



HAL
open science

Utilisation d'ondes de surface à l'aide de scanners acoustiques sans contact pour le contrôle non destructif de structures en béton

Charles Ciccarone

► **To cite this version:**

Charles Ciccarone. Utilisation d'ondes de surface à l'aide de scanners acoustiques sans contact pour le contrôle non destructif de structures en béton. Autre. Centrale Lille Institut, 2020. Français. NNT : 2020CLIL0014 . tel-03200556

HAL Id: tel-03200556

<https://theses.hal.science/tel-03200556>

Submitted on 16 Apr 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.

N° d'ordre: 406

CENTRALE LILLE

THÈSE

présentée en vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR

en

Spécialité: Génie Civil

par

Charles CICCARONE

DOCTORAT DÉLIVRÉ PAR CENTRALE LILLE

Titre de la thèse :

**Utilisation d'ondes de surface à l'aide de scanners acoustiques sans contact pour le
contrôle non destructif de structures en béton**

Soutenue le 9 octobre 2020 devant le jury d'examen :

Président	<i>Catherine DAVY, Professeur, Centrale Lille</i>
Rapporteur	<i>Abdelhafid KHELIDI, Professeur, GeM, IUT de Saint-Nazaire</i>
Rapporteur	<i>Vincent PICANDET, Maître de conférences, HDR, Université Bretagne Sud-IRDL</i>
Membre	<i>Géraldine VILLAIN, Ingénieur, HDR, Université Gustave Eiffel</i>
Membre	<i>Jean-Paul BALAYSSAC, Professeur, INSA Toulouse</i>
Membre	<i>Vincent GARNIER Professeur, Aix Marseille Université</i>
Invité	<i>Jean-Marie HENAULT, Docteur, EDF-R&D-STEP</i>
Invité	<i>Benoit MASSON, Ingénieur, EDF-SEPTEN</i>
Directeur de thèse	<i>Frédéric SKOCZYLAS, Professeur, Centrale Lille</i>
Co-Directeur de thèse	<i>Bogdan PIWAKOWSKI, Professeur, Centrale Lille</i>

Thèse préparée à :

Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multiéchelle (LaMcube)

L'Institut d'Électronique, de Microélectronique de Nanotechnologie (IEMN)

École Doctorale SPI 072 (Centrale Lille)

Table des matières

Introduction générale	21
Chapitre I Contexte et solution technique adoptée.....	23
I.1 Introduction – Pathologies du béton.....	25
I.2 Techniques de Contrôle Non Destructif du béton	27
I.2.1 Méthodes CND : informations sur l'état de surface.....	28
I.2.2 Méthodes CND : informations sur les armatures d'acier	29
I.2.3 Méthodes CND : informations sur l'état hydrique du matériau.....	31
I.2.4 Méthodes CND fondées sur l'utilisation des ondes acoustiques	34
I.3 Généralité sur les ondes acoustiques utilisées	36
I.3.1 Ondes acoustiques (mécaniques)	36
I.3.2 Dispersion des ondes de surface	42
I.3.3 Ondes de plaque	43
I.4 Solution technique proposée : Scanners à ondes de surface.....	45
I.4.1 Principe de fonctionnement du scanner à onde de surfaces hautes fréquences ...	46
I.4.2 Déroulement d'une mesure	49
I.4.3 Forme des signaux utilisés : technique « chirp »	50
I.4.4 Traitement des données	53
I.4.5 Solution technique proposée : le scanner à ondes de surface basses fréquences..	56
I.6 Conclusions et contenu de la thèse.....	58
Annexes Chapitre I.....	61
Références bibliographiques Chapitre I.....	63
Chapitre II Détection et caractérisation d'un front de lixiviation.....	67
II.1 Introduction	69
II.2 Démarche expérimentale	72
II.2.1 Description des échantillons et du matériel utilisés	72
II.2.2 Protocole expérimental	75
II.2.3 Description de la campagne expérimentale	76
II.2.3.1 Indicateur de pH : la phénolphtaléine.....	77
II.2.3.2 Perméabilité au gaz – Cellule de perméabilité.....	77
II.2.3.3 Module élastique local – Dispositif de micro-indentation	80
II.2.3.4 Mesure acoustique à l'aide du scanner hautes fréquences	82

II.3 Présentation des résultats obtenus	84
II.3.1 Résultats de l'observation visuelle après utilisation de phénolphthaléine	85
II.3.2 Résultats des mesures de microindentation sur tranches issues de carottages ...	86
II.3.3 Résultats des mesures de perméabilité à l'argon sur tranches issues de carottages.....	89
II.3.4 Résultats des mesures acoustiques sur dalles lixiviées	90
II.3.4.1 Résultats sur les vitesses de phase de l'onde de surface	90
II.3.4.2 Identification de la couche lixivée par l'inversion de la caractéristique de dispersion.....	94
II.3.4.3 Résultats sur l'atténuation de l'onde de surface	100
II.4 Conclusion	102
Annexes Chapitre II.....	103
Références bibliographiques Chapitre II.....	107
Chapitre III Identification d'une zone délaminée dans un béton	109
III.1 Introduction.....	111
III.2 Démarche expérimentale	112
III.2.1 Préparation des échantillons avec la délamination artificielle	112
III.2.2 Protocole des mesures acoustiques.....	116
III.3 Résultats.....	119
III.3.1 Interprétation des résultats.....	119
III.3.2 Première série de dalles	119
III.3.3 Deuxième série de dalles	121
III.3.4 Troisième série de dalles.....	125
III.4 Conclusion	126
Références bibliographiques Chapitre III	129
Chapitre IV Suivi d'un front de perturbation hydrique	131
IV.1 Introduction.....	133
IV.2 Essais préliminaires sur matériau homogène : un calcaire de Bourgogne	135
IV.2.1 Organisation de l'expérimentation.....	135
IV.2.2 Mesures sur éprouvettes cylindriques	138
IV.2.3 Mesures non destructives à l'aide du scanner à ondes de surface hautes fréquences	139
IV.2.4. Résultats obtenus	139
IV.2.4.1 Résultats à partir des tranches prélevées	139
IV.2.4.2 Résultats obtenus avec les méthodes acoustiques.....	140

IV.3 Essais sur un mur d'essais en béton armé	146
IV.3.1 Présentation de l'ouvrage.....	146
IV.3.2 Mesures acoustiques.....	147
IV.3.3 Résultats.....	148
IV.4 Conclusions	154
Annexes Chapitre IV	155
Références bibliographiques Chapitre IV	159
Chapitre V Détection d'une fissure ou une zone microfissurée	161
V.1 Introduction.....	163
V.1.1 Prise du béton et causes de fissures	163
V.1.2 Projet ENDE : présentation et objectifs.....	164
V.2 Tests au laboratoire	167
V.2.1 Caractérisation du béton dans son volume.....	167
V.2.2 Détection de la micro fissuration et des macro-fissures	170
V.3 Tests in situ	179
V.3.1. Caractérisation de béton dans son volume	180
V.3.1.1. Test préliminaires juin 2016.....	181
V.3.1.2 Résultats des épreuves de pression en mars 2017	182
V.3.2. Détection des macro-fissures.....	185
V.3.2.1. Zone d'expérimentation	185
V.3.2.2. Test préliminaires juin 2016-mars 2019	186
V.3.2.3. Résultats des épreuves de pression en mars 2017 et 2019.....	190
V.4. Conclusions.....	197
Annexes Chapitre V.....	199
Références bibliographiques Chapitre V	211
Conclusion générale	213

Liste des figures

Figure I-1 :	a) Fissure présente sur l'extrados d'une soufflerie du site de Toulouse de l'ONERA ; b) délamination de 2 couches de béton et épaufrures de béton à partir des armatures d'acier ; c) détérioration de la surface du béton causée par le lessivage (lixiviation) progressif du béton par l'eau de pluie ; d) éclatement du béton dû à la corrosion des armatures d'aciers.....	25
Figure I-2 :	Vue en coupe sous microscope de l'attaque acide de la pâte cimentaire [Pabalan-2011]	26
Figure I-3 :	Thermographie infrarouge : a) photographie du béton d'un tablier de pont ; b) imagerie infrarouge du tablier de pont permettant de localiser les zones délaminées	28
Figure I-4 :	Utilisation d'un pachomètre pour détecter les armatures dans le béton armé	30
Figure I-5 :	a) Imagerie radar (Ground Penetrating Radar) d'un sol de béton armé (source : société MDC) ; b) imagerie radar d'une chaussée	31
Figure I-6 :	[gauche] Exemple d'un appareil radar utilisé sur les structures en béton ; [droite] évolution de la permittivité diélectrique en fonction de la teneur en eau, mesurée par méthode radar pour différents rapports Eau/Ciment dans un béton [Villain – 2008]	32
Figure I-7 :	a) Schéma de principe de mesure de résistivité (configuration Wenner) ; b) sonde sur la surface de béton ; c) évolution de la résistivité en fonction de la teneur en eau pour différents bétons [SENSO – 2009].....	33
Figure I-8 :	Schéma de principe de la mesure de potentiel de corrosion	33
Figure I-9:	Illustration de différentes méthodes acoustiques en contact ; E et R indiquent l'émetteur et le récepteur	35
Figure I-10 :	Illustration de différentes méthodes acoustiques sans contact ; les symboles E et R de couleur verte indiquent l'émetteur et récepteur électroacoustiques ; les symboles E et R en couleur rouge et bleu indiquent l'émetteur laser et l'interféromètre laser.....	35
Figure I-11 :	Illustration de différentes méthodes acoustiques en semi-contact ; les symboles E et R de couleur verte indiquent l'émetteur et récepteur électroacoustiques ; les symboles E et R en couleur rouge et bleu indiquent l'émetteur laser et l'interféromètre laser.....	36
Figure I-12 :	Types d'ondes se propageant dans un demi-espace solide excité par une force $F(t)$ [Krautkrämer – 1990].....	37
Figure I-13 :	Représentation a) spatiale et b) temporelle d'une onde harmonique	38
Figure I-14 :	a) Onde harmonique (mono fréquentielle) observée à deux distances R_1 et R_2 ; b) Présentation symbolique d'une onde impulsionnelle observée à deux distances R_1 et R_2 aux instants t_1 et t_2 ; c) 4 impulsions d'onde enregistrés sur 5 distances R_1 - R_5 ; d) Spectre des impulsions montrées sur la section (c)	38

Figure I-15 :	Schéma du déplacement d'un front d'onde permettant le calcul du coefficient d'atténuation	41
Figure I-16 :	a) Schéma d'un modèle de matériau bicouche ausculté par onde de surface b) courbe de dispersion correspondante	43
Figure I-17 :	Simulation des modes d'onde de Lamb pour une dalle dont la vitesse des ondes longitudinales vaut 4500 m/s et la vitesse des ondes transversales vaut 2585 m/s (ces valeurs sont représentatives d'un béton), d'épaisseur a) 5 cm, b) 10 cm ; schéma représentant macroscopiquement les configurations vibratoires des ondes de Lamb pour les modes c) symétriques et d) antisymétriques	43
Figure I-18 :	Schéma de principe de l'utilisation combinée des ondes de surface et ondes de plaque à partir d'un large spectre de fréquences afin de déterminer une profondeur de rupture mécanique	44
Figure I-19 :	Zones fréquentielles et profondeurs de pénétration couvertes par les deux scanners	46
Figure I-20 :	Principe de fonctionnement du scanner et des photos du scanner en fonctionnement ; a) schéma de fonctionnement complet ; b) photo de la partie PC du schéma + l'amplificateur de puissance ; c) photo de la partie scanner + préamplificateur (fixé sur le scanner) sur un mur d'essai ; d) photo du scanner sur une dalle en laboratoire	47
Figure I-21 :	5 profils constituant 1 point de mesure sur un mur en béton	50
Figure I-22 :	a) Schéma représentant l'effet de la compression des signaux « chirp » b) illustration de la compression de 3 chirps de bandes fréquentielles différentes, et exemple du spectre d'amplitude d'un signal chirp [Piwakowski et al – 2008]	51
Figure I-23 :	Exemple de principe du code Golay ; a) et b) 2 séquences de Golay complémentaires ; c) autocorrélations de ces séquences ; d) somme de ces autocorrélations ; e) spectre d'amplitude de la somme	53
Figure I-24 :	Différentes étapes du traitement de données pour un point de mesure: a) B-scan des signaux pour un profil scanné avec le transducteur 75 kHz et l'onde extraite pour le traitement ; b) ensemble de tous les spectres d'amplitude de ce profil pour ce transducteur ; c) répartition fréquentielle des vitesses pour tous ces profils ; d) évolution de l'amplitude de l'onde reçue en fonction de la distance émetteur-récepteur pour un profil ; e) évolution fréquentielle du coefficient d'atténuation pour tous les profils ; f) évolution fréquentielle de la vitesse de phase pour tous les profils.....	54
Figure I-25 :	Courbes de a) dispersion et b) d'atténuation issues des mesures effectués dans trois bandes fréquentielles en utilisant trois émetteurs à 50, 75, et 200 kHz	55
Figure I-26 :	a) Ensemble du matériel de contrôle et de pilotage ; b) et c) exemples de scanner installé contre un mur ou la paroi d'une sculpture à ausculter	58
Figure II-1 :	Figure II-1 : Essais de lixiviation de 2 mortiers au NH_4NO_3 , résultats de mesures de a) porosité et de b) module élastique en fonction du temps [Agostini et al – 2007]	70

Figure II-2 :	Évolution de la vitesse (a) et de l'atténuation (b) en fonction du temps de dégradation chimique (NH_4NO_3) d'une plaque de mortier [Ould Naffa et al – 2002]	71
Figure II-3 :	Schéma du dispositif expérimental pour l'une des dalles à lixivier	72
Figure II-4 :	Photo des 3 éprouvettes de béton imperméabilisées (la partie latérale couverte par la résine est plus foncée) ; chaque surface orientée vers le haut sur la photo sera la surface attaquée chimiquement	73
Figure II-5 :	[gauche] 3 dalles de béton recouvertes de résines imperméabilisantes sur toutes les surfaces libres (sur la photo) ; [milieu] bacs de rétention utilisés ; [droite] contenants du nitrate d'ammonium pur	74
Figure II-6 :	[gauche] Illustration de la réaction endothermique de dissolution du NH_4NO_3 ; [droite] éprouvette de béton immergée dans la solution lixiviante	74
Figure II-7 :	[gauche] Une carotte extraite après la première phase de dégradation ; [droite] la dalle carottée avec la réimperméabilisation de chaque zone carottée	76
Figure II-8 :	[gauche] Scie à fil utilisée pour couper les carottes ; [droite] schéma de coupe de chaque carotte (4 tranches de 2 cm d'épaisseur)	76
Figure II-9 :	Photo d'une tranche fendue sur laquelle on a appliqué de la phénolphthaléine	77
Figure II-10 :	Schéma de fonctionnement d'une cellule de perméabilité	78
Figure II-11 :	[gauche] Schéma de principe du microindenteur ; [droite] photo du microindenteur utilisé	80
Figure II-12 :	Cycle de charge/décharge d'un essai de micro-indentation sur un échantillon de béton	81
Figure II-13 :	[gauche] Photo schématisant le découpage des carottes par tranches de 2 cm d'épaisseur ; [milieu] schéma représentant la démarche de microindentation sur chaque tranche et [droite] la répartition aléatoire des points d'indentation sur la pâte cimentaire	81
Figure II-14 :	[gauche] Carotte extraite en fin d'étude avec indication de découpe ultérieure ; [milieu] schéma des 2 lignes de points d'indentation choisies [droite] sur la tranche issue de la découpe, tracé de 2 lignes d'une dizaine de points d'indentation chacune	82
Figure II-15 :	Scanner hautes fréquences posé sur la surface d'une dalle examinée (dispositif de mesure acoustique)	83
Figure II-16 :	a) Exemple de B-scan en échelle de gris pour une mesure avec le transducteur T75 ; b) le même B-scan normalisé ; c) 3 courbes de dispersion de vitesse, une par transducteur ; d) 3 courbes d'atténuation, une par transducteur ; e) courbe de dispersion résultante de la combinaison des 3 courbes précédentes (c) ; f) courbe d'atténuation résultante de la combinaison des 3 courbes précédentes (d)	84
Figure II-17 :	2ème tranche (profondeur : 2 cm à 4 cm) issue de la carotte ayant subi 28 jours de lixiviation, fendue puis enduite de phénolphthaléine	85

Figure II-18 :	Suivi de l'évolution du front de lixiviation sur la 1ère tranche de chaque carotte par l'utilisation d'un indicateur coloré	85
Figure II-19:	Évolution des profondeurs du front de lixiviation mesurées sur les facies de rupture des premières tranches issues de chaque carottage	86
Figure II-20 :	Évolution de la pente [Force/déplacement] sur essai de microindentation en fonction du temps d'exposition à la solution lixiviante pour chaque face de chaque tranche issue des carottages	87
Figure II-21 :	Évolution de la pente [Force/déplacement] sur essai de microindentation pour les 2 lignes de points choisis sur la carotte tranchée suivant l'axe, à 28 jours de dégradation chimique	88
Figure II-22 :	Évolution de la perméabilité apparente à l'argon en fonction du temps d'exposition à la solution lixiviante, pour chaque tranche issue des carottages, pour une pression de confinement de 50 bars. La ligne pointillée indique l'évolution attendue	89
Figure II-23 :	Vitesses de phase en fonction de la longueur d'onde et de la fréquence pour les dalles [gauche] sans armatures et [droite] avec armatures	91
Figure II-24 :	Étendue des écart-types de vitesse $\sigma_{vmax}-\sigma_{vmin}$ avec le temps d'exposition	92
Figure II-25 :	a) Gradients GV obtenus pour des murs jeunes de 10 ans (III-N et III-S) et des murs vieux de 65 ans (I-N, IV-N et IV-S) [Piwakowski et al – 2014] ; b) évolution de la vitesse de phase dans la dalle lixiviée pour la profondeur 19 mm et pour la fréquence 130kHz en fonction du temps de lixiviation ; c) évolution des gradients de vitesse GV pour la dalle lixiviée en fonction du temps de lixiviation	94
Figure II-26 :	Schéma et notations du modèle utilisés pour la procédure d'inversion	95
Figure II-27 :	Mesures effectuées sur une plateforme d'un port maritime et résultats obtenus: a) la face externe de la plateforme auscultée avec le dispositif de mesure et la ligne examinée (flèche blanche) – les lignes noires pointillées indiquent les différents profils d'ondes de surface ; b) Courbes de dispersion mesurées $V_{phmes}(f)$ et leur moyenne (trait épais) – B indique l'intervalle de fréquences considéré pour l'inversion ; c) M = 200 solutions de l'inversion tracées sous la forme de la vitesse transversale en fonction de la profondeur ; d) Valeurs de la fonction misfit des solutions de c) classées par ordre croissant ; e) Les K = 20 meilleures solutions de c) ayant une valeur de fonction d'erreur inférieure à 0.25% ; f) Caractéristiques de dispersion calculées $V_{phcalc}(f)$, correspondant aux solutions de e) ; g) $V_{phcalc}(f)$ pour la meilleure inversion (misfit 0.22%) comparée à la caractéristique de dispersion expérimentale d'entrée $V_{phmes}(f)$; h) Résultat final : Vitesse transversale moyenne et son écart-type en fonction de la profondeur [Piwakowski et al – 2011]	98
Figure II-28 :	a) Valeurs de la fonction « misfit » pour 100 itérations du programme d'inversion appliqué à la dispersion correspondant à 28 jours de dégradation ; b) Comparaison entre la courbe expérimentale mesurée et la courbe du meilleur modèle calculé	97

Figure II-29 :	Résultats de l'inversion des courbes de dispersion pour un béton non dégradé (0 jour) et un béton très dégradé (28 jours) ; les lignes brisées indiquent les résultats bruts, les lignes pointillées indiquent les écart-types.....	98
Figure II-30 :	Résultats de l'inversion des courbes de dispersion de vitesse pour une dégradation durant 0, 7 et 24 jours	99
Figure II-31 :	Atténuation $\alpha(f)$ en fonction de la longueur d'onde et de la fréquence pour une dalle sans armatures [gauche] et avec armatures [droite]	100
Figure II-32 :	Courbes d'atténuation en fonction de la fréquence, avec régressions paraboliques associées	101
Figure II-33 :	a) Coefficient d'atténuation pour une fréquence ($f = 130$ kHz) et une longueur d'onde ($\lambda = 19$ mm) fixées en fonction de temps de dégradation b) Coefficients d'interpolation parabolique a_1 en fonction du temps de dégradation ; c) Coefficient d'interpolation parabolique a_2 en fonction du temps de dégradation	101
Figure A.II.3.2 :	Évolution de la pente [Force/déplacement] sur essai de microindentation en fonction de la profondeur par rapport à la surface exposée à la solution lixivante en fonction du temps d'exposition au nitrate d'ammonium pour chaque tranche issue des carottages.....	103
Figure A.II.3.3 :	Évolution de la perméabilité apparente à l'argon en fonction du temps d'exposition à la solution lixivante, pour chaque tranche issue des carottages, pour une pression de confinement de 30 et 80 bars	104
Figure A.II.3.4 :	Résultats de l'inversion des courbes de dispersion de vitesse pour une dégradation pour chaque étape de dégradation : [haut] chaque courbe brute avec ses écart-types ; [bas] chaque courbe brute avec la courbe lissée associée	105
Figure III-1 :	Vue en coupe d'une dalle délaminée en surface	111
Figure III-2 :	Description schématique des profils des dalles de mortier (série 1)	113
Figure III-3 :	[gauche] Cinquième dalle de la série 1, composée d'une dalle de 3 cm d'épaisseur et une dalle de 9 cm d'épaisseur, superposée ; [Droite] dalle de la série 2 : mise en place de l'interface huilée	112
Figure III-4 :	Description schématique des profils des premières dalles de béton (série 2).115	
Figure III-5 :	Description schématique des profils des dalles de béton supplémentaires (série 3)	115
Figure III-6 :	Photo de la deuxième dalle de la figure III-5 : reprise de bétonnage à 3 cm de profondeur par rapport à la surface libre	116
Figure III-7 :	a) Les modes A_0 et S_0 ainsi que les modes supérieurs des ondes de plaque dans une dalle d'épaisseur 3 cm ; b) Zoom de la zone où l'onde de surface apparaît (Note : cette simulation est valable pour le matériau béton, donc pour les séries 2 et 3).....	117
Figure III-8 :	Scanner à hautes fréquences effectuant une mesure sur une dalle de la série 1	118

Figure III-9 : Résumé des courbes de dispersion des 5 dalles de mortier de la série 1, ainsi que leurs transformations Slant-Stack respectives pour le transducteur centré sur 75 kHz	119
Figure III-10 : Résumé des courbes de dispersion des 5 dalles de mortier de la série 1 avec leurs écart-types (nommé Var)	120
Figure III-11 : Résumé des courbes de dispersion des 3 dalles de mortier de la série 2, ainsi que leurs transformations Slant-Stack respectives pour le transducteur centré sur 75 kHz	122
Figure III-12 : Résumé des courbes de dispersion des 3 dalles de béton de la série 2, avec leurs écart-types	123
Figure III-13 : Comparaison des courbes de dispersion des zones délaminées des 3 dalles de la série 2.....	123
Figure III-14 : a) Dalle pendant le test de transmission sans contact b) explication symbolique de l'expériment c) la zone scannée	124
Figure III-15 : C-scan représentant le niveau de l'onde transmis à travers de la dalle : la partie gauche correspond à la zone saine, la partie droite à la zone délaminée	125
Figure III-16 : Courbes de dispersion de la troisième série de dalles pour la dalle contenant une feuille de polyane	126
Figure III-17 : Courbes de dispersion de la troisième série de dalles pour la dalle contenant une reprise de bétonnage	126
Figure IV-1 : Effet de structure pendant le séchage	134
Figure IV-2 : Bloc de calcaire utilisé pour les mesures acoustiques, et schéma du dispositif d'étanchéification	135
Figure IV-3: Schéma de la procédure d'inhibition par 1cm d'eau sur la surface de calcaire étanchéifiée sur ses bords	136
Figure IV-4 : Illustration du protocole expérimental sur le bloc calcaire (imbibition de 1cm d'eau sur la surface de calcaire étanchéifiée sur les côtés)	137
Figure IV-5 : Illustrations de phases consécutives procédure d'inhibition par 1 cm d'eau sur les tranches assemblées étanchéifiées sur les côtés	137
Figure IV-6 : a) 14 tranches d'un même cylindre de calcaire prélevé sur le 2 ^{ème} bloc ; b) imbibition de 1 cm d'eau sur la colonne de tranches réassemblées	138
Figure IV-7 : Mesure avec le scanner acoustique sans contact après une phase d'imbibition	139
Figure IV-8 : Mesures initiales à l'état ambiant de la a) porosité et de la b) masse volumique ; c) variation de la saturation avec la profondeur pour différents états d'imbibition	140
Figure IV-9 : Résultats de dispersion des mesures acoustiques sur bloc calcaire en fonction de a) la fréquence et b) la longueur d'onde (donc en fonction de la pénétration de l'onde)	141

