux. Un tel instrument pourrait à la fois d'élargir les possibilités des matériaux et épaisseur pouvant être ausculter et faciliter l'interprétation des données issues de l'expérimentation.

Notations

Onde P	Onde de compression
V_P	Vitesse de propagation des ondes de compression
Onde S	Onde de cisaillement
V_S	Vitesse de propagation des ondes de cisaillement
V_R	Vitesse de propagation des ondes de Rayleigh
Z	Impédance acoustique
$A_{réfléchie}$	Amplitude de l'onde réfléchie
A_i	Amplitude de l'onde réfractées
R	Coefficient de réflexion
t_c	Temps de contact
f_{max}	Fréquence maximale utile et exploitable
D	Diamètre du système d'impact
F	Force de chargement
F_{max}	Amplitude maximale du choc
Δt	Intervalle d'échantillonnage
$f_e = 1/\Delta t$	La fréquence d'échantillonnage
Δf	Intervalle de fréquence
λ	Longueur d'onde
MSD	Densité spectrale multi-croisée
e_1	Epaisseur milieu 1
e_2	Epaisseur milieu 2
β	Facteur géométrique

Références bibliographiques

- Alarcon, A. (2013). Modélisation de l'amortissement en dynamique linéaire.
- Azari, H., Nazarian, S., and Yuan, D. (2014). Assessing sensitivity of impact echo and ultrasonic surface waves methods for nondestructive evaluation of concrete structures. *Construction and Building Materials* 71, 384–391.
- Bell (2004). European railway bridge demography. *European FP* 6.
- Berenger, J.-P. (1994). A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics* 114, 185–200.
- Binda, L., Saisi, A., and Tiraboschi, C. (2001). Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures. *NDT & E International* 34, 123–138.
- Bitri, A., Perrin, J., and Beauce, A. (1996). La sismique réflexion haute résolution : principes et applications. 59.
- Bodare, A. Nondestructive test methods of stone and rock.
- Carino, N.J. (2013). Training: Often the missing link in using NDT methods. *Construction and Building Materials* 38, 1316–1329.
- Carino, N.J. (2015). Impact Echo: The Fundamentals. *International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*.
- Chaudhary, M.T.A. (2013). Effectiveness of Impact Echo testing in detecting flaws in prestressed concrete slabs. *Construction and Building Materials* 47, 753–759.
- Chekroun, M. (2008). Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface. *Ecole Centrale de Nantes (ECN)(ECN)(ECN)(ECN)*.
- Chowdhury, I., and Dasgupta, S.P. (2003). Computation of Rayleigh damping coefficients for large systems. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 8, 1–11.
- Combesure, D. (2006). *Eléments de dynamique des structures Illustration à l'aide de CAST3M*. Support de Cours, [Www-Cast3m. Cea. Fr](http://www-cast3m.cea.fr).
- Davis, A.G. (2003). The nondestructive impulse response test in North America: 1985–2001. *NDT & E International* 36, 185–193.
- Delbecq (1982). *Les ponts en maçonnerie*.
- Drozdz, M.B. (2008). Efficient finite element modeling of ultrasound waves in elastic media.
- Godart, B. (2005). *Gestion des ponts en Europe Projet européen BRIME (Lab oratoire Central des Ponts et Chaussées 58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15)*.
- Goupy, J. (2006). *Les plans d'expériences*. 43.