Figure IV-10 : Résultats de mesures sur matériau sec et saturé pour a) le module de Young, b) la vitesse longitudinale pour 2 fréquences différentes et c) la vitesse transversale	142
Figure IV-11 : Évolution du rapport entre la vitesse longitudinale et la vitesse transversale dans un matériau en fonction de son coefficient de Poisson [Mari et al – 1998] ; les points en couleurs indiquent les coefficients de Poisson (0,12 à l'état sec et 0,29 à l'état saturé) obtenus pour le calcaire examiné	142
Figure IV-12 : a) Inversion des courbes de dispersion des ondes de surface : vitesse transversale en fonction de la profondeur b) conversion de la vitesse transversale en saturation	144
Figure IV-13 : a) Réalisation des parois d'étanchéité sur le mur. La zone de droite est disponible pour l'arrosage ; b) arrosage du mur (un brouillard d'eau est projeté sur le mur)	146
Figure IV-14 : Progression de la saturation dans des cylindres du même béton qui a servi pour la construction du mur, soumis à pulvérisation d'eau (comme pour le mur)	147
Figure IV-15 : Dispositif de mesures avec le scanner acoustique sans contact sur mur d'essai : (a) section de mur sélectionnée pour les essais acoustiques ; (b) matériel nécessaire à la mesure avec le scanner HF ; (c) scanner HF effectuant une mesure sur le mur d'essai ; (d) maillage de la section du mur pour les mesures acoustiques ; (e) maille A2 avec les 5 profils de mesure tracés.....	148
Figure IV-16 : Variation des vitesses de phase en fonction de la maille pour les arrosages 1 et 5	149
Figure IV-17 : Variation des vitesses de phase avec le nombre d'arrosages, en fonction de a) la fréquence et b) la longueur d'onde (donc la profondeur de la pénétration) .	149
Figure IV-18 : Vitesse des ondes de surface [gauche] pour une fréquence fixée (90 kHz, 130 kHz et 210 kHz) et [droite] pour une longueur d'onde (sur une profondeur) donnée (10 mm, 30 mm et 50 mm) en fonction de nombre d'arrosages	151
Figure IV-19 : Photographie au microscope Keyence d'une zone fissurée sur le mur ausculté	151
Figure IV-20 : Vitesse des ondes de surface en fonction de la teneur en eau pour différentes compositions de béton (différents rapports E/C), d'après Abraham et al [2012]	152
Figure IV-21 : Résultats obtenus a) après inversion sur les vitesses et b) après conversion de la vitesse transversale en saturation	153
Figure A.IV.2.4.2a: Exemples de vitesse et densité pour différentes roches [Mari et al – 1998]	155
Figure A.IV.2.4.2b: Ordre de grandeur du coefficient de Poisson pour différents types de roche (d'après Lavergne, 1986) [Mari et al – 1998]	155

Figure A.IV.2.4.2c:	Ordres de grandeur du coefficient de Poisson en fonction de V_P et V_S exprimées en m/s. La densité est notée d [Mari et al – 1998]	156
Figure A.IV.2.4.2d:	Évolution de la vitesse des ondes P avec le degré de saturation dans différents calcaires [Berest et al – 2000]	156
Figure A.IV.2.4.2e:	Résultats de l'inversion des courbes de dispersion de vitesse pour chaque étape d'imbibition du bloc calcaire : [haut] chaque courbe brute avec ses écart-types ; [bas] chaque courbe brute avec la courbe lissée associée	157
Figure A.IV.3.3:	Résultats de l'inversion des courbes de dispersion de vitesse pour chaque étape d'arrosage du mur d'essai : [haut] chaque courbe brute avec ses écart-types ; [bas] chaque courbe brute avec la courbe lissée associée	158
Figure V-1 :	[gauche] Exemple de mesure optique de l'ouverture d'une fissure ; [droite] exemple de suivi de l'évolution d'une fissure grâce à un capteur potentiométrique	164
Figure V-2 :	Photo de la presse utilisée, avec une éprouvette instrumentée	165
Figure V-3 :	a) Test de suivi de l'endommagement diffuse et de la transition à l'endommagement homogène; b) Test d'ouverture et fermeture de fissure d'une éprouvette de dimension $250 \times 25 \times 12 \text{ cm}^3$ chargée en flexion 3 points ; c) Essai de fissuration sur une dalle de béton mise en flexion 3 points [Garnier et al – 2016]	166
Figure V-4 :	Maquette d'une enceinte de confinement développée par EDF: VeRCoRs....	166
Figure V-5 :	Photos de l'éprouvette de béton (formulation VeRCoRs) avec le scanner HF installé sur l'une de ses plus grandes surfaces a) mise sous bâti ; b) installée sous presse	168
Figure V-6 :	a) Exemple de B-scan en échelle de gris pour une mesure avec le transducteur 50 kHz ; b) transformation Slant Stack de la courbe de dispersion de vitesse ; c) courbe de dispersion résultant de la combinaison des 3 courbes dans les bandes 50, 75 et 200 kHz ; d) courbe d'atténuation résultant de la combinaison des 3 courbes dans les bandes 50, 75 et 200 kHz	168
Figure V-7 :	Évolution de a) la vitesse de groupe et de b) l'atténuation des ondes de surface sur une dalle de béton soumise à une compression simple ; c) évolution de la vitesse de groupe du transducteur 150 kHz en fonction de la température d'étuve (lorsque les dalles ont été dégradées thermiquement) ; d) évolution de l'atténuation avec le transducteur 150 kHz en fonction de la température d'étuve (lorsque les dalles ont été dégradées thermiquement)	169
Figure V-8 :	a) Schéma d'une onde de surface atteignant un obstacle acoustique ; b) réflexion d'onde et c) perte d'énergie (affaiblissement d'onde) ; {A,B,C,D,E} = points choisis pour paramétrer les observables définies	171

Figure V-9 :	a) Photo de la dalle sur ses points d'appui ; b) schéma du positionnement du robot sur la dalle et de la position de la fissure ; c) déroulé des différentes étapes de chargement de la dalle ; d) B-scan de l'étape P0 ; e) B-scan de l'étape Fiss1 ; f) B-scan de l'étape Fiss4	173
Figure V-10 :	a) Variations de l'amplitude du signal en fonction de la distance à la source pour chaque étape de chargement ; Variations b) du coefficient d'affaiblissement, c) du coefficient d'atténuation et d) de la vitesse de groupe (pour le transducteur centré sur 150 kHz) pour chaque étape de chargement, au cours d'un essai de flexion 3 points	174
Figure V-11 :	a) Schéma de la dalle dégradée thermiquement par une résistance chauffante puis soumise à une flexion 3 points ; b) B-scan de l'état 0 c) état fiss1.....	175
Figure V-12 :	a) Variations de l'amplitude du signal en fonction de la distance à la source pour chaque étape de chargement ; Variations b) du coefficient d'affaiblissement, c) du coefficient de réflexion, d) de la vitesse de groupe et e) du coefficient d'atténuation pour chaque étape de chargement, au cours d'un essai de flexion 3 points sur dalle endommagée thermiquement	175
Figure V-13 :	a) Presse utilisée pour la flexion 4 points ; b) photo du scanner HF et la source BF installés sur la poutre ; c) illustration schématique de la poutre et de la position de la fissure à l'issue du test ; d) photo de la fissure après la dernière étape de fissuration	176
Figure V-14 :	B-scans des étapes 1 et 6 de fissuration de la poutre, coefficient de réflexion de l'onde de surface et coefficient d'affaiblissement de l'énergie de l'onde de surface	178
Figure V-15 :	a) Photo de l'équipe présente au moment des tests sur l'enceinte VeRCoRS ; b) schéma de la structure de VeRCoRs ; c) photo de l'espace entre enceinte dans laquelle les mesures ont été effectuées	179
Figure V-16 :	a) Suivi temporel de la pression relative dans l'enceinte interne au cours de l'épreuve de mars 2017 ; b) accès à l'EEE pendant les épreuves	180
Figure V-17 :	a) Zone sans fissure T2 quadrillée choisie pour le contrôle non destructif des techniques proposées par le projet ENDE (les positions des mailles : $y = \{A,B,C\}$, $x = \{1,2,3\}$) ; b) le scanner HF en fonctionnement sur la zone choisie	181
Figure V-18 :	a) Vitesse en fonction de la longueur d'onde ($\lambda = 1 \dots 6$ cm) pour les mailles A1, B1 et C1 ; b) Atténuation pour les mailles A1, B1 et C1.....	182
Figure V-19 :	a) Vitesse de groupe des ondes de surface et la pression injectée dans l'enceinte interne en fonction du temps ; b) atténuation des ondes de surface et la pression injectée dans l'enceinte interne en fonction du temps	183
Figure V-20 :	a) Variation de vitesse obtenue au test de compression de la dalle (cf. V.2) .b) Vitesse de groupe des ondes de surface en fonction de la pression ; c) Variation d'atténuation obtenue au test de compression de la dalle (cf. V.2) ; d) atténuation des ondes de surface en fonction de la pression	184

Figure V-21 : a) Zone d'expérimentation « T3F », le repère utilisé, la position du profil inspecté ; b) le scanner basses fréquences installé sur le mur le long du profil inspecté	186
Figure V-22 : a) B-scan obtenu pour le profil; b) onde de surface extraite et redressée; c) mur de béton fissure inspecté, et les coordonnées du profil et des fissures; d) évolution de l'amplitude $A(x)$; e) Paramètre alpha local obtenu en fonction de la position du récepteur	187
Figure V-23 : Illustration de la recherche de la forme de l'enveloppe de chirp optimale, pour une bande fréquentielle B constante [15 kHz – 45 kHz] – a) B-scan d'un chirp [15 kHz – 45 kHz] avec l'enveloppe $W(t)$ gaussienne; b) spectre associé au signal; c) zone de longueurs d'onde émises; d) Transformation Slant-Stack de la dispersion de la vitesse; e) Comparaison des amplitudes pour les différents signaux et fenêtres testés ; f) Comparaison des niveaux de signal pour les différents signaux et fenêtres testés	188
Figure V-24 : Recherche de l'influence du choix de la bande fréquentielle pour le signal chirp de l'enveloppe Hanning – a) Les différentes bandes fréquentielles comparées ; b) Transformation Slant Stack de la dispersion de la vitesse pour l'un des signaux ; c) Comparaison des niveaux de signal pour les différentes bandes fréquentielles testées ; d) Comparaison des amplitudes des signaux pour les différentes bandes fréquentielles testées	189
Figure V-25 : Recherche de l'influence du type de tweeter – a) Comparaison des amplitudes des signaux pour le même signal émis à partir de tweeters différents ; b) Comparaison des niveaux de signal pour le même signal émis à partir de tweeters différents.....	189
Figure V-26 : Résultats obtenus à Vercors en mars 2017 et 2019 pour la phase montante de pression	192
Figure V-27 : Évolution du paramètre alpha local en fonction du temps pour les fissures à 39 cm, 61 cm, 107 cm et 130 cm (campagne de mesure sur VerCoRs en mars 2019, phase montante et descendante en pression)	193
Figure V-28 : Mesure du bruit de sifflement et corrélation avec la pression injectée	193
Figure V-29 : Investigation d'une fissure localisée à $x = 39$ cm au cours d'un test de pression; a) FO en fonction du temps pour cette fissure; b) évolution de la pression en fonction du temps; c) alpha local en fonction du temps pour cette fissure; d) corrélation entre FO et la pression pour les phases de montée et descente en pression; e) corrélation entre alpha local et la pression pour les phases de montée et descente en pression; f) corrélation entre alpha local et FO pour cette fissure ($x = 39$ cm).....	195
Figure V-30 : Alpha local pour les positions 61 cm et 107 cm ; les traces bleues indiquent la valeur « brute » ; les traces orange présentent alpha local après élimination des résultats pour lesquels le SNR n'était pas suffisant.....	195

Figure V-31 :	Vitesse d'onde de surface en fonction de la pression. Epreuves 2017, et 2019 ; la phase montante de pression	196
Figure V-32 :	Épreuves 2019 phase de montée en pression ; Observable : la vitesse en fonction de la pression et sa corrélation avec FO et alpha local pour la fissure à 39 cm	197
Figure A.V.2.2.1 :	B-scans des enregistrements correspondant aux phases P0-P4 et Fiss1 – Fiss4, étapes de fissuration et les courbes A(x)	199
Figure A.V.2.2.2 :	B-scans des enregistrements correspondant aux différents phases de fissuration E= [3, 4, 5, 6, 7, 10, 11], Affaiblissement W(E) et paramètre $\alpha_{local}(x,P)$	200
Figure A.V.3.2.1 :	Zone d'expérimentation T3V, le repère utilisé, la position du profil inspecté (noir); position et profondeurs des gaines de précontrainte (vert), fissures visibles (rouge), le repère utilisé pour les mesures Coda et Emission acoustique (rouge)	200
Figure A.V.3.2.2.1 :	Photo des 2 dalles utilisées pour les tests en laboratoire de génie civil	201
Figure A.V.3.2.2.2 :	Tweeters utilisés pour le scanner BF ; a) RBT-20 ; b) RBT-95 ; c) membrane cassée sur RBT-20 ; d) 4 RBT-20 associés sur une platine pour augmenter la puissance du signal émis ; e) AIR-MT	202
Figure A.V.3.2.2.3 :	Source tweeter RBT 20; Comparaison des récepteurs type BAT (celui utilisé dans le scanner HF) avec un microphone large bande (20 Hz – 50 kHz), et comparaison des géométries S et L pour l'orientation des tweeters.....	202
Figure A.V.3.2.2.4 :	a) Enregistrement le long de la dalle entière avec signal de Golay $f_c = 10$ kHz, $M = 2$, de bande BG = 2 kHz -18 kHz ; b) zoom du première zigzag ; c) l'onde directe extraite pour le traitement ; d) caractéristique de dispersion obtenue ; e) caractéristique de dispersion théorique (le mode A0 de l'onde de Lamb (noir trait plein) comparée à la caractéristique mesurée (noir pointillé) ; f) Longueurs d'onde obtenues.....	203
Figure A.V.3.2.2.5 :	a) Enregistrement sur un profil de 20 cm avec un signal de Golay pour le tweeter RBT-95 dans différentes bandes fréquentielles ; b) Les niveaux de signal obtenus	204
Figure A.V.3.2.2.6 :	a) Schéma de la section de mur auscultée ; b) photo de la source acoustique et du scanner BF au moment d'une mesure	204
Figure A.V.3.2.2.7 :	Géométrie détaillée de la zone de mesures	205
Figure A.V.3.2.3.3 :	a) Onde de surface obtenue sur le profil témoin 1, séquence n°1 ; b) transformation Slant-Stack moyennée pour toutes les profils ; c) Intervalle des longueurs d'onde atteintes ; d) Caractéristique de dispersion extraite de la section b) ; e) Spectres des signaux ; f) évolution de la vitesse moyenne de l'onde de surface	206

- Figure A.V.3.2.3.4 : a) Niveaux de signal des 21 signaux du test témoin 1 ; b) Amplitudes des 21 signaux du test témoin 1 ; c) Amplitudes normalisées des 21 signaux ; d) Fonction Δ appliquée aux signaux du test témoin 1 ; e) Activité des 21 signaux ; f) et g) alpha local pour le profil témoin 1 pour 2 seuils différents ; h) B-scan de l'un des tirs sur le profil témoin 1207
- Figure A.V.3.2.3.5 : Tracés de alpha local = l'écart à la courbe théorique d'amplitude de l'onde en fonction de la distance entre la source et le récepteur, pour chaque profil de a) la série de mesures témoin 1, AV = 8, b) la série de mesures témoin 2, AV = 32 et c) la série de mesures diffuseurs209
- Figure A.V.3.2.3.6 : Moyenne des courbes d'amplitudes normalisées de chaque série de profils, en fonction de la distance entre la source acoustique et le récepteur209

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Paramètres et réglages du scanner HF	50
Tableau I-2 : Caractéristiques techniques des transducteurs magnétostatiques utilisés dans cette étude	57
Tableau A.I.4.2 : Formes d'enveloppe, ondelettes de Klauder et formes temporelles des impulsions de type chirp et Golay ; tous les chirps ont été générés avec $f_{\min} = 20$ kHz, $f_{\max} = 50$ kHz, $f_c = 35$ kHz et avec une longueur d'impulsion $\tau = 1.5$ s.....	61
Tableau II-1 : Formulation du béton utilisé pour l'étude sur la lixiviation	73
Tableau II-2 : Paramètres et réglages du scanner	83
Tableau II-3 : Paramètres du programme Cloud utilisés pour l'inversion.....	97
Tableau II-4 : Résultats sur la profondeur de béton dégradé pour l'ensemble des méthodes utilisées	102
Tableau III-1 : Formulation du mortier utilisé pour l'étude sur la délamination	112
Tableau III-2 : Formulation du béton utilisé pour l'étude sur la délamination	114
Tableau III-3 : Paramètres et réglages du scanner.....	118
Tableau IV-1: Chronologie des mesures sur calcaire (identique pour les 2 dispositifs de mesure)	136
Tableau IV-2 : Paramètres du programme Cloud utilisé pour l'inversion.....	143
Tableau IV-3 : Chronologie des mesures acoustiques sur le mur d'essai.....	147
Tableau V-1 : Paramètres et réglages du scanner	167
Tableau V-2 : Observables ENDE associées aux les mesures	169
Tableau V-3 : Paramètres et réglages du scanner	177
Tableau V-4 : Description des étapes de chargement et remarques sur l'essai de fissuration 4 points	177
Tableau V-5 : Paramètres et réglages du scanner	181
Tableau V-6 : Paramètres et réglages du scanner BF pour l'expérience de la figure V-22	186
Tableau A.V.1 : Paramètres et réglages du scanner ; caractéristiques des signaux émis	206

Introduction générale

Ce travail de thèse a été possible grâce à la collaboration de deux équipes de recherche de l'École Centrale de Lille. L'une est spécialisée dans la propagation d'ondes acoustiques (Pr. Piwakowski) et l'autre dans l'expérimentation sur les géomatériaux dont le béton fait partie (Pr. Skoczylas). Une grande part de l'originalité de ce travail vient de l'association de ces deux équipes qui, chacune, ont pu s'enrichir mutuellement de leur expérience propre.

Le contrôle non destructif (CND) des ouvrages structuraux en béton est un challenge et un axe de recherche en pleine expansion. C'est un challenge car la structure est massive, hétérogène et son matériau constitutif, le béton, est complexe et en constante évolution. Il est très sensible aux conditions environnementales : humidité, température, chlorures, CO₂... La variation de celles-ci peut dans bien des cas être aussi néfaste au matériau qu'un chargement excessif (fissuration hydrique par exemple). Le béton n'est jamais utilisé seul mais en association avec des barres d'acier pour le renforcer. Le vieillissement de la structure est bien souvent lié à la corrosion des armatures qui entraîne très vite écaillage et délamination. Une opération efficace de CND devrait permettre d'avoir un état des lieux et de donner au maître d'ouvrage un argumentaire pour décider d'une réparation spécifique, d'un renforcement et au pire un abandon/destruction. En parallèle, si le CND est appliqué en suivi régulier, il doit permettre de prolonger considérablement la durée de vie de l'ouvrage. On conçoit ainsi que, pour des propriétaires de parc immobiliers et sensibles tel EDF, le CND est une option intéressante pour la gestion et le suivi de tels parcs.

Notre travail s'inscrit dans cette démarche avec l'emploi d'appareillages, mis au point par B. Piwakowski, qui utilisent des ondes acoustiques sans nécessité de contact. L'étude proposée a été soutenue par la société EDF qui doit faire face à l'évaluation de dégradations du type lixiviation dans certains de ses ouvrages. Elle ne se limite cependant pas à cette seule pathologie et d'autres champs d'application de la méthode acoustique ont été investigués : la délamination, la fissuration et l'effet de la saturation. Ce dernier aspect n'est pas à proprement parlé une dégradation mais il est admis qu'elle représente un état hydrique du matériau béton qui conditionne sa perméabilité (au gaz en particulier), l'intensité du fluage, le fluage de dessiccation et les retraits de dessiccation à l'origine d'effets structuraux plus ou moins délétères.

Dans ce contexte les objectifs de la thèse sont les suivants :

Évaluer la possibilité de détecter et quantifier la lixiviation, la fissuration, la délamination d'un béton et estimer la saturation du matériau à l'aide d'une technique ultrasonore automatisée sans contact basée sur les ondes de surface.

Ces objectifs ont été réalisés dans les cinq chapitres de ce manuscrit.

Le premier chapitre présente une revue des méthodes principalement utilisées actuellement en contrôle non destructif. La majorité de celles-ci sont capables de conclure sur l'état de la surface de béton auscultée, sur la caractérisation de l'implantation des armatures, sur l'état hydrique du béton ou sur la présence de cavités ou fissures dans le béton mais peu d'entre elles permettent d'obtenir plusieurs informations à elles seules. Certaines présentent des contraintes techniques lourdes concernant le contrôle non destructif de vastes structures, comme l'impossibilité pratique d'automatiser la mesure, ou encore la nécessité d'un contact physique entre le ou les actuateurs ou capteurs et la surface contrôlée. L'objectif du chapitre est de présenter une méthode acoustique sans contact avec la surface auscultée, répondant aux critères du CND et automatisable.

Le deuxième chapitre présente une étude sur la lixiviation du béton. L'objectif est d'évaluer la capacité de la technique acoustique CND à détecter la lixiviation du béton, notamment la profondeur de la couche de matériau lixivié en la comparant à d'autres techniques, destructives, développées en laboratoires.

Le troisième chapitre traite de la délamination du béton. L'objectif est de tester plusieurs simulations de délamination, observer lesquelles sont détectées par la technique CND proposée, et déterminer celle qui correspond le plus à une délamination réelle.

Le quatrième chapitre aborde la détection de la saturation dans un matériau homogène, le calcaire, puis dans le béton, plus hétérogène. L'objectif est de détecter un front de saturation dans un matériau exposé à un arrosage sur l'une de ses surfaces, et de voir dans quelle mesure il est possible de remonter à un profil de saturation en fonction de la profondeur grâce à la technique CND acoustique sans contact.

Enfin le cinquième chapitre traite de la détection d'une fissure ou d'une zone microfissurée avec cette technique CND. L'objectif est notamment de détecter la création ou la présence d'une fissure, et de suivre son évolution si elle a lieu. Ce chapitre a la particularité de présenter des résultats obtenus in situ sur une structure fissurée.

Chapitre I

Contexte et solution technique adoptée

I.1 Introduction - Pathologies du béton

De nombreuses altérations du béton sont responsables de dégradations progressives, pouvant mener à terme à une fragilisation importante de la tenue mécanique d'ouvrages en béton/béton armé, et enfin à la ruine si aucune démarche de restauration n'est mise en place.

Parmi elles, on peut citer la création et la propagation de fissures et de zones microfissurées (comme illustré sur la figure I-1), issues de mécanismes tels que le retrait du béton et le fluage sous conditions de service, ou encore issues de dépassements des chargements autorisés dans la structure sous conditions exceptionnelles. Le processus cyclique de gel-dégel est également une importante source de gonflements du béton, avec créations de zones microfissurées et de fissures. La fissure crée une rupture mécanique dans la matière, ce qui entraîne un changement dans la répartition des contraintes au sein du matériau [Ollivier – 2008a].

On peut également citer la diffusion dans le béton d'agents réactifs avec certains constituants du béton, perturbant son équilibre chimique.

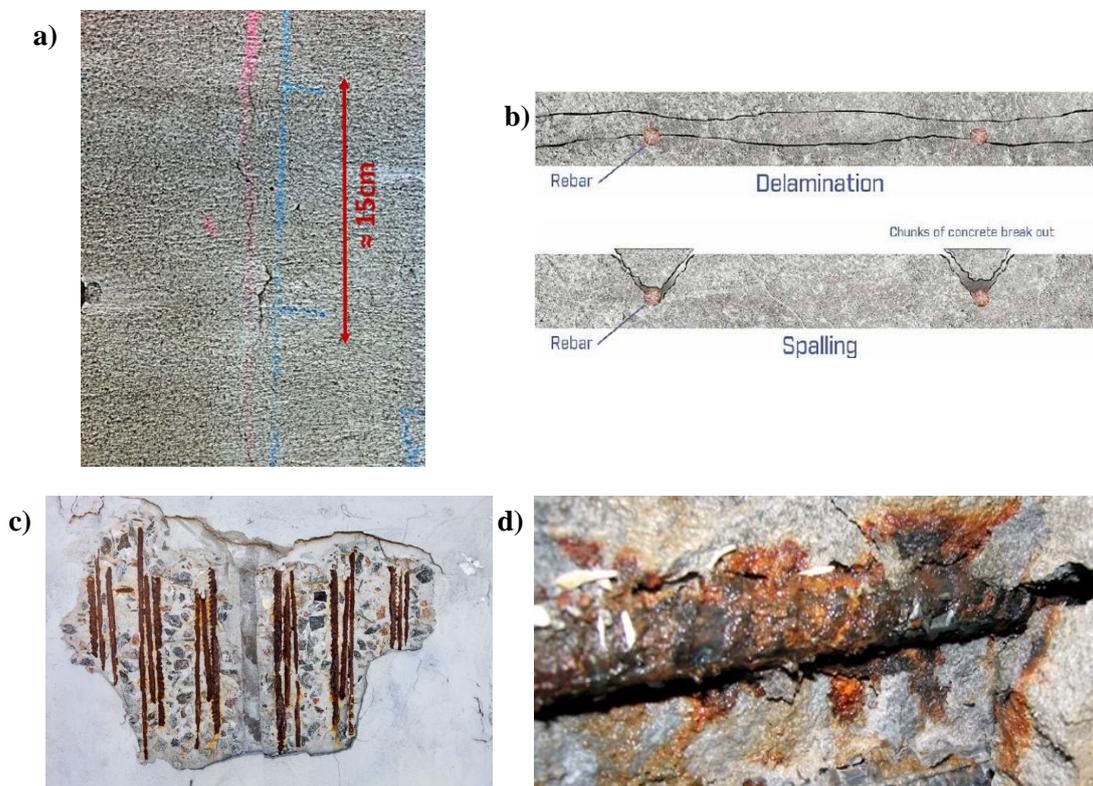


Figure I-1 : a) Fissure présente sur l'extrados d'une soufflerie du site de Toulouse de l'ONERA ; b) délamination de 2 couches de béton et épaufrures de béton à partir des armatures d'acier ; c) détérioration de la surface du béton causée par le lessivage (lixiviation) progressif du béton par l'eau de pluie ; d) éclatement du béton dû à la corrosion des armatures d'aciers

Par exemple, le CO_2 atmosphérique tend à se dissoudre dans la solution interstitielle pour former des ions carbonates, qui vont eux-mêmes causer la dissolution des hydrates de la pâte cimentaire. Il s'agit du phénomène de carbonatation. Cela va entraîner une acidification du milieu interstitiel du béton, et lorsqu'il s'agit du béton enrobant les armatures d'acier, ces dernières, auparavant protégées par un pH interstitiel très basique, sont dépassivées et entament un processus de corrosion. Les produits issus de la corrosion sont plus poreux que les réactifs, ce qui accélère d'autant plus la réaction. Ces produits sont également plus volumineux que les réactifs, ce qui entraîne une fissuration autour des armatures, et à termes un éclatement du béton d'enrobage [Ollivier – 2008a] (voir Fig. I-1d).

Lorsqu'un béton est mis en contact avec une source suffisamment concentrée d'ions chlorure, ces derniers peuvent de même progresser par diffusion dans le béton, et au-delà d'une concentration critique d'ions chlorure au niveau des armatures, la dépassivation se produit également, avec les mêmes conséquences que pour la carbonatation [Ollivier – 2008c].

Une exposition du béton à un milieu plus acide (dont le pH est par exemple inférieur à 9) va entraîner une dissolution successive des composants de sa pâte cimentaire, en commençant par la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), puis par les silicates de calcium hydratés. Cette dissolution va créer de nombreuses porosités dans la pâte cimentaire, et donc dans le béton, comme illustré sur la figure I-2. Il s'agit du phénomène de lixiviation du béton [Carde – 2007]. Lorsque ce béton plus poreux est au contact des armatures, celles-ci sont presque directement accessibles à l'environnement extérieur du béton, les rendant ainsi à nouveau vulnérables aux sources diverses de corrosion [Ollivier – 2008b].



Figure I-2 : Vue en coupe sous microscope de l'attaque acide de la pâte cimentaire [Pabalan – 2011]

D'autres réactions chimiques produisant sensiblement les mêmes effets physiques vus précédemment ont lieu au sein du béton, tels que les réactions alcali-granulats et les réactions sulfatiques.

Tous les mécanismes détaillés ci-dessus ont lieu suivant des cinétiques de diffusion des agents extérieurs au sein du béton. Il s'agit donc de mécanismes pouvant être très lents (plusieurs dizaines d'années pour qu'un béton d'enrobage soit lixivié jusqu'aux armatures par une solution d'eau déminéralisée, par exemple). Leurs cinétiques sont cependant considérablement accélérées lorsque le béton est fissuré, dans la mesure où la fissure connecte le milieu extérieur au béton de cœur.

D'un point de vue plus global, la fissuration et l'augmentation de porosité seront donc les conséquences les plus visibles des processus de dégradation décrits plus haut. Il est clair que ceux-ci vont affecter les propriétés mécaniques du matériau (et/ou photomécaniques), en particulier le module d'Young et les propriétés de transfert. Les méthodes de contrôle non destructif (communément abrégé en CND) dont l'application constitue la ligne directrice de cette thèse devraient ainsi être sensibles à ces variations.

I.2 Techniques de Contrôle Non Destructif du béton

Les circonstances de dégradation du béton exposées ici occasionnent une diminution conséquente de la durée de vie des structures en béton armé. Il devient dès lors indispensable de contrôler l'état du béton des structures, ainsi que l'interface entre le béton et ses armatures pour déclencher des processus de maintenance et/ou prévoir une durée de vie résiduelle des ouvrages. Il existe des méthodes de laboratoire permettant de déterminer la profondeur de béton d'enrobage attaquée par les agents extérieurs cités précédemment. Un indicateur coloré (la phénolphtaléine dans l'immense majorité des cas) permet par exemple de savoir quelle partie du béton est encore très alcaline (et donc à priori intacte) et quelle partie est plus acide que le pH du milieu interstitiel normal (ce qui indique des réactions défavorables à la tenue du béton). Malheureusement, non seulement ces techniques ne permettent pas de localiser les défauts, mais en plus elles nécessitent le carottage du béton de la structure elle-même afin de pouvoir l'analyser par la suite. Une telle démarche n'étant pas envisageable si l'on souhaite assurer la pérennité de la structure et non l'aggraver, des méthodes de contrôle non destructif ont été proposées au cours des dernières décennies. Ces méthodes ont différents objectifs : certaines méthodes permettent de caractériser le béton (sa porosité, sa perméabilité, son module d'élasticité, sa teneur en eau), d'autres permettent de détecter des défauts (les fissures, la microfissuration, les zones délaminées, les poches d'air).

Différentes échelles de la structure peuvent être examinées par ces méthodes non destructives, c'est pourquoi nous allons les aborder successivement, en commençant par les méthodes permettant d'analyser l'état de surface de la paroi d'une

structure, en poursuivant avec les méthodes permettant de détecter et localiser les armatures d'acier présentes généralement au niveau de la peau du béton, en continuant avec les méthodes permettant de caractériser l'état hydrique du béton, puis en terminant avec une présentation des différentes méthodes acoustiques existantes.

I.2.1 Méthodes CND : informations sur l'état de surface

Ces méthodes permettent de détecter des défauts ou anomalies visibles sur l'une des faces d'une structure. Certains défauts détectables en surface sont les signatures d'un développement du défaut beaucoup plus important au sein même du matériau, et alertent sur la durée de vie d'un ouvrage. C'est pourquoi l'une des premières étapes d'auscultation d'ouvrage est en principe l'**inspection visuelle** de la surface. Une première observation générale de la surface doit pouvoir permettre de détecter des variations dans la topographie de la surface auscultée, pouvant par exemple indiquer un déficit de matière. On peut également détecter visuellement des anomalies de couleur du matériau, comme l'apparition d'une couleur rouille, pouvant indiquer un état de corrosion avancé des armatures les plus proches du point d'inspection. Il est aussi possible de détecter la présence d'une fissure en surface, et de constater sa largeur par exemple.

De manière générale, l'inspection visuelle est utile pour repérer des singularités assez grossières présentes à la surface. Si l'on souhaite connaître les irrégularités de la surface avec plus de précision, il existe d'autres méthodes plus complexes.

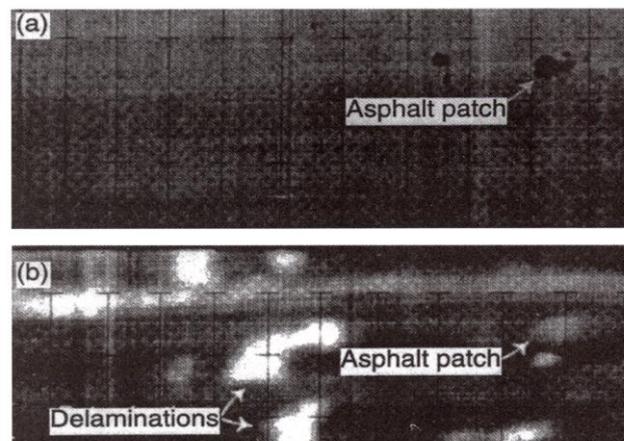


Figure I-3 : Thermographie infrarouge : a) photographie du béton d'un tablier de pont ; b) imagerie infrarouge du tablier de pont permettant de localiser les zones délaminiées

La **thermographie infrarouge** (Larget – 2011) se base sur une imagerie de la surface fait à partir du rayonnement infrarouge de cette surface. Seul un dispositif d'imagerie infrarouge est nécessaire. Un matériau uniforme doit donner une image uniforme, tandis qu'un matériau présentant des défauts directement en surface ou

dans une couche de faible épaisseur sous la surface doit donner une image présentant des disparités, dans la mesure où le flux thermique à l'intérieur du matériau sera altéré par les défauts, comme illustré sur la figure I-3. Utilisée dans les conditions citées, la méthode sera dite passive. On peut également utiliser la thermographie infrarouge active en utilisant une source de chaleur qui va exciter thermiquement le matériau. Une imagerie de la variation relative de rayonnement infrarouge permet ensuite de détecter les défauts avec une plus grande précision que la méthode passive.

Une autre méthode d'inspection de surface existe : le **contrôle par ressuage**. Cette méthode est cependant spécifique à la détection de fissures débouchant en surface. Pour cela, on applique un produit appelé produit pénétrant sur toute la surface que l'on souhaite ausculter. On nettoie ensuite la surface afin de se débarrasser du produit qui n'a pas pénétré, puis on applique un révélateur, qui est la plupart du temps une poudre, afin de ne laisser visible que les endroits où le produit a pénétré, permettant ainsi de localiser les fissures débouchantes. Le produit pénétrant utilisé est généralement un produit pétrolier, coloré ou fluorescent suivant que l'on observe la surface sous lumière naturelle ou sous lumière ultraviolette.

I.2.2 Méthodes CND : informations sur les armatures d'acier

Ces méthodes permettent d'obtenir des informations sur l'emplacement des armatures par rapport à la surface, ainsi que la profondeur à laquelle elles sont implantées. Quand bien même ces méthodes ne sont pas considérées comme étant du contrôle non destructif (car donnant uniquement une information sur l'emplacement d'armatures au sein du béton), elles donnent des informations importantes menant au contrôle non destructif avec d'autres méthodes CND.

Le **pachomètre** est une méthode électromagnétique qui rend accessible l'ensemble de ces informations. Un champ magnétique de basse fréquence variable dans le temps est appliqué à une bobine électromagnétique. Cette bobine est placée sur la surface de béton et est déplacée afin de balayer toute la surface. Lorsqu'elle passe au-dessus d'un matériau conducteur tel qu'une armature, des courants de Foucault sont créés par induction. Ces courants vont eux-mêmes générer un champ magnétique opposé au champ magnétique à l'origine de ces courants. La bobine émettrice va mesurer la variation de champ magnétique et ainsi identifier l'armature. Divers paramètres issus de la variation du champ magnétique mesuré permettent de connaître le diamètre de l'armature et sa profondeur d'implantation. Une autre méthode plutôt polyvalente est l'utilisation de **systèmes radars (GPR)**. Un radar est le plus souvent composé d'une antenne émettrice et d'une antenne réceptrice, même si parfois une antenne joue les 2 rôles.



Figure I-4 : Utilisation d'un pachomètre pour détecter les armatures dans le béton armé

Ces antennes émettent et reçoivent des ondes électromagnétiques, qui se propagent dans le milieu que l'on souhaite ausculter. Au cours de leur propagation, ces ondes s'atténuent suivant que le milieu qu'elles traversent est plus ou moins atténuant pour ces ondes, et elles se réfléchissent également quand elles rencontrent des obstacles. La permittivité diélectrique d'un matériau est sa capacité à se laisser traverser par un champ électrique. Ainsi quand une onde électromagnétique traverse un milieu, c'est ce paramètre qui déterminera, par exemple, l'atténuation de l'amplitude de l'onde (hors dispersion spatiale de l'onde). De plus, lorsqu'une onde électromagnétique rencontre une interface et que les 2 milieux la composant possèdent des permittivités très différentes, l'onde est réfléchi. L'onde sera également réfléchi si elle rencontre un matériau conducteur. La permittivité relative d'un matériau est un paramètre sans dimension défini à partir de la permittivité absolue du vide ϵ_0 et la permittivité absolue du matériau:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{I-1})$$

ϵ_r étant la permittivité relative et ϵ la permittivité absolue du matériau.

Ainsi le béton ayant une permittivité relative comprise entre 10 et 20 (suivant son taux d'humidité) et celle de l'air valant 1,0006, l'interface entre le béton et l'air provoque une réflexion de l'onde, de même que l'interface entre le béton et l'acier d'une armature. Ce paramètre affecte également la vitesse de propagation de l'onde, dans la mesure où plus la permittivité relative est élevée, moins l'onde est rapide.

L'exploitation de cette propriété permet ainsi de détecter des armatures d'acier et de déterminer leur profondeur d'implantation. Cette technique est bien maîtrisée et est beaucoup employée comme technique CND pour ces usages.



Figure I-5 : a) Imagerie radar (Ground Penetrating Radar) d'un sol de béton armé (source : société MDC) ; b) photo de l'utilisation de la technique GPR

Des ondes électromagnétiques de très hautes fréquences (rayons X ou rayons gamma) peuvent également être utilisées dans le cadre de la **radiographie** (voir figure I-5). Ces ondes sont générées par une source (dont on fait changer le niveau d'énergie de ses électrons pour générer les ondes), traversent le matériau à ausculter et sont réceptionnées par un film photographique (sensible aux rayonnements X ou gamma) ou par des technologies plus récentes telles que les écrans radio luminescents à mémoire ou les capteurs plans.

Cette technique fera apparaître l'emplacement des armatures d'acier sur l'écran récepteur. Elle nécessite cependant d'avoir accès à chaque face de l'élément que l'on souhaite ausculter.

I.2.3 Méthodes CND : informations sur l'état hydrique du matériau

La détection des gradients d'eau présents dans le béton peut être très utile pour le contrôle des structures, car les zones les plus saturées sont les zones dans lesquelles les ions ont le plus de facilité à circuler, et ainsi à provoquer la corrosion. L'indication d'une forte teneur en eau peut également être le signe d'une porosité plus importante et de la présence de microfissuration.

La **méthode radar** citée précédemment est sensible à la teneur en eau par le fait que la permittivité diélectrique l'est, comme le montre le graphe de la figure I-6.

Une **méthode capacitive** existe et, bien que de courte portée, permet d'identifier de tels gradients. Elle repose sur le principe de la mesure de la permittivité diélectrique par l'intermédiaire de la fréquence de résonance d'un circuit oscillant. Le circuit est composé de 2 électrodes placées sur la surface à ausculter, plus ou moins espacées selon que l'on souhaite avoir des informations à plus ou moins grande profondeur, ainsi que le béton qui agit comme conducteur. Cette fréquence de résonance va dépendre de plusieurs facteurs mais elle sera particulièrement sensible à la teneur en

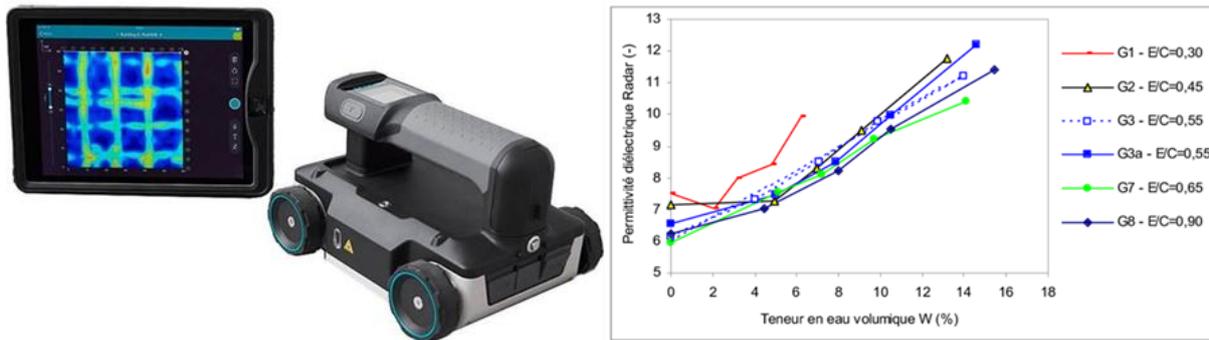


Figure I-6 : [gauche] Exemple d'un appareil radar utilisé sur les structures en béton ; [droite] évolution de la permittivité diélectrique en fonction de la teneur en eau, mesurée par méthode radar pour différents rapports Eau/Ciment dans un béton [Villain – 2008]

eau libre, dans la mesure où la conductivité de l'eau dépasse largement la conductivité de la plupart des constituants du béton, d'autant plus que l'eau présente au contact du béton peut être particulièrement chargée en ions.

D'autres techniques similaires à la technique capacitive existent pour identifier et localiser les gradients d'eau. On peut notamment citer une méthode basée sur le principe de la mesure de **résistivité électrique** pour identifier les gradients d'eau, les zones de plus fortes porosités ou les zones microfissurées, et finalement pour localiser les zones ayant un haut risque de corrosion. On utilise pour cela 4 électrodes placées alignées sur la surface de béton. La plupart des configurations utilisées espacent les électrodes de la même distance a (configuration Wenner, voir figure I-7). Les électrodes aux extrémités injectent un courant I dans le béton, ce qui va générer un champ de potentiel électrique dans le matériau, et le voltmètre placé au niveau des électrodes centrales va mesurer une différence de potentiel V , que l'on reliera ensuite à la résistivité du béton et au courant injecté par une loi d'Ohm adaptée à cette configuration :

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (\text{I-2})$$

où ρ désigne la résistivité du béton.

On considère que la couche de béton traversée par les lignes de courant dans cette configuration possède une épaisseur égale à a . Ainsi en faisant varier l'écartement entre les électrodes, on fait varier la profondeur d'auscultation, ce qui permet d'identifier les couches les moins résistives, et donc a priori celles qui contiennent une plus forte teneur en eau.

À titre d'illustration, une eau saline (donc ionique) a une résistivité avoisinant $2,0 \cdot 10^1 \Omega \cdot \text{cm}$, celle d'un béton relativement humide (20°C , Humidité Relative HR = 80%) est comprise entre $200 \Omega \cdot \text{m}$ et $500 \Omega \cdot \text{m}$, tandis que celle d'un béton plus sec (20°C , HR = 50%) est supérieure à $3000 \Omega \cdot \text{m}$ [Nguyen – 2016].

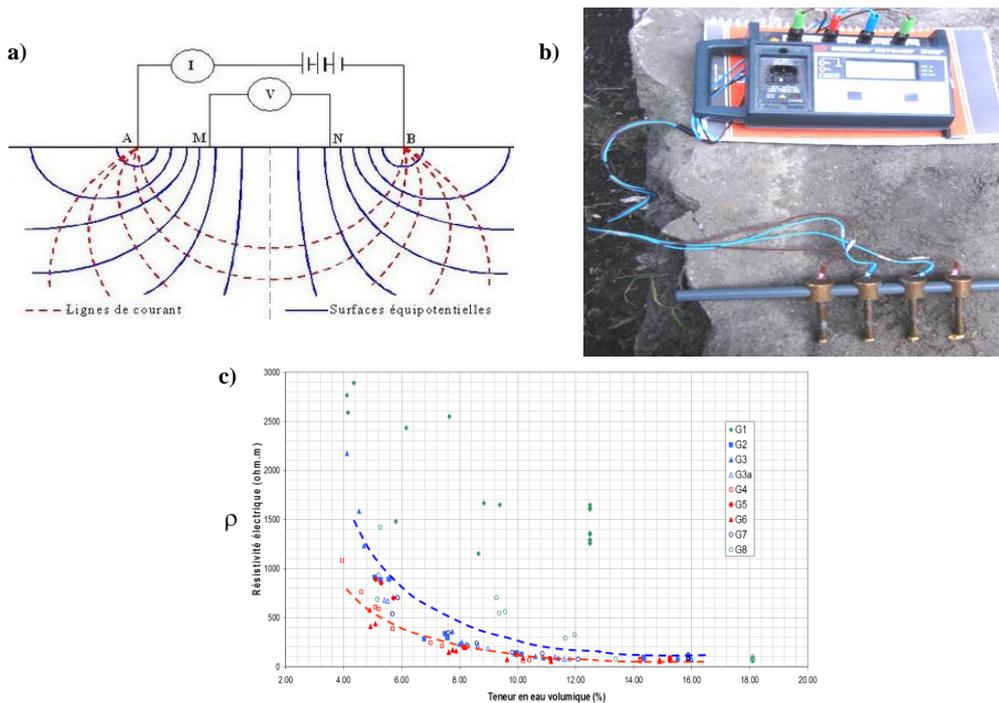


Figure I-7 : a) Schéma de principe de mesure de résistivité (configuration Wenner) ; b) sonde sur la surface de béton ; c) évolution de la résistivité en fonction de la teneur en eau pour différents bétons [SENSO – 2009]

Il est enfin possible de déterminer les zones à haut risque de corrosion par la mesure d'un **potentiel de corrosion** [Deus et al – 2012]. Il faut pour cela avoir un accès à l'acier d'une armature. Cette méthode consiste à placer une électrode de référence (comme l'électrode $\text{Cu}_{(s)}/\text{CuSO}_{4(aq)}$, de potentiel +316mV par rapport à l'électrode ESH à 25°C) sur le béton au-dessus de l'armature que l'on souhaite tester. On mesure ensuite avec un voltmètre la différence de potentiel entre l'armature et l'électrode de référence. Le schéma de la figure I-6 illustre ce protocole. Le gradient d'humidité, la température et l'épaisseur d'enrobage de l'armature affectent ainsi la différence de potentiel mesurée, et le potentiel d'armature obtenu est ensuite comparé à des valeurs de référence consignées dans des normes (ASTM C-876-91), donnant une indication sur la corrodabilité de l'armature en question.