- Haack, A., Schreyer, J., and Jackel, G. (1995). Report to ITA Working Group on Maintenance and Repair of underground structures: State-of-the-art of non-destructive testing methods for determining the state of a tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology* 10, 413429–426431.
- Israeli, M., and Orszag, S.A. (1981). Approximation of radiation boundary conditions. *Journal of Computational Physics* 41, 115–135.
- Kashif Ur Rehman, S., Ibrahim, Z., Memon, S.A., and Jameel, M. (2016). Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials* 107, 58–86.
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration* (Malden, MA: Blackwell Science).
- Kim, D.S., Seo, W.S., and Lee, K.M. (2006). IE–SASW method for nondestructive evaluation of concrete structure. *NDT & E International* 39, 143–154.
- Marastoni, D., Pelà, L., Benedetti, A., and Roca, P. (2016). Combining Brazilian tests on masonry cores and double punch tests for the mechanical characterization of historical mortars. *Construction and Building Materials* 112, 112–127.
- Mari, J.-L., Glangeaud, F., and Coppens, F. (2001). *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens* (Editions TECHNIP).
- Martin, J., Hardy, M.S., Usmani, A.S., and Forde, M.C. (1998). Accuracy of NDE in bridge assessment. *Engineering Structures* 20, 979–984.
- McCann, D.M., and Forde, M.C. (2001). Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *Ndt & E International* 34, 71–84.
- Medina, R., and Garrido, M. (2007). Improving impact-echo method by using cross-spectral density. *Journal of Sound and Vibration* 304, 769–778.
- Miranda, L., Cantini, L., Guedes, J., and Costa, A. (2015). Assessment of mechanical properties of full-scale masonry panels through sonic methods. Comparison with mechanical destructive tests: Experimental Sonic Test on Stone Masonry. *Structural Control and Health Monitoring* 23, 503–516.
- Miranda, L.F., Rio, J., Miranda Guedes, J., and Costa, A. (2012). Sonic Impact Method – A new technique for characterization of stone masonry walls. *Construction and Building Materials* 36, 27–35.
- Mouton, E., Durand, G., Clement, A., and Meriaux, P. (2007). Recherche d’anomalies dans les digues par ondes de surface (MASW et DCOS) : application sur le site expérimental de l’Agly. p.
- Orbán, Z. (2004). Assessment, reliability and maintenance of masonry railway bridges in Europe. 10.
- Orbán, Z. (2007). UIC project on assessment, inspection and maintenance of masonry arch railway bridges. *ARCH* 7, 3–12.
- Orbán, Z., and Gutermann, M. (2009). Assessment of masonry arch railway bridges using non-destructive in-situ testing methods. *Engineering Structures* 31, 2287–2298.
- Pradhan, T. (2014). *Finite Element Modeling of Impact-Generated Stress Wave Propagation in Concrete Plates for Non-Destructive Evaluation* (Lehigh University).

- Proske, D., and Gelder, P.H.A.J.M. van (2009). *Safety of historical stone arch bridges* (Heidelberg ; New York: Springer).
- Rehman, S.K., Ibrahim, Z., Memon, S.A., and Jameel, J. (2016). Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials* 58–86.
- Sadri, A. (2003). Application of impact-echo technique in diagnoses and repair of stone masonry structures. *NDT & E International* 36, 195–202.
- Sánchez-Sesma, F.J., Weaver, R.L., Kawase, H., Matsushima, S., Luzón, F., and Campillo, M. (2011). Energy partitions among elastic waves for dynamic surface loads in a semi-infinite solid. *Bulletin of the Seismological Society of America* 101, 1704–1709.
- Sangoju, bhaskar, and Ramanjaneyulu, K. (2016). Evaluation of thickness and identification of defects in masonry elements using impact-echo technique. *Journal of Structural Engineering* 42, 485–493.
- Sansalone, M., and Carino, J.N. (1986). *Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves*.
- Sansalone, M., and Streett, W. (1997). *IMPACT-ECHO Non destructive Evaluation of Concrete and Masonry* (NEW YORK: Cayuga Press).
- Serón, F.J., Sanz, F.J., Kindelán, M., and Badal, J.I. (1990). Finite-element method for elastic wave propagation. *Communications in Applied Numerical Methods* 6, 359–368.
- SETRA (1996). Procès verbal de visite - Pont en maçonnerie, Images de la qualité des Ouvrages d'art.
- Simonin, J.-M. (2005). Contribution à l'étude de l'auscultation des chaussées par méthode d'impact mécanique pour la détection et la caractérisation des défauts d'interface. Institut National des Sciences Appliquées.
- Solla, M., Lorenzo, H., Riveiro, B., and Rial, F.I. (2011). Non-destructive methodologies in the assessment of the masonry arch bridge of Traba, Spain. *Engineering Failure Analysis* 18, 828–835.
- Stablon (2011). *Méthodologie pour la requalification des ponts en maçonnerie*. Toulouse.
- Tautou, R. (2016). Modélisation dynamique de la thermo-viscoélasticité des matériaux bitumineux - Application aux essais FWD sur les structures de chaussées. Université de Limoges.
- Thomas, M. (2007). *Simulation des vibrations mécaniques: par Matlab, Simulink et Ansys (PUQ)*.
- Topping, B.H.V., and Wong, F.L. (1991). Finite element modelling of the sonic method of testing masonry structures. *Computers & structures* 41, 109–136.
- Zanaz (2016). *Approche probabiliste d'aide au diagnostic des voûtes en maçonnerie*. Université de Limoges.