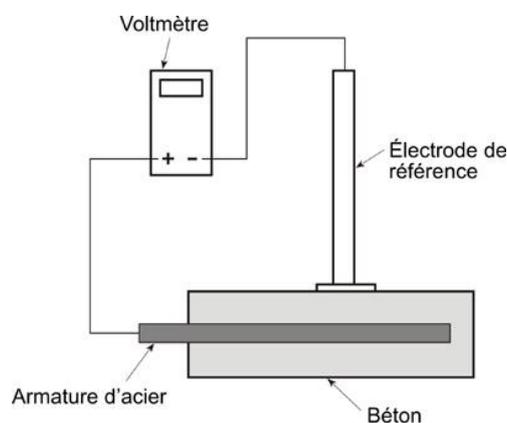


Figure I-8 : Schéma de principe de la mesure de potentiel de corrosion

I.2.4 Méthodes CND fondées sur l'utilisation des ondes acoustiques

L'objectif principal des méthodes non destructives appliquées au béton présentées dans les paragraphes précédents est de fournir une évaluation de la qualité du matériau, quels que soient son âge et son état de dégradation. Parmi ces méthodes, le contrôle par ultrasons occupe une place importante grâce à sa commodité d'emploi et à son coût raisonnable.

Le principe général des mesures ultrasonores consiste à générer et recevoir une onde acoustique. Les signaux ainsi enregistrés peuvent servir ensuite deux objectifs : la caractérisation de la matière et la détection de défauts. La caractérisation de la matière consiste à considérer un volume localement homogène et obtenir des informations sur certains paramètres mécaniques comme le module d'élasticité E , la porosité etc. Très souvent, ces indicateurs sont déduits à partir de la vitesse et de l'atténuation de l'onde. La détection des défauts dans les structures auscultées consiste à détecter les vides locaux, les fissures, les délaminations, les défauts de soudures, etc. Pour cet objectif, on fait appel aux méthodes d'imagerie (l'imagerie médicale utilise le même principe) où le traitement est orienté vers le positionnement et la caractérisation des anomalies (défauts) recherchées.

Les méthodes acoustiques ont été largement documentées ([Perdijon – 1993 ; Krautkrämer – 1990]), de même en ce qui concerne le CND du béton ([Balayssac et Garnier – 2018 ; Garnier et al – 2013]). Elles peuvent être classées en fonction du type d'accès et du type de contact avec la structure auscultée. On peut distinguer trois types de méthodes :

- Les méthodes en contact, illustrées sur la figure I-9, pour lesquelles l'émetteur et le récepteur sont en contact physique avec la matière auscultée ; on utilise généralement un produit couplant [Krautkrämer – 1990] ; l'utilisation de couplant risque de modifier le béton (car il est absorbé) et augmente considérablement le temps de mesure
- Les méthodes sans contact [Kaczmarek et al – 2016 ; Chimenti – 2014 ; Remillieux et al – 2014], illustrées sur la figure I-10, pour lesquelles l'émetteur et le récepteur n'ont pas de contact physique avec la matière auscultée, le produit « couplant » n'est donc pas nécessaire (on peut dire que l'air joue le rôle de couplant) ; ces méthodes se sont développées au cours des dernières années et leur principal avantage est le déplacement facile et rapide du dispositif de mesure, ce qui facilite grandement l'automatisation de la mesure ; pour l'émetteur on utilise généralement un laser impulsif d'émission ou un transducteur piezo-céramique avec couplage à l'air ; pour le récepteur on utilise

un interféromètre laser, un transducteur piezo-céramique avec couplage à l'air ou un microphone large bande

- Les méthodes en semi-contact (figure I-11), pour lesquelles la source ou le récepteur est en contact avec le matériau ; elles trouvent leur applications dans le Génie Civil ([Zhu et Popovics – 2001 et 2005 ; Popovics et Wiggenhauser – 2002 ; Hosten et al – 1996 ; Popovics et al – 2000 ; Ryden et al – 2004 ; Abraham et al 2012])

En suivant cette classification, la technique CND utilisée dans cette thèse appartient au groupe sans contact (Fig. I-10) et est particulièrement basée sur l'utilisation d'ondes de surface et d'ondes de plaque. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons nous limiter à détailler uniquement les informations nécessaires à la compréhension des techniques acoustiques utilisées dans cette thèse.

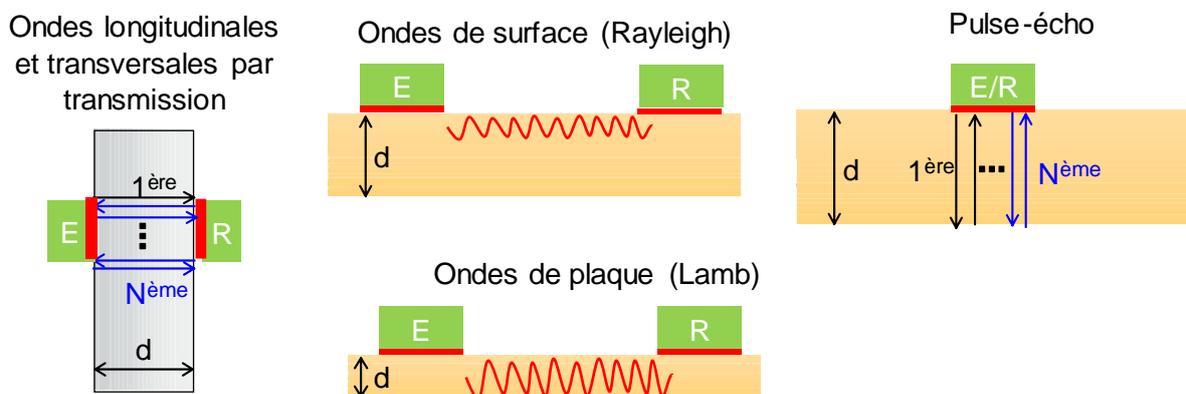


Figure I-9 : Illustration de différentes méthodes acoustiques en contact ; E et R indiquent l'émetteur et le récepteur

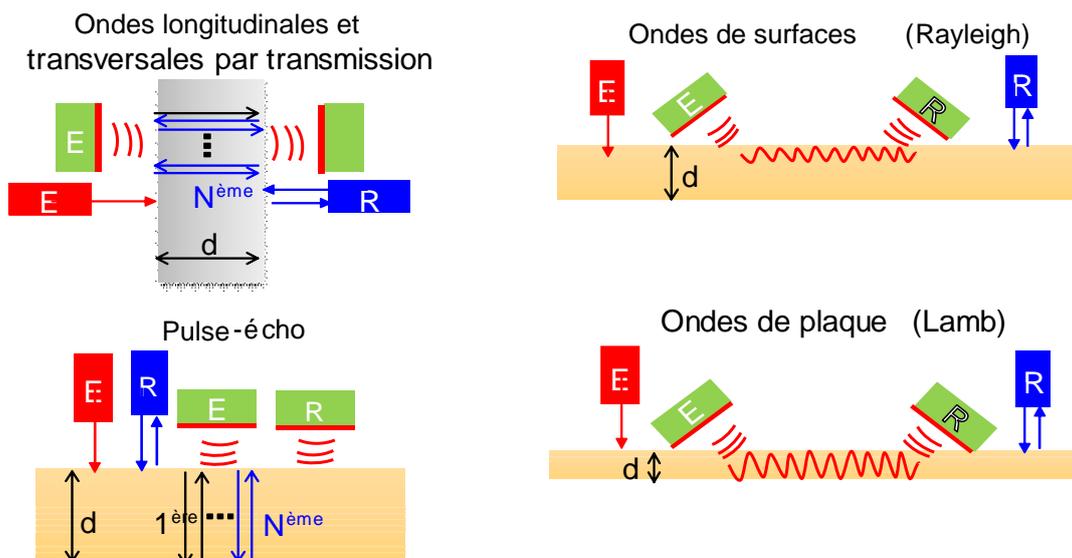


Figure I-10 : Illustration de différentes méthodes acoustiques sans contact ; les symboles E et R de couleur verte indiquent l'émetteur et récepteur électroacoustiques ; les symboles E et R en couleur rouge et bleu indiquent l'émetteur laser et l'interféromètre laser

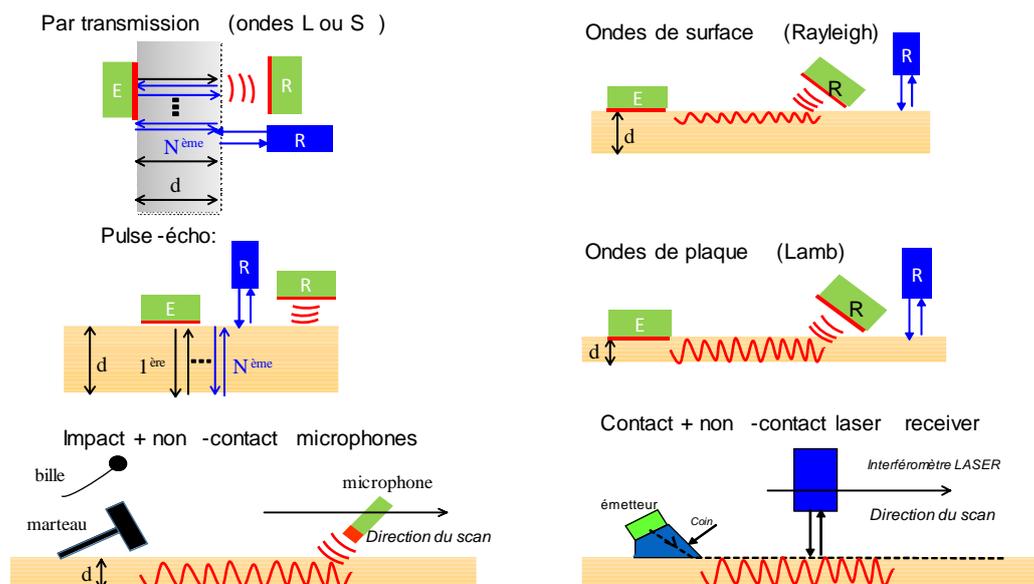


Figure I-11 : Illustration de différentes méthodes acoustiques en semi-contact ; les symboles E et R de couleur verte indiquent l'émetteur et récepteur électroacoustiques ; les symboles E et R en couleur rouge et bleu indiquent l'émetteur laser et l'interféromètre laser

I.3 Généralité sur les ondes acoustiques utilisées

La méthode non destructive proposée dans cette thèse utilise des ondes acoustiques de surface, ainsi que des ondes de plaque. C'est une méthode sans contact avec la surface à ausculter, illustrée sur la figure I-10. Ce sont la vitesse et l'atténuation de l'onde ainsi que ses propriétés dispersives qui permettent de caractériser le matériau puis d'obtenir des informations sur la variation des propriétés mécaniques sur la profondeur. Cette partie va détailler les différentes ondes mécaniques manipulées, ainsi que leurs propriétés utilisées dans cette étude.

I.3.1 Ondes acoustiques (mécaniques)

Une onde mécanique désigne la perturbation locale d'un milieu matériel. Elle sera dite progressive si la perturbation se propage dans le milieu, comme l'illustre la figure I-12.

Si le mouvement de la matière dû au passage de l'onde se fait parallèlement au sens de propagation de l'onde, on parlera d'onde longitudinale (L sur la figure). Si ce mouvement se fait perpendiculairement au sens de propagation de l'onde, elle sera dite transversale S (appelée aussi onde de cisaillement). Les ondes longitudinales et transversales sont appelées les ondes de volume et leurs vitesses sont notées V_L et V_S . Un troisième type d'onde se propage à la surface libre d'un solide et est appelé onde de surface (OS), sa vitesse est notée V_{OS} . Cette onde pénètre le solide jusqu'à une profondeur d proche de la longueur d'onde.

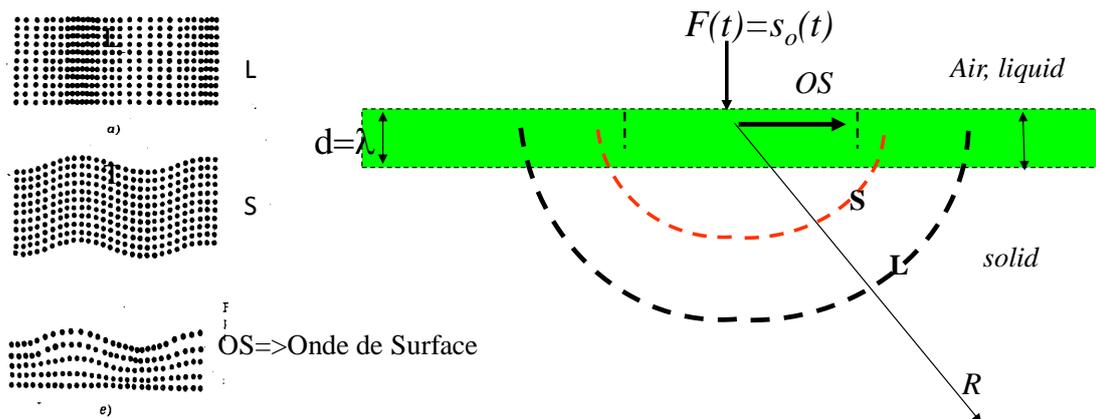


Figure I-12 : Types d'ondes se propageant dans un demi-espace solide excité par une force $F(t)$ [Krautkrämer – 1990]

Seules les ondes longitudinales peuvent se propager dans les fluides, alors que toutes les ondes peuvent se propager dans les solides. Les ondes de volume sont plus rapides que les ondes de surface, et les ondes longitudinales sont plus rapides que les ondes transversales : $V_L > V_S > V_{OS}$.

Les ondes sismiques permettent d'illustrer chacune de ces ondes. Lors d'un séisme, un sismographe va enregistrer des ondes L (souvent notées P – car « primaires »), des ondes S (car « secondaires ») et des ondes de surface, dans cet ordre. Ce sont les ondes de surface qui sont responsables des dégâts matériels provoqués par un séisme.

Une onde progressive est dite périodique si la variation physique la décrivant se répète à l'identique sans limitation dans le temps. Elle est dite harmonique si la variation physique est sinusoïdale (voir figure I-13a). Une onde sphérique et mono fréquentielle peut être exprimée ainsi :

$$s(R, t, \omega) = \frac{Q}{4\pi R} \sin(\omega t - kR) = \frac{Q}{4\pi R} \sin(\omega t - \phi) \quad (I-3)$$

où s indique le signal observé, $\omega = 2\pi f$ est la pulsation, f est la fréquence, $k = \omega/V = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde, ϕ est la phase, Q est une constante liée avec les paramètres de la source et R est la distance parcourue par l'onde

On définit alors la période de l'onde T comme l'écart temporel entre 2 répétitions successives de l'onde, en un point donné. La fréquence de l'onde $f = 1/T$ est l'inverse de la période et désigne le nombre de fois par seconde où une période de l'onde passe en un point. La longueur d'onde $\lambda = V.T$ désigne la distance parcourue par l'onde pendant une période (ou à un instant donné, la distance séparant 2 points qui sont dans le même état mais appartenant à 2 motifs successifs de l'onde).

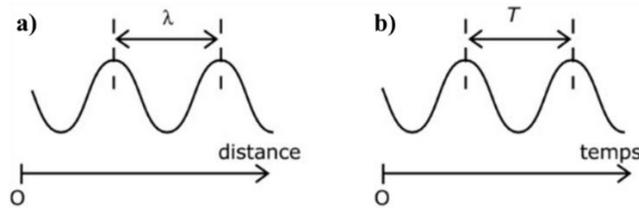


Figure I-13 : Représentation a) spatiale et b) temporelle d'une onde harmonique

La longueur d'onde et la fréquence (plus couramment utilisée que la période) sont reliées par la vitesse de l'onde :

$$V = \lambda * f \quad (I-4)$$

où V représente la vitesse de l'onde.

Cependant, les ondes utilisées dans cette étude ne sont pas harmoniques car plusieurs fréquences les composent. De plus elles ne sont pas périodiques car leur extension temporelle $s_o(t)$ est très courte et non sinusoïdale. Une telle onde (impulsionnelle) se propageant dans le milieu homogène et non absorbant peut être présentée ainsi (voir figure I-14b) :

$$s(R,t) = \frac{Q}{4\pi R} s_o\left(t - \frac{R}{V}\right) = A(R) s_o\left(t - \frac{R}{V}\right) \quad (I-5)$$

où A indique l'amplitude de l'onde et R/V le temps de propagation. La théorie de Fourier permet alors d'analyser la répartition de l'énergie de l'onde en fonction des fréquences (c'est le spectre de l'onde). Par simplification, on parle alors des fréquences de l'onde ou de sa bande fréquentielle B , c'est-à-dire la largeur de la partie dominante du spectre d'amplitude (cf. Fig. I-14d). De même, la longueur λ_c d'onde dominante est définie à partir de la vitesse de l'onde et de la fréquence dominante f_c . En se servant de l'équation (I-4), on obtient que la longueur d'onde dominante est $\lambda_c = V/f_c$.

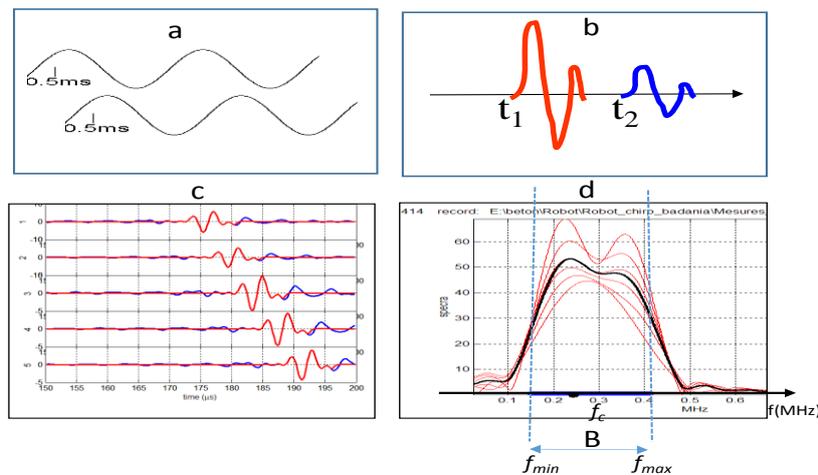


Figure I-14: a) Onde harmonique (mono fréquentielle) observée à deux distances R_1 et R_2 ; b) Présentation symbolique d'une onde impulsionnelle observée à deux distances R_1 et R_2 aux instants t_1 et t_2 ; c) 4 impulsions d'onde enregistrées sur 5 distances R_1 - R_5 ; d) Spectre des impulsions montrées sur la section (c)

Vitesse d'onde

La vitesse d'onde peut être mesurée de deux façons (voir figures I-13 et I-14). Pour une onde progressive harmonique, la vitesse est mesurée à partir de la différence de phase $\Delta\phi$ de deux signaux mesurés à des distances R_1 et R_2 :

$$V_{ph}(\omega) = \frac{\omega(R_2 - R_1)}{\phi_2 - \phi_1} = \omega \frac{\Delta R}{\Delta\phi(\omega)} \quad (\text{I-6})$$

La vitesse ainsi obtenue est appelée la vitesse de phase V_{ph} .

Au contraire, pour une onde impulsionnelle, la vitesse est mesurée à partir de différence de temps de propagation des signaux t_1 et t_2 (Fig. I-14) :

$$t_1 = \frac{R_1}{Vg}; \quad t_2 = \frac{R_2}{Vg} \quad (\text{I-7})$$

$$Vg = \frac{\Delta R}{\Delta t} = \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{I-8})$$

Une telle vitesse est appelée la vitesse de groupe Vg .

Dans un milieu homogène et sans absorption, la vitesse de phase est égale à la vitesse de groupe. Les vitesses relient les modules d'élasticité, la densité volumique et le coefficient de Poisson :

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (\text{I-9})$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{I-10})$$

$$\frac{V_L}{V_T} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (\text{I-11})$$

$$V_{OS} = \sqrt{\frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu}} V_T \quad (\text{I-12})$$

La connaissance (la mesure) de V_T et V_L permet d'obtenir le coefficient de poisson ν et ensuite, si la densité ρ est connue, il est possible d'estimer le module longitudinal E et transversal G .

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} \quad (\text{I-13})$$

$$E = 2\rho V_T^2 (1 + \nu) \quad (\text{I-14})$$

$$G = \rho V_T^2 \quad (\text{I-15})$$

Les formules présentées constituent la base de la caractérisation des matériaux à l'aide des ondes acoustiques.

Amplitude d'onde

L'amplitude d'une onde $A(R)$ (cf. Eq. (I-5)) peut s'atténuer pour 2 raisons principales. La première est l'atténuation géométrique (ou dispersion sphérique). Dans le cas d'une onde sphérique issue d'une source ponctuelle, l'onde va progresser dans toutes les directions, son énergie va alors se répartir sur une sphère de plus en plus grande et c'est pourquoi son amplitude va diminuer. La seconde correspond à l'absorption de l'énergie de l'onde par le matériau qu'elle traverse, et de la conversion de cette énergie en chaleur. Si le milieu traversé par l'onde est hétérogène, il peut également se produire une diffusion de l'onde sur les obstacles contenus dans le matériau.

La décroissance de l'amplitude de l'onde dépend de la façon dont l'onde se propage dans le milieu. Par exemple, pour une onde sphérique (issue d'une source ponctuelle, se propageant alors dans toutes les directions) dans un milieu sans pertes, son amplitude évolue avec la distance comme (cf. Eq. (I-5)) :

$$A(R) = \frac{Q}{4\pi R} \quad (\text{I-16})$$

où $A(R)$ représente l'amplitude à la distance R du point de référence, R représente la distance entre la source et un point de l'onde dont l'amplitude est $A(R)$. Dans un milieu avec absorption, la décroissance d'amplitude est plus rapide et devient :

$$A(R) = \frac{Q}{4\pi R} e^{-\alpha R} \quad (\text{I-17})$$

et α représente le coefficient d'atténuation linéique (en 1/m).

Dans le cas des ondes de surface, l'onde ne se propage pas dans toutes les directions, l'énergie de l'onde est bornée sur une couche d'une épaisseur précise d , et sa propagation est donc cylindrique. Son amplitude évolue avec la distance comme :

$$A(R) = \frac{Q}{2\pi\sqrt{R}} e^{-\alpha R} \quad (\text{I-18})$$

On peut noter que dans ces expressions de la décroissance de l'amplitude de l'onde en fonction de sa distance de propagation, le premier terme correspond à la perte d'énergie due à la géométrie de propagation de l'onde (sur une sphère de plus en plus grande, sur un cylindre de rayon de plus en plus grand...), indépendante du matériau dans lequel l'onde se propage. En revanche le second terme représente les autres pertes d'énergie comme l'absorption par le matériau et la conversion de l'énergie en chaleur, la diffusion sur les hétérogénéités du matériau...exclusivement en lien avec le matériau utilisé. Ainsi le coefficient α de décroissance exponentielle de l'amplitude de l'onde, est caractéristique de l'atténuation de l'onde causée par le matériau. L'évolution de ce paramètre sera donc étudiée au cours de cette thèse.

Ce coefficient d'atténuation est souvent défini de manière logarithmique, à partir de la mesure de l'amplitude de l'onde en 2 points dont on connaît les coordonnées (comme illustré sur la figure I-14b&c). Pour l'onde de surface, α exprimé en dB/m devient :

$$\alpha = \frac{20}{R_2 - R_1} \log \left(\frac{A_1}{A_2} \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \right) \quad (\text{dB/m}) \quad (\text{I-19})$$

où A_1 et A_2 représentant les amplitudes de l'onde en ces 2 points et R_1 et R_2 représentant leurs abscisses curvilignes respectives.

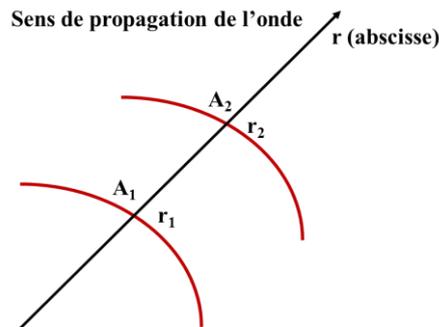


Figure I-15: Schéma du déplacement d'un front d'onde permettant le calcul du coefficient d'atténuation

La valeur de l'atténuation α varie en fonction des fréquences utilisées, et pour un matériau contenant des granulats tel que le béton, elle varie également en fonction de la taille des granulats. La littérature [Papadakis – 1965] indique 3 domaines pour lesquels le coefficient d'atténuation est exprimé en fonction de la fréquence et de la taille des granulats (en général, c'est le diamètre du plus gros granulat qui est pris en compte). Ces 3 domaines sont délimités par le rapport entre la longueur d'onde λ utilisée et cette taille de granulats D (l'importance et la directivité de la diffusion de l'onde variera en fonction de ce rapport). Les coefficients d'atténuation s'expriment ainsi [Garnier – 2000]:

$$\text{Domaine de Rayleigh} \quad \lambda \ll D \quad \alpha(f) = a_1 f + \frac{a_2}{D} \quad (\text{I-20})$$

$$\text{Domaine stochastique} \quad \lambda \approx D \quad \alpha(f) = a_1 f + a_3 D f^2 \quad (\text{I-21})$$

$$\text{Domaine de diffusion} \quad \lambda \gg D \quad \alpha(f) = a_1 f + a_4 D^3 f^4 \quad (\text{I-22})$$

Les matériaux utilisés dans cette thèse font intervenir des granulats de taille maximale 12 mm. Nous verrons que les longueurs d'onde utilisées par le scanner HF (voir paragraphe I.4) varient entre 5 mm et 60 mm. Le rapport entre ces 2 dimensions étant proche de 1, c'est le domaine stochastique qui sera utilisé pour modéliser l'atténuation des ondes de surface. Au contraire pour le scanner BF, les longueurs d'onde utilisées varient entre 60 mm et 600 mm, ce qui implique le domaine de Rayleigh.

I.3.2 Dispersion des ondes de surface

Les ondes utilisées dans cette thèse sont majoritairement des ondes de surface. Elles ont la propriété de se propager sur une épaisseur égale à la longueur d'onde [Viktorov – 1967]. Cette épaisseur d_{max} correspond alors à la longueur d'onde maximale, et donc à la fréquence minimale pendant laquelle la courbe de dispersion est constante :

$$d_{max} = \lambda_{max} = \frac{V_{ph}(f_{min})}{f_{min}} \quad (I-23)$$

Un milieu homogène et sans absorption est non dispersif pour ces ondes : la vitesse de phase est égale à la vitesse de groupe et est la même quelle que soit la fréquence de l'onde. Ainsi, lorsque l'on trace la courbe de dispersion de ces ondes de surface (graphe représentant la vitesse de phase en fonction de la fréquence $V_{ph}(f)$), une vitesse constante témoigne que le milieu est homogène sur une épaisseur correspondant à la profondeur de pénétration d_{max} .

En revanche, une courbe de dispersion variant en fonction de la fréquence témoigne d'un milieu non homogène sur son épaisseur et /ou absorbant ($\alpha \neq 0$). Dans la plupart des cas étudiés pour lesquels le matériau dispersait les ondes de surface, les propriétés mécaniques variaient macroscopiquement de façon monotone avec la profondeur.

En considérant un modèle composé d'une couche de matériau A sur une couche de matériau B, avec une vitesse des ondes de surface plus faible pour le matériau A que pour le matériau B, et dont la surface libre du matériau A est ausculté (voir figure I-16a), on peut tracer l'allure de la courbe de dispersion (voir figure I-16b). A partir des hautes fréquences (donc à partir de la surface) et en diminuant la fréquence émise, les ondes de surface balaient des profondeurs de plus en plus grandes, et finissent par atteindre l'épaisseur complète du matériau A. À partir de cette fréquence, le matériau traversé par les ondes est le matériau A et une partie de plus en plus grande du matériau B, la vitesse augmente ainsi. Une courbe de dispersion décroissante indique donc que les ondes sont plus lentes dans le matériau en surface que dans celui en profondeur, et une courbe de dispersion croissante indique le contraire. Généralement, un matériau propageant plus rapidement des ondes désigne un matériau aillant de meilleures propriétés mécaniques (porosité plus faible, module élastique plus important, etc.).

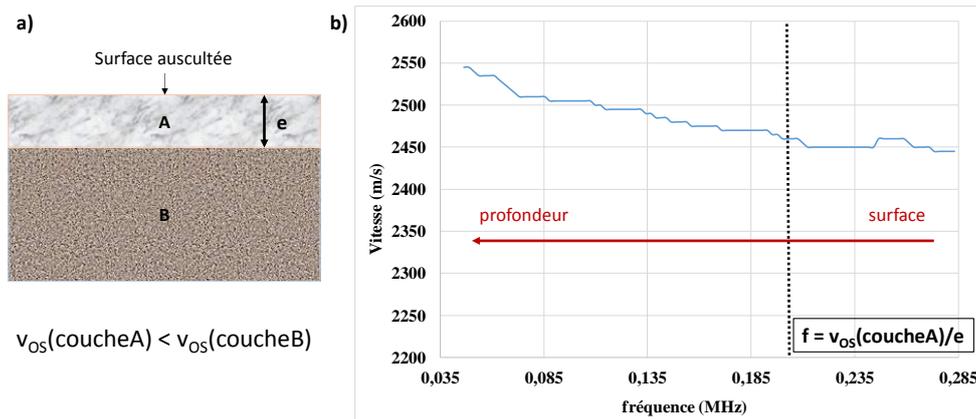


Figure I-16 : a) Schéma d'un modèle de matériau bicouche ausculté par onde de surface b) courbe de dispersion correspondante

I.3.3 Ondes de plaque

Si l'on considère une dalle d'épaisseur e dans laquelle des ondes de surface de pénétration d_{\max} se propagent suivant l'une de ses surfaces, celles-ci peuvent se convertir en ondes de plaque si d_{\max} atteint ou dépasse l'épaisseur e . Ces ondes de plaque sont des ondes guidées, et compte-tenu du rapport e/λ , seules certaines vitesses sont permises dans le matériau (il y a une apparition des propagations modale). Il existe 2 configurations de vibration de la dalle, que l'on désigne par les modes symétriques et antisymétriques. Les figures I-17a et I-17b montre une simulation des courbes de dispersion des ondes de plaque pour une dalle d'épaisseur 5 cm puis 10 cm, pour un même matériau (défini mécaniquement par les vitesses des ondes longitudinales et transversales) et chaque courbe représente un mode distinct. Elle montre également un schéma des 2 configurations vibratoires d'une dalle parcourue par des ondes de plaque. La figure I-17c montre un mode symétrique, la figure I-17d montre un mode antisymétrique.

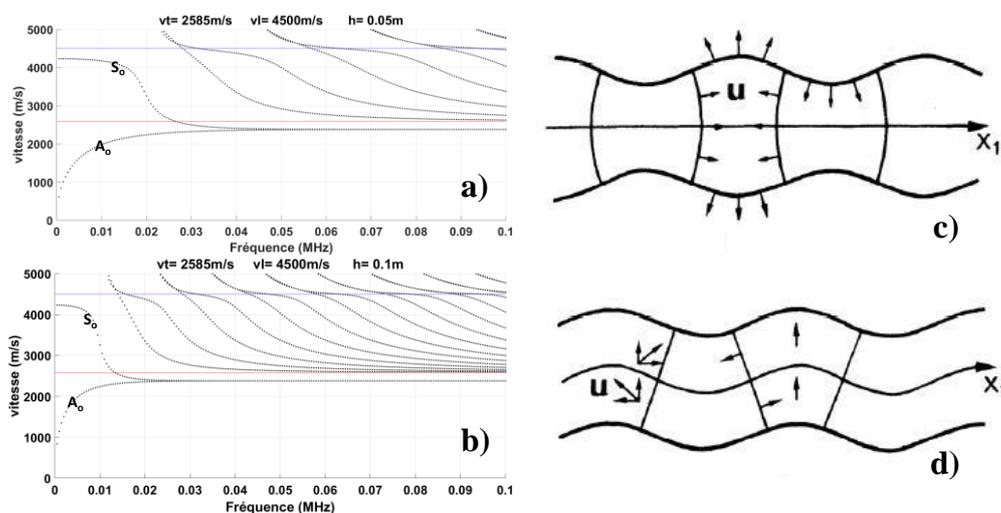


Figure I-17 : Simulation des modes d'onde de Lamb pour une dalle dont la vitesse des ondes longitudinales vaut 4500 m/s et la vitesse des ondes transversales vaut 2585 m/s (ces valeurs sont représentatives d'un béton), d'épaisseur a) 5 cm, b) 10 cm ; schéma représentant macroscopiquement les configurations vibratoires des ondes de Lamb pour les modes c) symétriques et d) antisymétriques

Les modes A_0 et S_0 sont les modes principaux car ce sont eux qui transportent le plus d'énergie. De plus, quand la fréquence est plus importante (e/λ augmente), la vitesse de phase de ces modes converge vers la vitesse des ondes de surface. La vitesse de phase des modes supérieurs convergent vers la vitesse des ondes transversales à hautes fréquences.

Les hautes fréquences (donc les basses longueurs d'onde) permettent de mettre en évidence les ondes de surface, et leur courbe de dispersion montre une vitesse constante de la fréquence. Au fur et à mesure que les fréquences diminuent (et donc que les longueurs d'onde augmentent), les ondes de surface basculent en ondes de plaque et la courbe de dispersion diverge de l'horizontale. On peut alors approximativement évaluer la profondeur e à partir de laquelle le matériau se finit. S'il est possible de connaître des valeurs précises des vitesses des ondes longitudinales et transversales dans chacun des matériaux, il est alors possible de calculer cette profondeur. La figure I-18 illustre cette méthode d'investigation pour déterminer la profondeur e (épaisseur) d'une dalle. Sur la figure I-18, les 4 premières ondes sont contenues dans la première couche de matériau, ainsi leur fréquence se calcule avec :

$$f_n = \frac{V_{OS}}{\lambda_n} \quad (I-24)$$

La cinquième onde possède une longueur d'onde supérieure à l'épaisseur de la couche du premier matériau, des ondes de plaque vont donc apparaître et la fréquence ne peut plus se calculer comme avec (I-24). La longueur d'onde λ_4 correspond à la longueur d'onde égale à l'épaisseur e du matériau, il s'agit donc d'une longueur d'onde limite, en dessous de laquelle les ondes envoyées sont des ondes de surface, et au-delà de laquelle les ondes envoyées deviennent des ondes de plaque. On voit sur la figure I-18 que les vitesses de phase des modes A_0 et S_0 aux basses fréquences (donc aux grandes longueurs d'onde) se rejoignent à la fréquence f_4 pour converger vers la vitesse des ondes de surface V_{OS} .

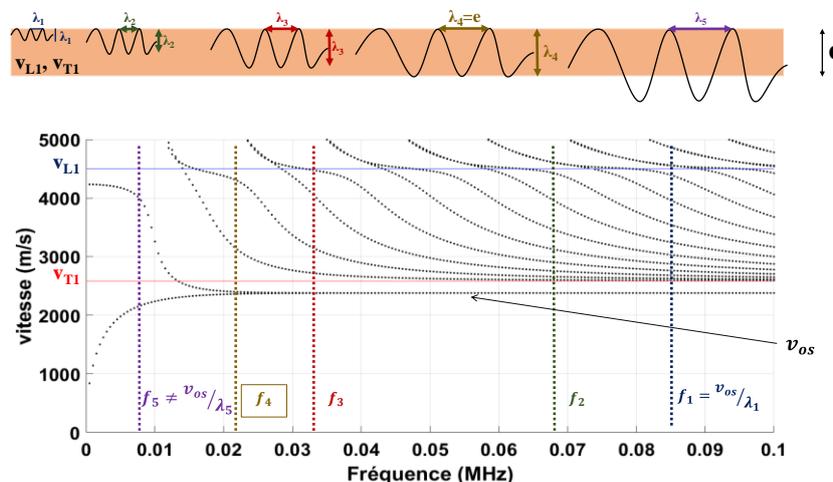


Figure I-18 : Schéma de principe de l'utilisation combinée des ondes de surface et ondes de plaque à partir d'un large spectre de fréquences afin de déterminer une profondeur de rupture mécanique

I.4 Solution technique proposée : Scanners à ondes de surface

Dans cette thèse, les ondes de surface sont utilisées. Elles permettent le contrôle d'une surface avec un seul des 2 versants, contrairement à d'autres techniques, acoustiques qui, souvent, opèrent par transmission (Figs I-[9-11]) ou non. Comme la pénétration de l'onde d_{\max} est égale à la longueur d'onde, et que cette dernière dépend de la fréquence, l'envoi de plusieurs fréquences permet d'ausculter une surface de béton sur différentes profondeurs.

En mesurant la vitesse des ondes de surface, on peut très simplement retrouver la vitesse des ondes transversales dans le béton (I-12), ainsi que le module de Young (cf. Eq. (I-14)).

Plutôt qu'une mesure de la vitesse à partir de 2 positions du récepteurs seulement, on utilise une mesure automatisée de N positions du récepteur ($20 < N < 50$ en général) régulièrement espacés, ce qui augmente la précision de mesure et le rapport Signal/Bruit. L'automatisation de la mesure facilite grandement le travail de l'utilisateur.

Les mesures présentées ci-dessus dans cette thèse seront donc réalisées avec un dispositif automatique appelé scanner à ondes de surface.

La relation {fréquence – longueur d'onde} (ou {fréquence – pénétration de l'onde}) est illustrée sur la figure I-19. Dans le cadre de cette thèse, la profondeur maximale de pénétration de l'onde de surface exigée d_{\max} est variable suivant l'enjeu de l'étude : de quelques centimètres pour la caractérisation du béton de peau jusqu'à un mètre pour caractériser le mur d'une enceinte de confinement d'une centrale nucléaire. Afin de réaliser ce cahier des charges, 2 scanners ont été utilisés :

- Un scanner à ondes de surface hautes fréquences (HF) qui opère dans l'intervalle de fréquences 40 kHz à 400 kHz
- Un scanner à ondes de surface basses fréquences (BF) qui opère dans l'intervalle de fréquences 4 kHz à 50 kHz

Il est clair que la pénétration du premier scanner (HF) est de 1 à 6 cm, et que celle du second (BF) est de 6 à 80 cm. Ainsi, de la même manière que les bandes fréquentielles se recoupent, les longueurs d'onde aussi, ce qui assure une continuité sur la profondeur de pénétration de l'onde. En définitive, la combinaison de ces 2 scanners permet d'ausculter des couches de béton de profondeur entre 1cm et 80cm d'épaisseur.

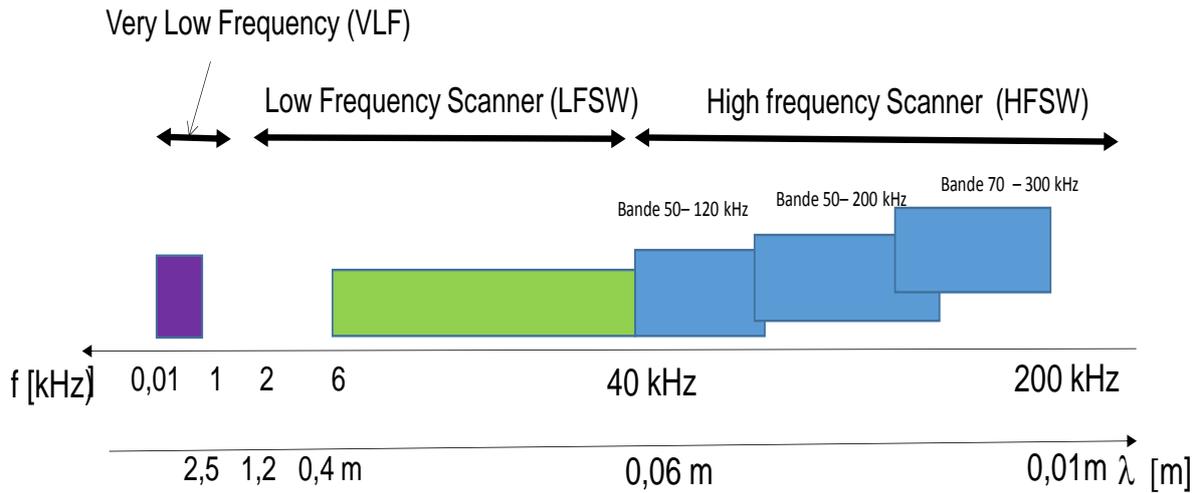


Figure I-19 : Zones fréquentielles et profondeurs de pénétration couvertes par les deux scanners

Le fait que ces mesures acoustiques se fassent sans contact permet d'éviter l'utilisation d'un produit couplant. Cela fait gagner un temps considérable de préparation de la mesure, et empêche le béton (et ses propriétés) d'être altéré par l'absorption du couplant.

I.4.1 Principe de fonctionnement du scanner à onde de surfaces hautes fréquences

Le principe général de la mesure consiste à générer et recevoir des ondes de surface à N positions à l'aide d'une paire de transducteurs identiques, déplacés manuellement le long d'un profil de mesure de longueur L . Une telle procédure, bien adaptée aux conditions de laboratoire, n'est pas appropriée aux mesures in situ. Ses défauts majeurs sont le temps de mesure extrêmement long, les erreurs en positionnement des capteurs et la non répétitivité du couplage des récepteurs. Afin de résoudre ces problèmes, un appareil automatique « scanner à onde de surface hautes fréquences » a été conçu et construit dans notre laboratoire. Il constitue un support mobile pour l'un des transducteurs, qui se déplace automatiquement (Fig. I-20). Le déplacement du récepteur et l'enregistrement des données sont contrôlés par l'ordinateur [Piwakowski et al – 2008 ; Piwakowski et Safinowski – 2009]. L'utilisation du système automatisé assure une précision suffisante de positionnement du capteur, ainsi qu'un nombre de points de réception N suffisamment grand, permettant de réaliser une moyenne fiable.

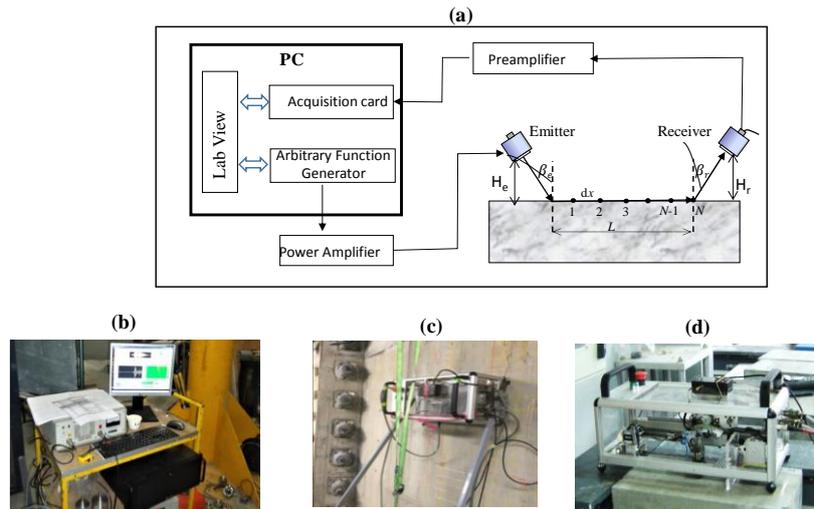


Figure I-20: Principe de fonctionnement du scanner et des photos du scanner en fonctionnement ; a) schéma de fonctionnement complet ; b) photo de de la partie PC du schéma + l'amplificateur de puissance ; c) photo de la partie scanner + préamplificateur (fixé sur le scanner) sur un mur d'essai ; d) photo du scanner sur une dalle en laboratoire

Indépendamment, l'originalité du procédé consiste à utiliser l'émetteur et le récepteur dits « sans contact », ce qui veut dire qu'ils ne touchent pas la surface auscultée. Une telle solution permet d'éviter l'utilisation d'un produit de couplage, et donc d'éviter une modification des propriétés du matériau par le produit couplant, permettant ainsi d'accélérer la mesure.

Comme illustré sur la figure I-20, le signal est émis à partir d'un ordinateur comprenant une interface Labview. Cette interface permet de définir la bande fréquentielle choisie, la durée du signal, le nombre de signaux envoyés qui seront moyennés, le temps de pause entre chaque signal envoyé et la fréquence d'échantillonnage. Chaque signal envoyé va être amplifié grâce à un amplificateur adapté, puis émis depuis le transducteur émetteur dans l'air. L'onde aérienne arrive au niveau de l'interface air/béton, sous angle critique β [Piwakowski et al – 2004] :

$$\sin(\beta) = \frac{c_{air}}{V_{OS_matériau}} \quad (I-25)$$

L'arrivée de l'onde au niveau de l'interface convertit cette onde de volume en ondes de surface notamment. Cet angle correspond à l'angle permettant de transmettre le maximum d'énergie à l'onde de surface, il est donc particulièrement important de chercher à optimiser l'angle d'incidence de l'onde. Or, la vitesse de l'onde $V_{matériau}$ varie en fonction du matériau ausculté, l'angle optimal est donc différent pour chaque matériau. C'est pour cette raison qu'il a été choisi de placer les transducteurs émetteurs et récepteurs sur des pivots, permettant de régler les angles d'incidence respectifs. Pour le béton l'angle optimal est compris entre 8° et 11° , en fonction du type (qualité) de béton.

Ces ondes de surface se propagent sur la surface du matériau inspecté et se rétrodiffusent au niveau de l'interface béton/air, et sont réceptionnées par le transducteur récepteur encline sur même angle.

L'onde générée par l'émetteur est reçue aux distances R_1, R_2, \dots, R_N espacées régulièrement de dx . Afin de limiter le nombre de récepteurs nécessaires, un seul récepteur est déplacé et les enregistrements sont effectués à chaque point de mesure. Le signal reçu est enfin amplifié, puis numérisé et enregistré. Les enregistrements sont ensuite analysés et traités.

L'écart dx entre 2 points de mesure du récepteur sur un profil doit être fixé en respectant le théorème d'échantillonnage spatial :

$$\frac{dx}{\lambda_{min}} < \frac{1}{2} \quad (I-26)$$

où λ_{min} représente la plus petite longueur d'onde utilisée.

Si cet écart est trop important par rapport à la longueur d'onde minimale utilisée, de fausses courbes de vitesse apparaîtront en plus des vraies sur la caractéristique de dispersion.