Résumé

Le patrimoine d'ouvrage d'art Européen et en particulier français est vieillissant. Pour pouvoir le conserver, il est nécessaire d'établir un 'état de santé' de ces ouvrages en les auscultant. Afin de ne pas les dégrader lors de l'auscultation des méthodes de contrôle non destructifs (CND) doivent être utilisées. Nous nous sommes intéressés en particulier, à une méthode connue sous le nom d'Impact-Echo. La pathologie qui a retenu notre attention concerne les vides ou les défauts pouvant être situés dans le remplissage des ponts en maçonnerie, au-delà des voûtes ou des murs de têtes. Afin de tirer le meilleur profit de la méthode d'auscultation, une étude numérique permettant de simuler un Essai Impact-Echo sur une structure sous forme de plaque bicouche contenant un défaut est développée. Devant la difficulté d'interprétation des résultats issus de cette simulation, un plan d'expériences factoriel numériques est introduit. Pour ce plan d'expériences quatre facteurs sont retenus. Deux facteurs liés la géométrie de la structure e_1 et d , un facteur lié aux matériaux composant la structures R et un facteur purement numérique ξ . D'autres variables de sortie, autre que la lecture de la position du pic, sont introduites. A l'issue de ce plan d'expériences, nous avons pu dégager des relations, qui ont permis de lier les facteurs d'entrée aux différentes variables de sortie. Ces relations ont été testées, dans un premier temps, sur les données ayant servi à les établir. Une campagne expérimentale a été introduite afin de valider la simulation numérique. Pour cette validation, nous avons tenté d'exploiter les essais de la campagne expérimentale à l'aide des différentes relations obtenues du plan d'expériences numériques.

Mots-clés : Impact-Echo, CND, plan d'expériences numérique, pathologie, défaut.

Abstract

The heritage of European and particularly French infrastructure is aging. To be able to preserve it, it is necessary to establish a "state of health" of these works by auscultation. In order not to degrade them during the auscultation, non-destructive testing (NDT) methods must be used. We were particularly interested in a method known as the Impact-Echo method. The pathology that caught our attention concerns voids or defects that may be located in the filling of masonry bridges, beyond the vaults or the head walls. In order to make the most of the auscultation method, a numerical study to simulate an Impact-Echo test on a bilayer structure containing a defect is developed. Faced with the difficulty of interpreting the results from this simulation, a numerical factorial design of experiments is introduced. For this experimental design four factors are retained. Two factors linked to the geometry of the structure e_1 and d , a factor linked to the materials composing the structures R and a purely numerical factor ξ . Other output variables, other than reading the peak position, are introduced. At the end of this experimental design, we were able to identify relations, which made it possible to link the input factors to the different output variables. These relations were first tested on the data used to establish them. An experimental campaign was introduced in order to validate the numerical simulation. For this validation, we tried to exploit the trials of the experimental companion using the different relations obtained from the numerical factorial design of the experiment.

Keywords : Impact-Echo, NDT, Numerical experimental design, pathology, defect