Les transducteurs électroacoustiques permettant la génération d'ondes ultrasonores (émetteurs) ont été choisis de telle sorte que la bande fréquentielle soit la plus large possible, tout en conservant des dimensions et poids de transducteur raisonnables (manipulables manuellement par exemple). Compte tenu de ces conditions, il a été décidé d'opter pour plusieurs transducteurs dont les bandes fréquentielles se recouvrent. Les 3 transducteurs utilisés dans cette thèse sont désignés par leurs fréquences centrales respectives : 50 kHz, 75 kHz et 200 kHz. La bande fréquentielle totale couverte par les 3 transducteurs est de 40 kHz – 400 kHz (cf. Fig. I-19). En considérant un matériau comme le béton (matériau très largement représenté dans cette étude), dans lequel la vitesse des ondes de surface vaut environ 2400 m/s, les longueurs d'onde balaient l'intervalle 6 mm – 60 mm. Ces valeurs de fréquence ont été choisies pour les transducteurs car ainsi, il est possible d'étudier les variations de propriétés du béton sur les 6 premiers centimètres de profondeur à partir de la surface auscultée. Cela correspond à une zone allant de la surface aux premiers aciers composant un béton armé, précisément là où il est important de surveiller l'état du béton. En effet le scanner HF avait été conçu essentiellement pour réaliser des auscultations de peau de béton.

Quant au transducteur récepteur, il a été choisi principalement avec une très large bande fréquentielle (5 kHz – 1 MHz) donc il couvre tous les bandes de transducteurs émetteurs.

I.4.2 Déroulement d'une mesure

La phase préparatoire de la mesure consiste à choisir le signal que l'on va envoyer (bande fréquentielle admissible pour le transducteur émetteur utilisé, durée du signal, durée de la pause entre 2 signaux émis, fréquences d'échantillonnage, nombre de signaux envoyés puis moyennés pour chaque position du récepteur), puis à choisir la séquence de positions du récepteur pendant la mesure (nombre de positions du récepteur N , espacement entre chaque position dx , position initiale sur rail par rapport à la source etc.).

Lorsque la mesure est lancée, le récepteur va d'abord se déplacer sur la position de départ indiquée, puis un premier signal va être émis. Après un temps de pause, un second signal va être émis, et ainsi de suite, jusqu'à atteindre le nombre de signaux par position du récepteur indiqué par l'utilisateur en amont. Le récepteur va ensuite se placer sur sa deuxième position, et le processus va se répéter jusqu'à la dernière position du récepteur.

L'ensemble du procédé détaillé précédemment est désigné par un « profil » et est effectué de façon automatisée par le robot : l'utilisateur intervient uniquement pour régler les paramètres et lancer la mesure du profil. Pour chaque point de mesure, 5 profils au minimum sont effectués, en déplaçant le robot de quelques centimètres au-dessus ou en-dessous du profil précédent, afin d'obtenir un écart-type de mesure représentatif de la variabilité locale du matériau (voir figure I-21).

Chaque émetteur a une bande limitée : si on veut élargir la bande, Il faut répéter chaque mesure pour chacun des 3 transducteurs utilisés dans cette étude et ensuite regrouper les résultats partiels.

Il est également possible de lancer de façon automatique un nombre de mesures défini auparavant par l'utilisateur. Il faut alors préciser l'heure de la première mesure (le premier profil), le nombre de profils à mesurer, et le pas de temps entre chaque début de profil. Le logiciel se charge de ramener le chariot du récepteur en position initiale au début de chaque profil. Enfin, avant le démarrage de chaque mesure, l'opérateur définit les paramètres résumés dans le Tableau I-1. Pour la forme $W(t)$: cf. le paragraphe suivant.

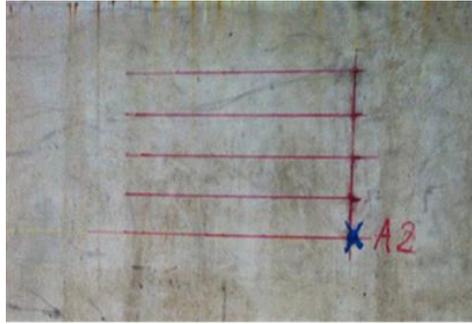


Figure I-21 : 5 profils constituant 1 point de mesure sur un mur en béton

Tableau I-1 : Paramètres et réglages du scanner HF

Nombre de profils par dalle	transducteurs utilisés (bandes fréquentielles associées)	Longueur d'un profil L (cm)	Ecart entre les points de mesure dx (cm)	Nombre de points de mesure par profil N	Angle d'attaque $\beta(^{\circ})$	Forme d'impulsion W(t)	« Averaging » ou moyennage
5	T50 : 15kHz – 130kHz	15	0.25	60	8.5	Chirp rectangulaire	4

I.4.3 Forme des signaux utilisés : technique « chirp »

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, l'investigation d'un matériau par ondes de surface nécessite l'utilisation de plusieurs fréquences, afin de pouvoir obtenir l'évolution des propriétés élastiques du matériau dans sa profondeur, et de pouvoir évaluer la profondeur à laquelle cette évolution a lieu. De plus, en se plaçant dans la situation selon laquelle l'onde sera émise dans l'air, se propagera au niveau de la surface du béton et sera réémise dans l'air, puis reçue, cette onde passera 2 fois par une interface air/béton. Or, le coefficient de transmission d'amplitude au niveau de cette interface est de l'ordre de 1 %, soit 0,1 ‰ au total. La perte de puissance est considérable, et les performances des émetteurs étant limités, le niveau de signal reçu serait beaucoup trop faible par rapport au niveau du bruit environnant. Le rapport signal-sur-bruit et la résolution peuvent alors être améliorés en utilisant des signaux codés [Kaczmarek et al – 2015].

La méthode la plus majoritairement utilisée est la modulation en fréquence. Un signal modulé en fréquence est dit Chirp ou Sweep. Dans le cas (très largement répandu) où la fréquence du signal croît linéairement avec le temps sur la durée du signal, et où l'amplitude du signal est constante sur sa durée, on peut définir le signal par son amplitude A , ses fréquences minimales et maximales f_{min} et f_{max} , et sa durée τ . En posant $B_{ch} = f_{max} - f_{min}$ (bande fréquentielle de chirp) et $f_c = f_{min} + \frac{B_{ch}}{2}$ (fréquence centrale), on peut exprimer l'amplitude du chirp ainsi :

$$ch(t) = \begin{cases} A \sin \left(2\pi \left[f_{min} + \frac{B_{ch}}{2\tau} t \right] t \right) & \text{pour } 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (I-27)$$

L'amplitude du signal émis étant limité par les performances de l'émetteur, il est possible d'augmenter l'énergie du signal en augmentant sa durée τ .

Le signal reçu $s_{reçu}(t)$ sera le même, mise à part l'amplitude qui aura diminué à cause de l'atténuation dans le matériau. Le signal reçu va ensuite être compressé en le corrélant avec le signal émis :

$$ch_{emis}(t) \otimes ch_{émis}(t) = A_{emis} A_{émis} \tau \frac{\sin(\pi B_{ch} t [1 - \frac{t}{\tau}])}{\pi B_{ch} t} \cos(2\pi f_c t) \quad (I-28)$$

Là où la compression d'un train d'ondes sinusoïdal de durée τ sera peu efficace la compression d'un signal chirp (donne une ondelette de Klauder (I-28), dont la quasi-totalité de l'énergie est concentrée sur une durée $\tau' \simeq \frac{1}{B_{ch}}$. La figure I-22a illustre la compression d'un signal chirp linéaire. On constate que la durée du signal compressé est nettement réduite, et l'énergie est effectivement concentrée sur un unique pic d'amplitude, d'où l'intérêt de la compression du chirp pour obtenir une bonne résolution des signaux reçus.

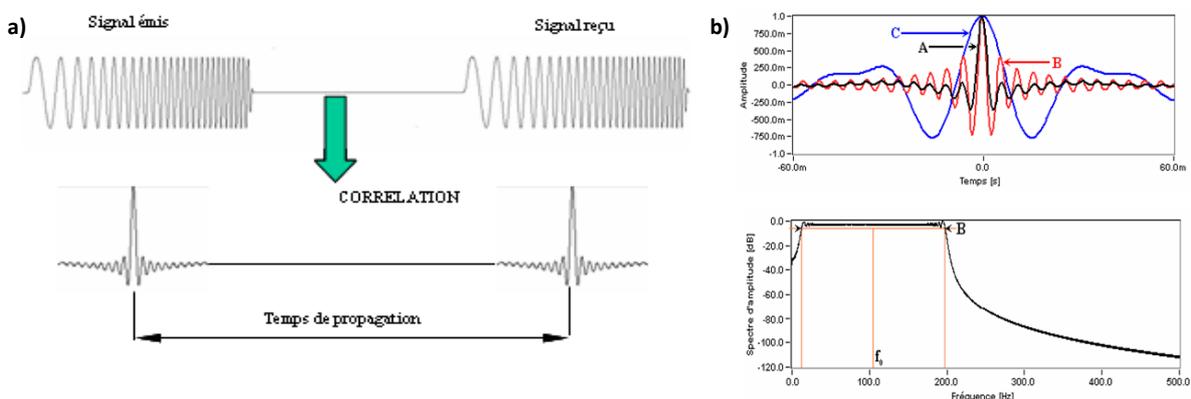


Figure I-22 : a) Schéma représentant l'effet de la compression des signaux « chirp » b) illustration de la compression de 3 chirps de bandes fréquentielles différentes, et exemple du spectre d'amplitude d'un signal chirp [Piwakowski et al – 2008]

L'énergie du signal est inchangée après la compression. En revanche, comme son support temporel a fortement diminué, la puissance crête après compression est nettement plus grande qu'avant. Le gain en puissance dû à la compression est de $\tau/\tau' \simeq \tau B_{ch}$. Il peut alors être intéressant d'augmenter la durée du signal ou sa bande fréquentielle si l'on souhaite augmenter la puissance du signal reçu. La bande fréquentielle B_{ch} souhaitée sera cependant limitée par la bande fréquentielle de fonctionnement du transducteur électroacoustique utilisé. Il sera alors pertinent de choisir les transducteurs avec des bandes fréquentielles de fonctionnement les plus larges possibles. Finalement la « puissance » du signal est donc nettement améliorée

par rapport à un signal non compressé. Ceci améliore le rapport signal/bruit SNR et l'amélioration est proportionnelle à l'énergie de l'impulsion donc à la durée τ et amplitude $A_{\text{émis}}$.

La compression d'un chirp parfait (de bande fréquentielle infinie) devrait donner une impulsion de Dirac $\delta(t)$. Pourtant, en raison de la limitation de sa bande, sa compression donne une ondelette de Klauder. Elle constitue une impulsion de largeur finie et est accompagnée de lobes secondaires.

On peut constater sur la figure I-22 que l'énergie de l'ondelette de Klauder n'est pas complètement condensée sur le pic central, elle est également répartie sur des lobes secondaires de part et d'autre de ce pic. Ces lobes semblent négligeables, surtout au-delà des 2 premiers, mais ils peuvent se révéler gênants pour la lecture des signaux reçus (ce sont notamment les lobes secondaires de signaux parasites arrivant avant ou après les signaux intéressants qui peuvent se superposer aux signaux reçus et donc rendre leur lecture moins précise). On peut alors « épurer » le chirp (avant ou après compression) par une fonction enveloppe $W(t)$ de type par exemple Hanning, Hamming, gaussienne etc. Cela revient mathématiquement à convoluer la transformée de Fourier du chirp avec celle de la fenêtre choisie. Le fenêtrage aura pour effet de réduire fortement l'amplitude des lobes secondaires, et d'augmenter ainsi la résolution des signaux. Le signal sera également atténué et le pic central de l'ondelette sera élargi. Il est alors nécessaire de trouver un compromis entre la réduction d'amplitude des lobes secondaires et l'atténuation du signal puis l'élargissement du pic central, en choisissant judicieusement la fenêtre. Des exemples de spectres de chirps avec différentes enveloppes $W(t)$ et les ondelettes correspondantes sont donnés en Annexe Chapitre I dans le Tableau A.I.4.2. Notons que la fenêtre gaussienne permet de complètement supprimer les lobes (car la transformée de Fourier d'une gaussienne est aussi la fonction de Gauss) mais au prix de l'élargissement considérable du lobe principal, donc de la résolution.

Une autre approche disponible avec le scanner est l'utilisation de codes de Golay, qui permettent de supprimer complètement les lobes secondaires. Pour cela deux séquences de n bits chacune sont construites à l'aide d'un algorithme. Chaque bit peut valoir 1 ou -1. S'il vaut 1, aucun déphasage n'est introduit, et le bit est constitué de m périodes de sinusöide de fréquence donnée f_c , la fréquence centrale visée. S'il vaut -1, un déphasage de π est introduit et le bit est constitué de m périodes de sinusöide de fréquence identique mais de phase opposée à la première décrite. Par exemple, 2 séquences de Golay : g_A et g_B sont présentées sur les figures I-23a et I-23b. T_B représente la durée d'un bit et T_C représente la période d'une sinusöide à l'intérieur d'un bit. Sur cet exemple, ces 2 constantes sont identiques car il n'y a qu'une seule période par bit. De façon plus générale, on a $T_B = m * T_C = \frac{m}{f_c}$. Ces 2 séquences sont

dites complémentaires car elles sont construites de telle sorte que lorsque l'on somme leurs fonctions d'autocorrélation respectives c_A et c_B (voir figure I-23c), on obtient une ondelette sans lobe secondaire (figure I-23d et en annexe Tableau A.I.4.2): l'énergie est exclusivement concentrée sur le lobe principal. On a:

$$C(t) = c_A(t) + c_B(t) = g_A(t) \otimes g_A(t) + g_B(t) \otimes g_B(t) \quad (I-29)$$

Le spectre d'amplitude de cette ondelette (figure I-23e) est centré sur la fréquence f_c de la sinusoïde constituant les séquences de Golay et l'ondelette de Klauder est privée de lobes secondaires (figure I-23d). La bande B du signal Golay peut être estimée comme $B_G = 2f_c/m$.

Finalement, l'écran de contrôle du scanner est conçu pour que l'opérateur puisse fixer la longueur d'impulsion τ , ses limites de fréquence f_{\min} et f_{\max} et la forme de pondération $W(t)$. Ces paramètres sont fixés « in situ » afin d'obtenir le SNR suffisant et la forme souhaitée du signal reçu et de son spectre.

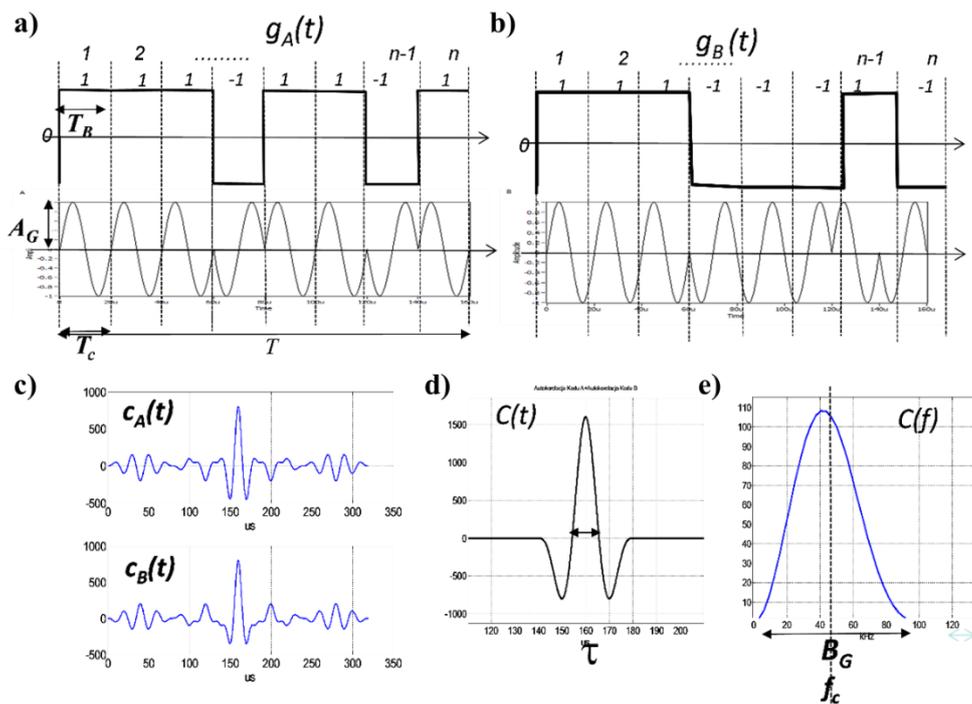


Figure I-23 : Exemple de principe du code Golay ; a) et b) 2 séquences de Golay complémentaires ; c) autocorrélations de ces séquences ; d) somme de ces autocorrélations ; e) spectre d'amplitude de la somme

I.4.4 Traitement des données

Pour un transducteur donné, tous les signaux d'un même profil sont traités par un logiciel développé par B. Piwakowski en environnement Matlab [Piwakowski et al – 2008].

La première étape consiste à tracer le B-scan du profil mesuré (figure I-24a, partie haute). L'utilisateur fenêtré ensuite le B-scan sur le signal visé qui constitue toujours l'ondelette correspondant à la première arrivée (figure I-24a, partie bas). Le logiciel trace ensuite, pour chaque signal du profil, chaque spectre d'amplitude correspondant au signal fenêtré (figure I-24b). La transformation Slant-Stack ([Piwakowski et al – 2004, Ambrozinski – 2014]) est ensuite appliquée sur le B-scan, afin d'extraire la caractéristique de dispersion de l'onde de surface $V_{ph}(f)$, c'est-à-dire la vitesse dans le matériau en fonction de la fréquence (figure I-24c). L'amplitude $A(x)$ du signal en fonction de la distance source-récepteur est également extraite (Figure I-24d). Le processus peut être ensuite répété sur les autres profils – si les profils doivent caractériser la même maille de béton – et les résultats de chaque profil sont ensuite moyennés. Sur la figure I-24, les données proviennent de 5 profils et on obtient les évolutions du coefficient d'atténuation en fonction de la fréquence $\alpha(f)$ pour chaque profil et pour un profil moyen (figure I-24e), ainsi que les courbes de dispersion pour chaque profil et pour un profil moyen (figure I-24f).

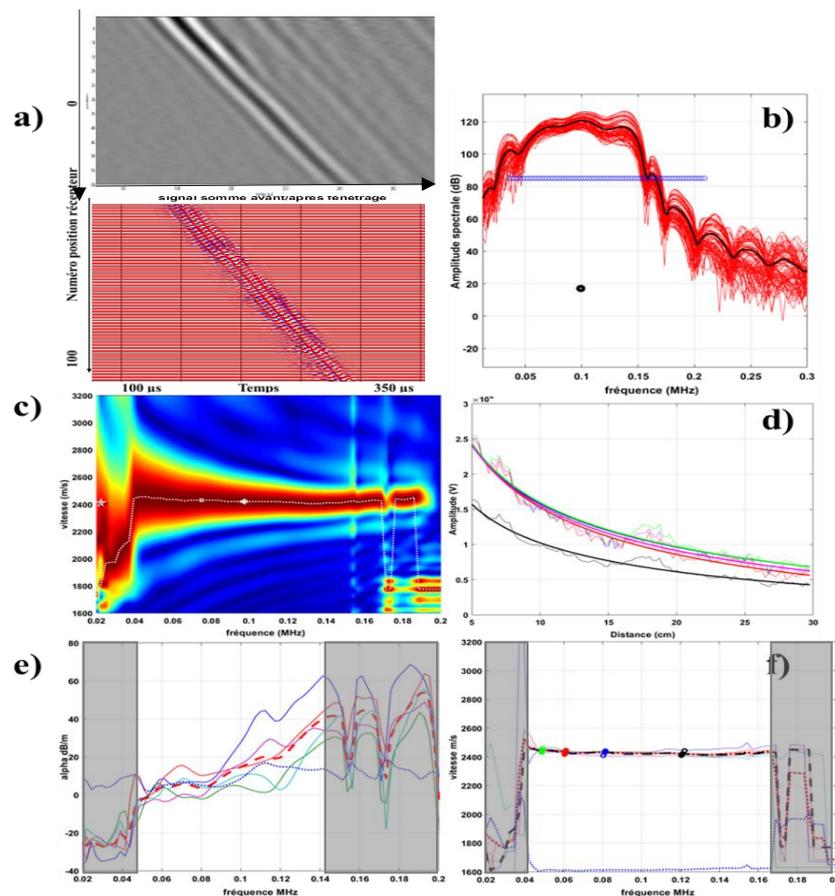


Figure I-24 : Différentes étapes du traitement de données pour un point de mesure: a) B-scan des signaux pour un profil scanné avec le transducteur 75 kHz et l'onde de surface extraite pour le traitement ; b) ensemble de tous les spectres d'amplitude de ce profil pour ce transducteur ; c) répartition fréquentielle des vitesses pour tous ces profils ; d) évolution de l'amplitude de l'onde reçue $A(R)$ en fonction de la distance émetteur-récepteur R pour un profil ; e) évolution fréquentielle du coefficient d'atténuation pour tous les profils (les zones grisées indiquent les zones non valides) ; f) évolution fréquentielle de la vitesse de phase pour tous les profils (même remarque que pour e))

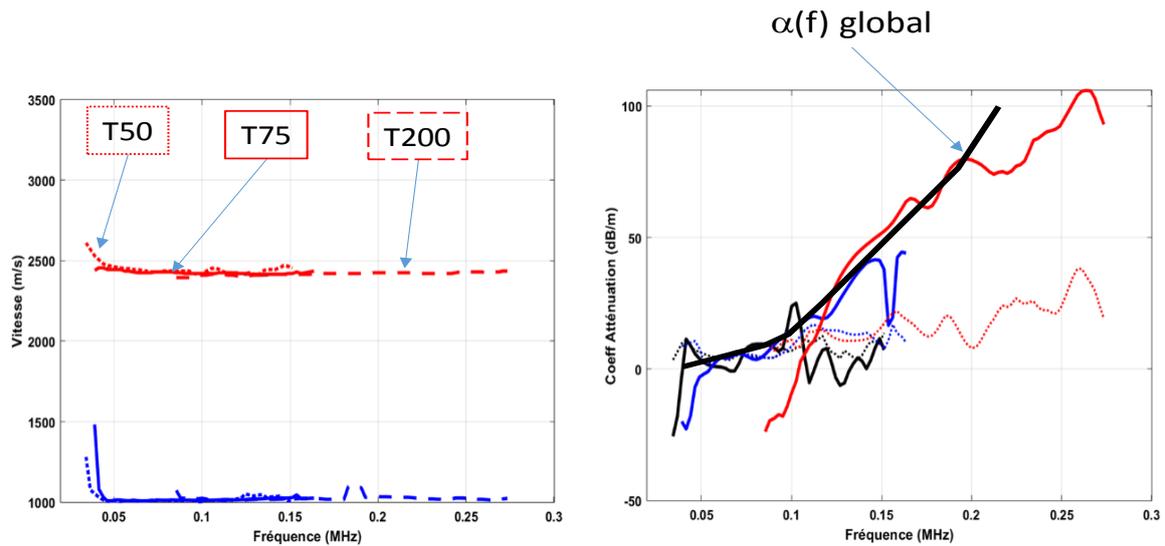


Figure I-25 : Courbes de a) dispersion et b) d'atténuation issues des mesures effectués dans trois bandes fréquentielles en utilisant trois émetteurs à 50, 75, et 200 kHz

Un second étape (programme) permet, pour chaque courbe de dispersion et d'atténuation issue des mesures avec les 3 transducteurs, de sélectionner la bande fréquentielle pertinente et d'afficher sur la courbe finale (voir figure I-25a et I-25b) les portions de courbes choisies. La pertinence de la portion de courbe choisie est évaluée grâce à l'écart-type de mesure, affiché en bleu sur la courbe de dispersion, en pointillés sur la courbe d'atténuation. Il doit y avoir une continuité entre les 3 portions de courbes. Ainsi, à partir de 3 courbes de dispersion et d'atténuation dont les bandes fréquentielles se recouvrent, on obtient des courbes globales, valables sur une large bande fréquentielle.

Une description plus détaillée du scanner peut être trouvée dans [Abraham et al – 2012] et [Piwakowski et Safinowski – 2009]. Depuis son développement en 2008, le scanner a été utilisé dans de nombreux projets dans le domaine du Génie Civil (projets SENSO [Senso – 2009], ACDC, ENDE) pour la caractérisation de béton, la caractérisation et l'évaluation de la peau du béton et la détection de fissures [Balayssac et al - 2012; Garnier et al - 2016]. Il a déjà été utilisé pour la localisation des défauts dans les composites en utilisant des ondes de plaque [Ambrozinski et al – 2014] et dans des tests d'auscultation d'un rail de chemin de fer [Liu et al – 2014].

I.4.5 Solution technique proposée : le scanner à ondes de surface basses fréquences

Comme le minimum de fréquence permis par le robot hautes fréquences est de 40 kHz, soit une pénétration maximale de l'ordre de 6 cm (pour une vitesse de 2300 m/s = vitesse « type » des ondes de surface dans le béton), ce qui correspond à une auscultation des 6 premiers centimètres de la surface.

Selon la figure I-19 si l'on souhaite inspecter le matériau sur des profondeurs plus importantes, il faut augmenter la longueur d'onde maximale, et donc diminuer la fréquence minimale envoyée.

Cela a donc motivé la création d'un second scanner, appelé scanner basses fréquences (BF) plus grand que celui présenté précédemment, adapté à de plus faibles fréquences (4 kHz – 40 kHz) et donc de plus grandes longueurs d'onde.

Ce scanner a été réalisé pendant la réalisation de cette thèse, dans le but d'obtenir des ondes de surface pénétrant l'épaisseur totale du mur de l'enceinte de la maquette VeRCoRs (cf. Chapitre V). Le travail préparatoire de ce second scanner a pris un temps conséquent, dans la mesure où tous les paramètres du scanner devaient être calibrés (les fréquences d'envoi, la puissance de l'amplification, la configuration spatiale de la source ultrasonore, l'isolation de la source, l'angle de pivot, le rapport SNR, etc.). Chaque nouvelle utilisation du robot nécessitait de travailler sur ce calibrage, pendant les premiers temps, et parfois ces premiers temps étaient in-situ, au niveau de la maquette VeRCoRs. Il devient maintenant, au bout de 4 ans de tests et de perfectionnement, un outil fiable et précis. Plus de détails sur l'évolution de ce scanner se trouvent dans le Chapitre V et son Annexe A.V.

Les transducteurs piézo disponibles dans le commerce n'atteignent pas des longueurs d'onde suffisamment basses. Ce sont les transducteurs magnétostatiques (tweeters) qui le permettent, et sont utilisés dans ce scanner robot basses fréquences (voir figure I-26a et I-26b). Les caractéristiques techniques de ces transducteurs sont regroupées sur le tableau I-2. La bande fréquentielle couverte par ces 2 transducteurs est donc de [3 kHz – 40 kHz]. Les longueurs d'onde correspondantes (et donc les profondeurs atteignables par les ondes dans le matériau) dans un béton dont la vitesse des ondes de surface est de 2400m/s sont donc comprises entre 60 mm et 80 cm. (cf. Fig. I-19). L'utilisation d'un transducteur capable d'envoyer des ondes de surface sur une profondeur de l'ordre du mètre permet d'ausculter la totalité de l'épaisseur de beaucoup de structures du Génie Civil.

Tableau I-2 : Caractéristiques techniques des transducteurs magnétostatiques utilisés dans cette étude

Caractéristiques :	RBT-20	RBT-95SR
Impédance [Ω]	8	8
Bande Passante effective [kHz]	10 – 40	3 – 22
Puissance Nominale RMS [W]	25	40
Puissance Maximale crête [W]	50	70
Dimensions [mm*mm*mm]	96*57*85	82*47*43
Masse [g]	1500	250

Il a été démontré [Piwakowski et al – 2004] que pour avoir une bonne précision de calcul de vitesse de phase à l'aide de opération Slant-Stack il faut avoir :

$$\frac{L}{\lambda_{max}} > 10 \quad (I-30)$$

où L représente la longueur du profil de mesure. Si le profil est trop court par rapport à la longueur d'onde maximale utilisée, la résolution de la transformation Slant-Stack diminue, et la courbe de dispersion qui en est extraite devient moins précise.

C'est pourquoi un second robot a été construit, avec une longueur maximale de profil beaucoup plus grande, de 185 cm. Cette longueur de profil permettra pas de respecter le second critère pour toutes les mesures effectuées, mais il rendra les mesures de vitesse plus précises. En outre, cette longueur de profil constitue un compromis car permet d'avoir une longueur de robot qui ne dépasse pas 2 m, ce qui simplifie son transport et sa manutention. La figure 1-26 illustre la taille du robot et son encombrement.

La séquence de traitement des données est identique à celle prévue pour le scanner à hautes fréquences. Cependant, plus le signal envoyé possède une bande fréquentielle proche des fréquences audibles (entre 20 Hz et 20 kHz), plus le bruit est gênant, dans la mesure où les ondes sonores sont peu atténuées dans l'air aux plus basses fréquences. Ainsi au cours de l'acquisition, le rapport signal bruit (SNR) doit être plus contrôlé. L'amélioration du SNR peut être obtenu par :

- Augmentation de la puissance de l'émetteur ($A_{émis}$)
- Augmentation de la longueur d'impulsion du signal émis τ (d'où l'utilisation du Chirp)
- « Moyennage » (averaging) des signaux reçus sur la même position (entre 4 et 32 signaux moyennés)
- Augmentation du nombre N de positions du récepteur

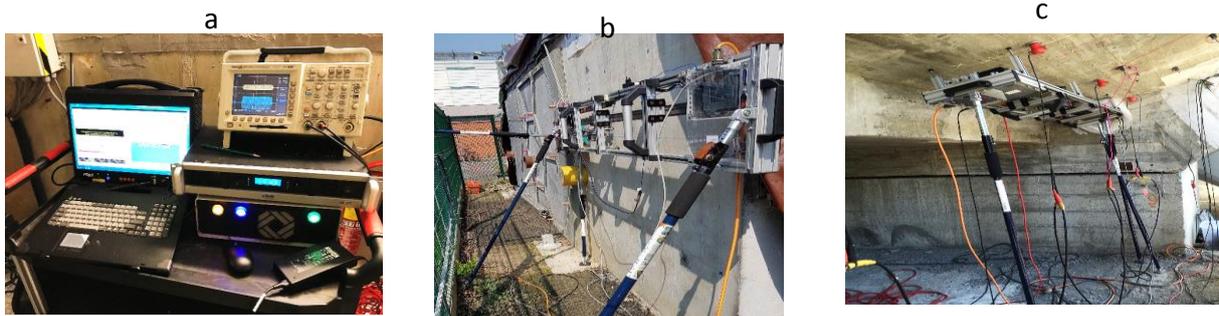


Figure I-26 : a) Ensemble du matériel de contrôle et de pilotage ; b) et c) exemples de scanner installé contre un mur ou la paroi d'une sculpture à ausculter

I.6 Conclusions et contenu de la thèse

Beaucoup de techniques de contrôle non destructif existent et sont utilisées actuellement. La majorité de celles-ci sont capables de conclure sur l'état de la surface de béton auscultée, sur la caractérisation de l'implantation des armatures, sur l'état hydrique du béton ou sur la présence de cavités ou fissures dans le béton mais peu d'entre elles permettent d'obtenir plusieurs informations à elles seules. Certaines présentent des contraintes techniques lourdes concernant le contrôle non destructif de vastes structures, comme l'impossibilité pratique d'automatiser la mesure, ou encore la nécessité d'un contact physique entre le ou les actuateurs ou capteurs et la surface contrôlée.

Parmi ces techniques, celles qui utilisent les ondes de surface sont particulièrement bien indiquées pour le contrôle de surface lorsqu'une seule des surfaces de la structure est accessible. En effet, le fait que la profondeur d'auscultation du matériau soit paramétrée par les bandes fréquentielles émises permet de choisir quel type de contrôle on effectue. Les hautes fréquences permettent par exemple de se focaliser sur le béton de peau, tandis que les fréquences plus basses permettent d'analyser une paroi sur la totalité de son épaisseur.

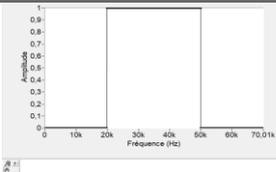
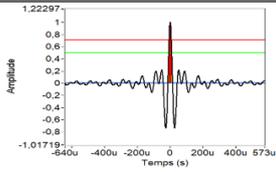
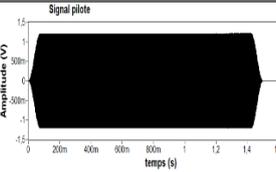
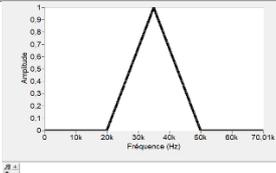
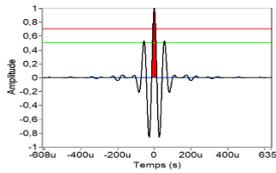
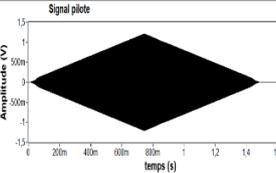
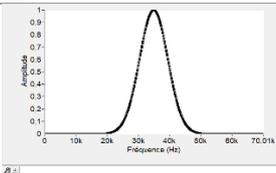
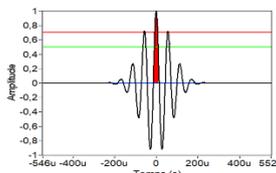
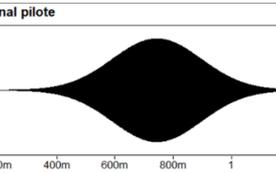
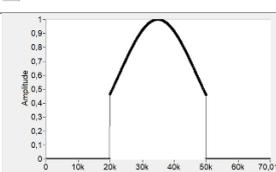
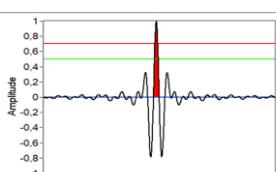
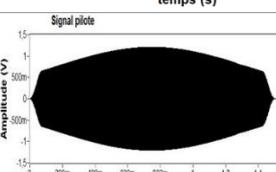
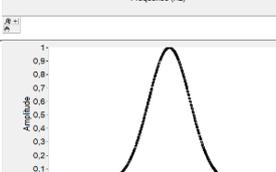
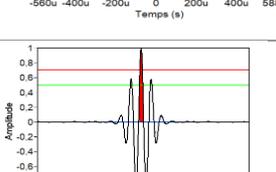
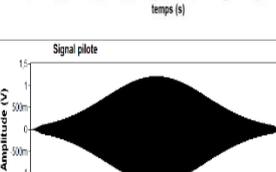
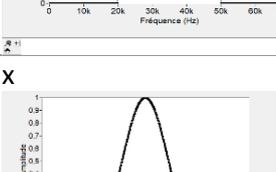
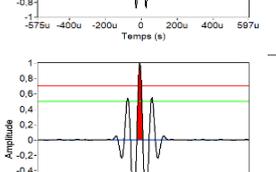
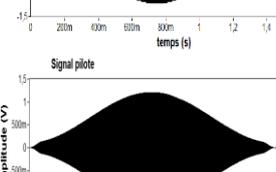
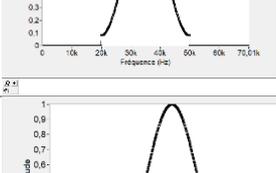
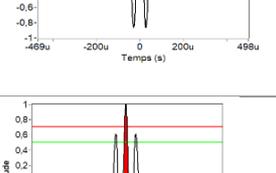
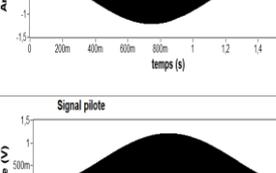
Dans ce chapitre, nous avons introduit globalement la technique CND qui sera utilisée dans cette thèse. Cette technique est sans contact avec la surface auscultée et est réalisée de façon automatique à l'aide de deux scanners. De plus elle nécessite l'accès d'un seul côté sur le mur ausculté. Elle est donc bien adaptée aux solutions d'avenir, c'est-à-dire à l'auscultation automatique de grandes surfaces, comme les murs d'enceintes nucléaires.

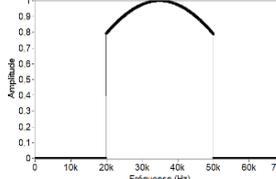
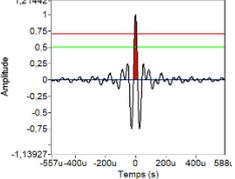
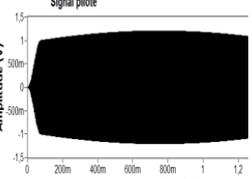
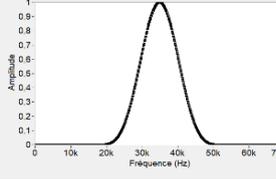
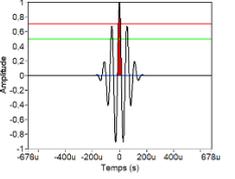
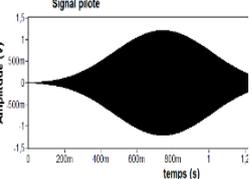
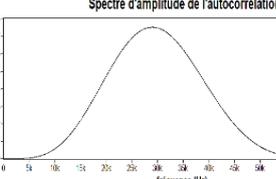
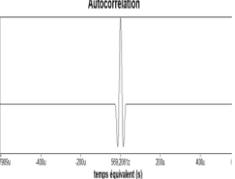
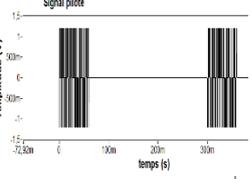
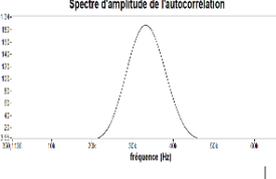
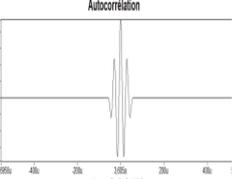
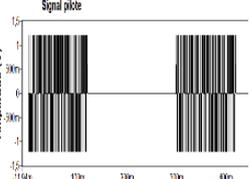
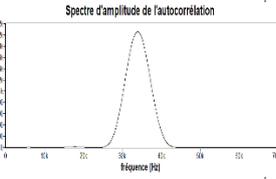
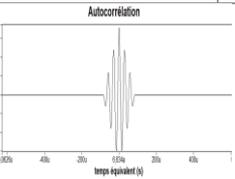
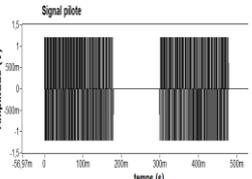
La suite de ce rapport détaillera différents résultats obtenus sur plusieurs propriétés ou pathologies du béton :

- Chapitre 2 : la détection d'une couche de béton lixivié
- Chapitre 3 : l'identification d'une délamination
- Chapitre 4 : la détection et le suivi d'un front de saturation sur matériaux poreux (calcaire, béton)
- Chapitre 5 : la détection d'une fissure ou zone microfissurée

Annexes Chapitre I

Tableau A.I.4.2 : Formes d'enveloppe, ondelettes de Klauder et formes temporelles des impulsions de type chirp et Golay ; tous les chirps ont été générés avec $f_{\min} = 20$ kHz, $f_{\max} = 50$ kHz, $f_c = 35$ kHz et avec une longueur d'impulsion $\tau = 1.5$ s

Forme d'enveloppe $W(t)$	Paramètre	Spectre $S(f)$ Fixé à: 20-50 kHz $F_c=35$ kHz	Ondelette de Klauder $K(t)$	Forme temporelle (avec une pondération de 5%)
Rectangulaire				
Triangulaire				
Gauss	$\gamma = 0,1$			
Gauss	$\gamma = 0,4$			
Gauss	0,2			
hamming		X 		
Hanning				

Kaiser - Bessel	$\beta = 1$			
Blackman-Harris	$\beta = 5$			
Golay	$M = 1$ $B = +/- f_c$			
Golay	$M = 2$ $B = +/- \phi\chi / 2$			
Golay	$M = 3$ $B = +/- \phi\chi / 3$			

Références bibliographiques Chapitre I

- [Abraham et al – 2012] O. ABRAHAM, B. PIWAKOWSKI, G. VILLAIN, Non-contact, automated surface wave measurements for the mechanical characterisation of concrete, *Construction and Building Materials*, 2012.
- [Ambrozinski et al – 2014] L. AMBROZINSKI, B. PIWAKOWSKI, T. STEPINSKI, Application of air-coupled ultrasonic transducers for damage assessment of composite panels, in 6th European Workshop on Structural Health Monitoring. 2014. p. 1-8.
- [Balayssac et Garnier – 2018] J.P. BALAYSSAC, V. GARNIER, Évaluation non destructive des ouvrages en génie civil, ISTE Editions 2018.
- [Balayssac et al – 2012] J.P. BALAYSSAC, S. LAURENS, G. ARLIGUIE, Description of the general outlines of the French project SENSO - Quality assessment and limits of different NDT methods, *Construction and Building Materials*, 2012, Volume 35, p. 131-138.
- [Carde-2007] C. CARDE, *Connaissances fondamentales: La lixiviation, Béton[s]*, n°11, Juillet/Août 2007, <http://doc.lerm.fr/wp-content/uploads/2013/08/lixiviation-carde.pdf>.
- [Chimenti – 2014] D.E. CHIMENTI, Review of air-coupled ultrasonic materials characterization. *Ultrasonics*, 2014, Volume 54, Issue 7, Pages 1804 – 1816.
- [Davis – 1998] A.G. DAVIS, *Non destructive Tests Methods for Evaluation of Concrete in Structures*, Reported by ACI Committee 228, ACI 228.2R-98.
- [Deus et al – 2012] J.M. DEUS, L. FREIRE, M.F. MONTEMOR, X.R. NOVOA, The corrosion of stainless steel rebars in concrete: Temperature effect, *Corrosion Science*, Volume 65, December 2012, Pages 556-560.
- [Garnier-2000] V. GARNIER, G. CORNELOUP, E. TOPPANI & M. LEYGONIE, 2000, *Non-Destructive Evaluation of Concrete Damage by Ultrasound*, Rama 2000, 15th WCNDT
- [Garnier et al – 2013] V. GARNIER, B. PIWAKOWSKI, O. ABRAHAM, Acoustic techniques for concrete evaluation: Improvements, comparisons and consistency, *Construction and Building Materials*, 2013, Volume 43, p. 598-613.
- [Garnier et al – 2014] V. GARNIER, D. MARTINI, J. SALIN, Non-destructive testing of concrete: transfer from laboratory to on-site measurement, in 7th European Workshop on Structure Health Monitoring EWSHM 2014, Nantes, France.
- [Garnier et al – 2016] V. GARNIER, C. PAYAN, M. LOTT, Non Destructive Evaluation of containment walls in nuclear power plants, in 43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2016, p. 080018-1-080018-9.
- [Hosten et al – 1996] B. HOSTEN, D.A. HUTCHINS, D.W. SCHINDEL, Measurement of elastic constants in composite materials using air-coupled ultrasonic bulk waves, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1996, Volume 99, Pages 2116–2123.
- [Kaczmarek et al – 2015] M. KACZMAREK, B. PIWAKOWSKI et R. DRELICH, Non-Contact Ultrasonic Non Destructive Techniques: State of the Art and Their Use in Civil Engineering, NDTCE2015

- [Kaczmarek et al – 2016] M. KACZMAREK, B. PIWAKOWSKI, R. DRELICH, Non-Contact Ultrasonic Non-Destructive Techniques: State of the Art and Their Use in Civil Engineering, *Journal of Infrastructure Systems*, 2016.
- [Krautkrämer – 1990] J. KRAUTKRÄMER et H. KRAUTKRÄMER, *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer Berlin Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-662-10680-8.
- [Larget – 2011] M. LARGET, Contribution à l'évaluation de la dégradation du béton : Thermographie infrarouge et couplage de techniques, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2011, 225 p.
- [Liu et al – 2014] Q. LIU, B. PIWAKOWSKI, Z. LAFHAJ, Automated non-contact NDT by ultrasonic surface waves, in 2014 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology and Application, 2014, IEEE: Chengdu, China.
- [Nguyen – 2016] A.Q. NGUYEN, Evaluation non destructive de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique, Thèse de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, Tableau 1.1.
- [Ollivier-2008c] J-P. OLLIVIER et A. VICHOT, La durabilité des bétons : Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement, Paris : Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 2008, Chap. 12 : La durabilité des bétons vis-à-vis des environnements chimiquement agressifs.
- [Ollivier-2008b] J-P. OLLIVIER et A. VICHOT, La durabilité des bétons : Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement, Paris : Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 2008, Chap. 9 : La durabilité des armatures et du béton d'enrobage.
- [Ollivier-2008a] J-P. OLLIVIER et A. VICHOT, La durabilité des bétons : Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement, Paris : Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 2008, Chap. 6 : La maîtrise de la fissuration au jeune âge.
- [Pabalan-2011] R. PABALAN, L. YANG et K-T CHIANG, Boric Acid Degradation of Reinforced Concrete, Rapport Technique: Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, 2011, DOI: 10.13140/RG.2.1.3257.6400.
- [Papadakis – 1965] EP. Revised grain-scattering formulas and tables. *J Acoust Soc Am* 809 1965;37(4):703–10.
- [Perdijon – 1993] J. PERDIJON, *Le contrôle non destructif par ultrasons*, Hermès, 1993.
- [Piwakowski et Safinowski – 2009] B. PIWAKOWSKI, P. SAFINOWSKI, Non-destructive non-contact air-coupled concrete evaluation by an ultrasound automated device, in NDTCE' 09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 2009, Nantes, France.
- [Piwakowski et al – 2004] B. PIWAKOWSKI, A. FNINE, M. GOUEYGOU, F. BUYLE-BODIN, Generation of Rayleigh waves into mortar and concrete samples, *Ultrasonics*, Volume 42, Issues 1-9, April 2004, Pages395-402
- [Piwakowski et al – 2008] B. PIWAKOWSKI, A. KOSECKI, P. SAFINOWSKI, Contrôle non destructif du béton par ultrasons à l'aide d'un dispositif automatisé, COFREND 2008 Toulouse 20 – 23 mai 2008.
- [Popovics et al – 2000] J.S. POPOVICS, W. SONG, M. GHANDEHARI, K.V. SUBRAMANIAM, J.D. ACHENBACH et S.P. SHAH, Application of wave transmission measurements for crack depth determination in concrete, *ACI Materials Journal*, 2000, Volume 97, Pages 127–135.

[Popovics et Wigggenhauser – 2002] J.S. POPOVICS and H. WIGGENHAUSER, Non-contact laser vibrometer wave sensing on concrete, Proceedings of 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, NY, USA, June.

[Remillieux et al – 2014] M.C. REMILLIEUX, B.E. ANDERSON, T.J. ULRICH, Review of air-coupled transduction for nondestructive testing and evaluation, *Acoustics Today*, 2014, Volume 10, Issue 3, Pages 36 – 45.

[Ryden et al – 2004] N. RYDEN, C. PARC, P. ULRIKSEN et R. MILLER, Multichannel approach to seismic pacemement testing, *J. Geotech. Eng.*, 2004, Volume 130, Issue 6, Pages 636 – 645.

[SENSO – 2009] Projet ANR : « Stratégie d’Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton » Partenaires scientifiques LMDC – Université de Toulouse, GHYMAC – Université de Bordeaux IEMN – Ecole Centrale de Lille, LCPC – Nantes, LCND – Université de la Méditerranée, ONERA – Toulouse, LEAT – UMR 6071 – Université Sophia Antipolis.

[Viktorov – 1967] I.A. VIKTOROV, Rayleigh and Lamb waves, Plenum Press, New York, 1967.

[Villain - 2008] G. VILLAIN, X. DEROBERT, O. ABRAHAM, M. CHEKROUN, O. COFFEC et O. DURAND, Complémentarités de techniques non destructives pour déterminer les propriétés de différents bétons hydrauliques, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Bouguenais, 2008.

[Zhu et Popovics – 2001] J. ZHU et J.S. POPOVICS, Non-contact detection of surface waves in concrete using an air-coupled sensor, In: Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 20B Melville, NY: American Institute of Physics, 1261 – 1268.

[Zhu et Popovics – 2005] J. ZHU et J.S. POPOVICS, Non-contact imaging for surface-opening cracks in concrete with air-coupled sensors, *RILEM Concrete Science and Engineering/ Materials and Structures*, Volume 38, Pages 801 – 806.

Chapitre II

Détection et caractérisation d'un front de lixiviation

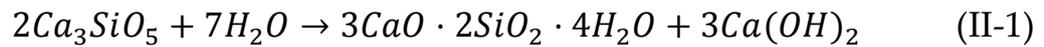
II.1 Introduction

La majorité des bétons armés des structures du génie civil sont soumis à des processus de lixiviation, dans la mesure où il est très courant que ces bétons soient en contact avec un milieu de plus bas pH (le pH du milieu interstitiel du béton étant habituellement compris entre 12 et 13). À partir d'une surface de béton exposée à ce milieu, un front de matériau lixivié va progresser dans la profondeur du béton. Bien que le matériau lixivié perde une partie de ses propriétés mécaniques et de transport, c'est lorsque le front va atteindre les premières armatures d'acier du béton armé que les mécanismes les plus néfastes vont se mettre en place. Le béton d'enrobage étant alors complètement lixivié, cela facilite grandement l'accès de nombreux réactifs au milieu interstitiel du béton et aux armatures, entraînant alors leur corrosion, provoquant le gonflement de leur béton d'enrobage jusqu'à parfois son éclatement, et réduisant considérablement à termes la durabilité de la structure. Si le milieu de plus bas pH considéré est l'eau, la cinétique des mécanismes de lixiviation est extrêmement lente, et le front de lixiviation peut mettre plusieurs dizaines d'années pour se former et évoluer jusqu'aux premières armatures. Cependant, dans le cas où une surface de béton est exposée régulièrement à une solution à très bas pH, comme cela peut être le cas lorsque l'on souhaite se débarrasser des dépôts de calcaire au niveau de certaines structures, ou dans l'hypothèse de précipitations plus acides que la normale, la cinétique du processus de lixiviation est alors considérablement augmentée.

L'ensemble de ces considérations rendent nécessaires les études sur les mécanismes de lixiviation du béton et sur leurs effets. Il devient également nécessaire de trouver des méthodes de détection du front de lixiviation les moins invasives possible, afin d'avoir une vue d'ensemble sur la durée de vie d'un ouvrage et d'envisager des mesures de protection/passivation.

De nombreux mécanismes de lixiviation sont déjà connus et documentés. Dans la mesure où le phénomène de lixiviation qui a lieu naturellement (une exposition à l'eau) est un phénomène très lent, la majorité des études sur matériaux lixiviés ont utilisé un processus accéléré de lixiviation pour des raisons pratiques. Il est possible d'accélérer les réactions par des méthodes électrochimiques [Saito et Deguchi – 2000] mais les méthodes chimiques [Carde et François – 1997 ; Ould Naffa – 2004] (exposition à une solution concentrée de nitrate d'ammonium NH_4NO_3 par exemple) sont souvent préférées. Indépendamment, des études acoustiques [Ould Naffa – 2004 ; Ould Naffa et al – 2002] ont été conduites et ces travaux servent de référence pour cette étude.

Le déséquilibre chimique qui a lieu lors de la mise en contact de la pâte cimentaire du béton avec le milieu lixiviant entraîne une mise en solution des hydrates. Parmi les constituants de la pâte de ciment, la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) est la première à être dissoute, suivie par les silicates de calcium hydratés (C-S-H) puis d'autres constituants tels que les monosulfo-aluminates de calcium hydratés, les aluminates de calcium et les étringites [Agostini et al – 2007].



La perte significative de différents constituants de la pâte cimentaire entraîne d'importantes conséquences sur les propriétés mécaniques et de transfert du matériau. Lorsque la vitesse d'avancement du front de matériau lixivié est étudiée, on retrouve la même évolution : la distance parcourue par le front de lixiviation est proportionnelle à la racine carrée du temps d'exposition [Phung et al – 2016]. La première conséquence de la mise en solution des constituants de la pâte cimentaire est la perte de masse volumique du matériau, ce qui aura pour conséquence une augmentation de la porosité. Pour des mortiers, ces variations structurelles évoluent proportionnellement à la racine carrée du temps d'exposition du mortier à la solution lixiviante, comme illustré sur la figure II-1a. L'augmentation de la porosité, et donc de la porosité connectée, entraîne une augmentation de la perméabilité du matériau aux gaz [Agostini et al – 2007]. La perte de matière entraîne également de fortes variations des propriétés mécaniques, comme une chute du module d'élasticité (illustrée sur la figure II-1b) et de la résistance à la compression.

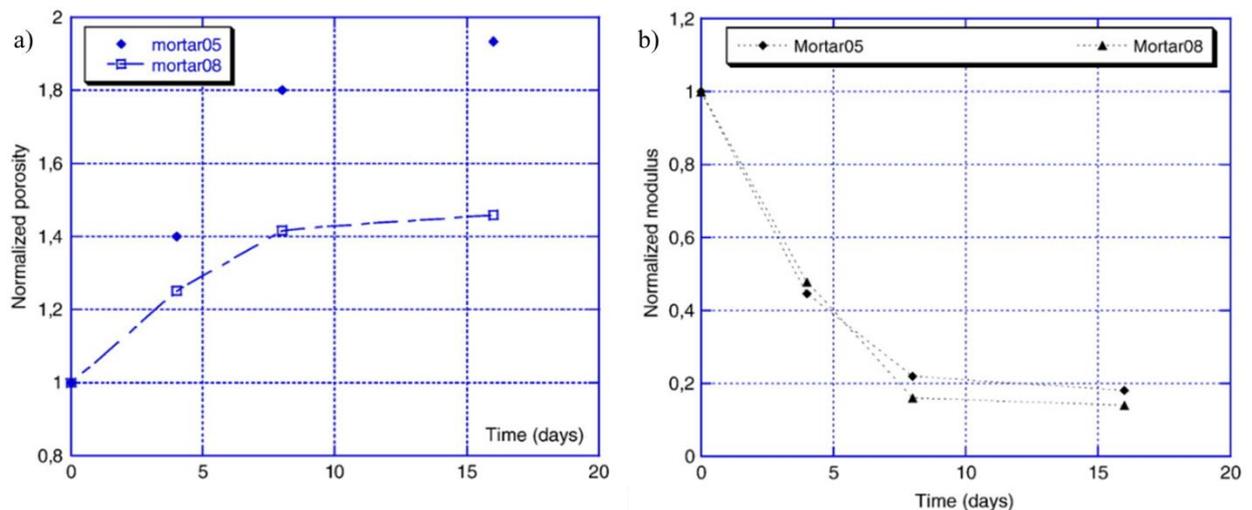


Figure II-1 : Essais de lixiviation de 2 mortiers au NH_4NO_3 , résultats de mesures de a) porosité et de b) module élastique en fonction du temps [Agostini et al – 2007]

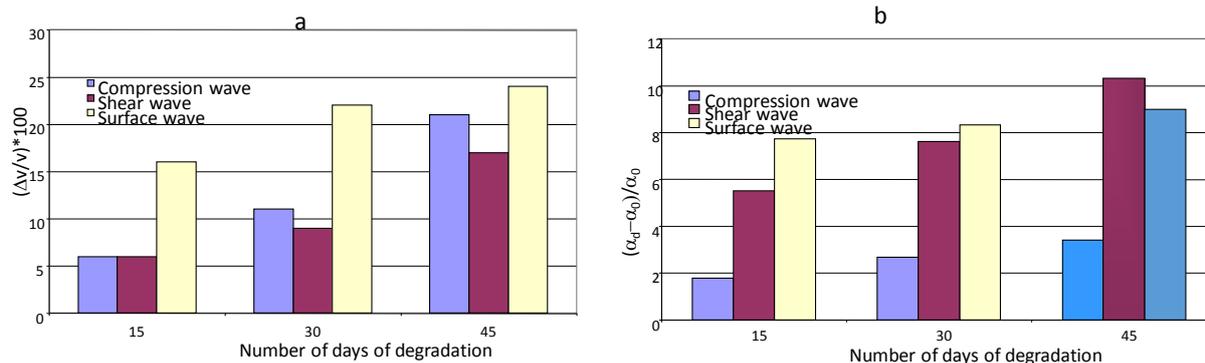


Figure II-2 : Sensibilité des ondes acoustiques à la lixiviation : évolution de la vitesse (a) et de l'atténuation (b) en fonction du temps de dégradation chimique (NH₄NO₃) d'une plaque de mortier [Ould Naffa et al – 2002]

Il paraît établi que les méthodes actuelles de détection de la lixiviation impliquent le carottage d'un échantillon, puis son analyse. L'unique méthode d'identification du front de lixiviation est la différenciation de la zone saine du béton par rapport à la zone lixiviée en fonction du pH du milieu interstitiel respectif. Cela implique l'utilisation d'un indicateur coloré dont la zone de virage du pH se situe entre le pH du matériau lixiviant (généralement en dessous de 7) et le pH du milieu interstitiel du béton (autour de 13). Avec une zone de virage de 8,2 à 10, c'est généralement la phénolphthaléine qui est utilisée : elle est incolore en milieu acide ou faiblement basique, et rose en milieu basique ou très basique.

Or les méthodes destructives de contrôle du béton ne peuvent pas toujours être mises en œuvre, pour des raisons évidentes. Il semble donc intéressant de vérifier parmi les méthodes non-destructives celles qui permettent de détecter et caractériser la lixiviation.

Les conclusions des travaux précédents (cf. Fig. II-2) suggèrent que parmi les ondes mécaniques, l'onde de surface est la plus sensible à la lixiviation [Ould Naffa – 2004]. Cela a motivé l'utilisation des ondes de surface pour tenter de caractériser la lixiviation d'une surface de béton dans cette étude. L'objectif de ce chapitre sera d'évaluer la capacité de la méthode acoustique sans contact présentée au chapitre I à détecter et à caractériser la lixiviation d'une surface de béton/béton armé. Les performances de cette méthode non destructive seront testées sur des éprouvettes, et les résultats seront comparés à des méthodes de mesures destructives nécessitant un carottage des éprouvettes.

II.2 Démarche expérimentale

Dans le but de rendre compte de la détection de la lixiviation d'un matériau du génie civil, il a été décidé de mener une attaque lixiviante accélérée sur des éprouvettes de béton, et d'effectuer des mesures acoustiques pour ensuite les corrélérer à d'autres mesures faites sur le matériau lixivié. Dans la mesure où ce qui importe est de pouvoir suivre la propagation d'un front de matériau dégradé, la dégradation a été faite progressivement, avec une alternance entre un temps de dégradation et un temps de mesures.

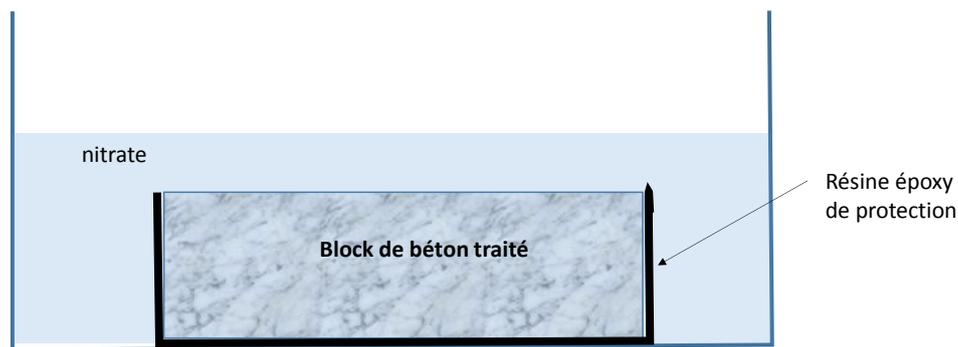


Figure II-3 : Schéma du dispositif expérimental pour l'une des dalles à lixivier

Afin de reproduire le plus fidèlement possible l'exposition du matériau dégradé au fluide lixiviant, la proposition de plonger la surface à dégrader dans un lit de fluide lixiviant a été exclue. La solution retenue consiste à plonger l'éprouvette dans une solution lixiviante jusqu'à l'immersion complète.

L'approche utilisée est illustrée sur la figure II-3. En prenant en compte le fait qu'*in situ*, seul un versant de la structure est attaqué, il a été décidé qu'une seule surface serait mise au contact de la solution lixiviante, reproduisant ainsi au mieux les conditions de terrain.

Afin d'empêcher toutes les surfaces sauf une d'être en contact avec la solution lixiviante, la solution adoptée a été d'isoler complètement ces surfaces en leur appliquant une résine imperméabilisante MAEVA (la base et le durcisseur sont fabriqués par *max perlès et cie*).

II.2.1 Description des échantillons et du matériel utilisés

Pour des raisons pratiques, il était important que la surface attaquée soit suffisamment grande, afin que le scanner acoustique HF puisse facilement se positionner sur cette surface pour la mesure. Une surface de 50 x 25 cm² a été choisie. Afin de choisir la 3^{ème} dimension des éprouvettes, il a fallu considérer la pénétration maximale des ondes de surface d_{\max} (cf. Eq. (I-23)) accessible à l'aide du scanner HF,

ainsi que la propagation du front de lixiviation, afin que les ondes envoyées et reçues restent des ondes de surface et ne deviennent pas des ondes de plaque (voir le paragraphe I.3.2). Pour cette raison, la profondeur de l'éprouvette devait dépasser au moins $d_{max} = 6$ cm. Par sécurité, il a été décidé de doubler cette limite :

$$h > 2. d_{max} \quad (II-2)$$

ce qui donne $h = 12$ cm comme profondeur choisie pour les éprouvettes.

L'expérimentation était programmée avec trois éprouvettes (Fig. II-4) :

- Une éprouvette a été consacrée aux mesures ultrasonores avec le scanner HF dont la profondeur de pénétration des ondes est de l'ordre des profondeurs de lixiviation supposées
- Afin de pouvoir faire des mesures destructives de matériau, un carottage était nécessaire pour chaque étape de lixiviation ; une deuxième éprouvette a donc été affectée à ces mesures
- Une troisième éprouvette a été fabriquée, avec un lit d'armatures d'acier à 3 cm de profondeur en dessous de la surface attaquée, afin de vérifier si la méthode acoustique utilisée permet de positionner le front de matériau dégradé par rapport à un lit d'aciers ; la composition du béton utilisé est donnée dans le tableau II-1

Tableau II-1 : Formulation du béton utilisé pour l'étude sur la lixiviation

Composants	Eau	Ciment	Sables (0-4 mm)	Graviers (4-11 mm)	Graviers (8-16 mm)	Plastifiant (Sikaplast)
Quantité massique (kg/m ³ de béton)	167	320	830	445	550	2,6



Figure II-4 : Photo des 3 éprouvettes de béton imperméabilisées (la partie latérale couverte par la résine est plus foncée) ; chaque surface orientée vers le haut sur la photo sera la surface attaquée chimiquement

La solution lixiviante choisie est une solution de nitrate d'ammonium à 6 moles par litre de solution. Elle permet de considérablement accélérer le processus de lixiviation qui existe naturellement avec l'eau. Le nitrate d'ammonium utilisé est fabriqué par la société *Sigma Aldrich*.



Figure II-5 : [gauche] 3 dalles de béton recouvertes de résines imperméabilisantes sur toutes les surfaces libres (sur la photo) ; [milieu] bacs de rétention utilisés ; [droite] contenants du nitrate d'ammonium pur

Des bacs de rétention contenant la solution de nitrate d'ammonium ont été utilisés (figure II-5[droite]) pour y plonger les éprouvettes de béton : un bac de rétention pour chaque éprouvette.

La réaction de dissolution du nitrate d'ammonium étant très endothermique, on peut observer la formation de givre sur les parois d'un bac de rétention sur la figure II-6.



Figure II-6 : [gauche] Illustration de la réaction endothermique de dissolution du NH_4NO_3 (formation de givre) ; [droite] éprouvette de béton immergée dans la solution lixiviante

II.2.2 Protocole expérimental

Ainsi, lors de chaque phase de dégradation, les 3 éprouvettes étaient immergées dans leurs bacs de rétention respectifs pendant une durée déterminée. Une phase de dégradation désigne ici une période entre 2 temps de mesure, pendant laquelle les dalles sont immergées et la surface de chaque dalle qui n'est pas imperméabilisée est attaquée chimiquement par le nitrate d'ammonium.

Au total, en plus de l'état initial, 6 étapes de mesures ont eu lieu. En considérant uniquement le temps total cumulé que les éprouvettes ont passé au contact du nitrate d'ammonium, les temps de mesures correspondent respectivement à 7, 14, 19, 24, 26 et 28 jours d'exposition au NH_4NO_3 . Ceci donne finalement 7 mesures (y compris le cas sans exposition au produit, à 0 jours).

A l'issue de chaque dégradation, une mesure avait lieu, comprenant :

- Des mesures acoustiques sur la dalle dédiée à ce type de mesure
- Des mesures acoustiques sur la dalle contenant un lit d'armatures
- Un carottage sur la troisième dalle, afin d'effectuer à posteriori des mesures matériau (ainsi 7 carottes cylindriques ont été prélevées au total)

Afin d'avoir une quantité de matière suffisante pour des analyses matériau, un carottier de diamètre 65 mm a été utilisé (plutôt que 38 mm, autre diamètre standard existant).

De la résine imperméabilisante était appliquée sur la paroi cylindrique créée par la carotte, comme l'illustre la figure II-7, ceci étant afin de ne pas polluer la dalle avec une lixiviation évoluant radialement par les parois de la carotte.

La dalle dédiée aux carottages à l'issue de cette étude est montrée sur la figure II-7[droite]. Afin de pouvoir observer la propagation du front de matériau dégradé, chaque carotte a été coupée en 4 tranches de 2 cm à partir de la surface en contact avec la solution de nitrate, comme on peut le voir sur la figure II-8. Le reste de la carotte n'a pas été étudié car considéré comme non atteint par le front de lixiviation.



Figure II-7 : [gauche] Une carotte extraite après la première phase de dégradation ; [droite] la dalle carottée avec la réimperméabilisation de chaque zone carottée

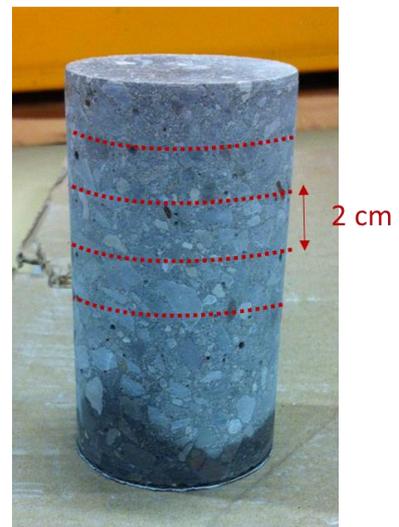
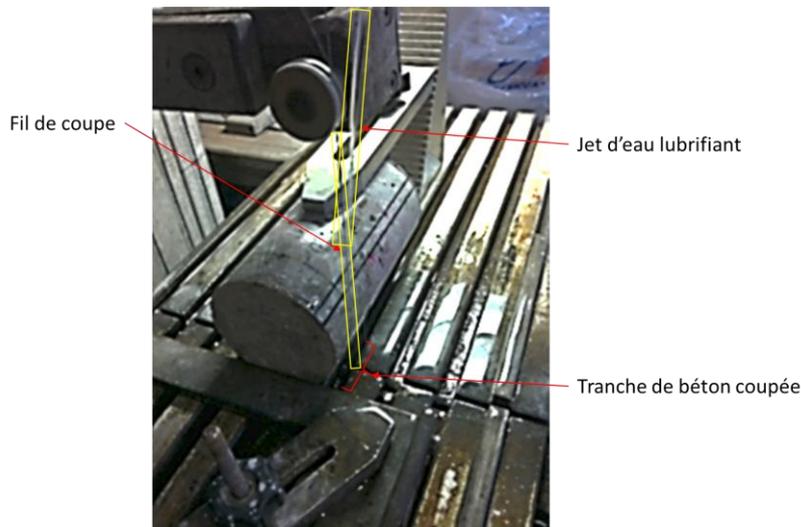


Figure II-8 : [gauche] Scie à fil utilisée pour couper les carottes ; [droite] schéma de coupe de chaque carotte (4 tranches de 2 cm d'épaisseur)

II.2.3 Description de la campagne expérimentale

À partir des échantillons carottés à chaque étape de lixiviation, et à partir du matériel disponible au laboratoire de génie civil, il a été décidé d'utiliser plusieurs techniques de contrôle (dit destructif car nécessitant le carottage de la structure), afin de tenter de corréler la dégradation chimique avec des variations de propriétés mécaniques ou de transfert du béton. Les résultats peuvent être comparés à ceux des techniques non destructives, afin d'évaluer l'efficacité de la méthode CND testée.

Ce paragraphe va ainsi détailler 3 techniques de mesures matériau :

- Indicateur de pH
- Micro-indentation
- Perméabilité à l'argon

et la technique CND :

- Scanner sans contact à ondes de surface hautes fréquences

II.2.3.1 Indicateur de pH : la phénolphtaléine

Cette méthode consiste à appliquer avec un pinceau le produit sur la section d'une tranche qui a été fendue. L'indicateur réagit en fonction du pH, c'est-à-dire que l'on peut observer un changement de couleur là où il y a la modification de pH, donc là où il y a le front de lixiviation (voir Figure II-9, on observe le changement à 1cm de la surface environ).



Figure II-9 : Photo d'une tranche fendue sur laquelle on a appliqué de la phénolphtaléine

II.2.3.2 Perméabilité au gaz – Cellule de perméabilité

Afin de suivre l'évolution des propriétés de transfert en fonction du temps d'exposition du matériau à la solution de nitrates, une mesure de la perméabilité au gaz a été effectuée sur chaque tranche issue de chaque carotte.

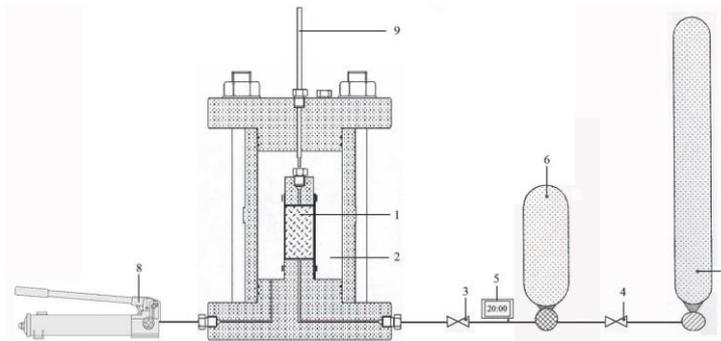


Figure II-10 : Schéma de fonctionnement d'une cellule de perméabilité

Pour ce faire, une cellule de perméabilité développée par le laboratoire de Génie Civil de l'École Centrale de Lille [Loosveldt-Claudot et al – 2002] a été utilisée (figure II-10). Elle repose sur le principe d'un écoulement de gaz en régime permanent établi à travers l'échantillon par différence de pression, grâce à un réservoir tampon relié à une bouteille de gaz situé en amont de l'échantillon et délivrant une pression constante, et un réservoir situé en aval de l'échantillon relié à l'air atmosphérique. Pour que l'écoulement se fasse dans ces conditions, l'échantillon est placé dans une manchette en silicone au diamètre adapté à celui de l'échantillon. Des pièces du dispositif ont été créées afin de diffuser l'air injecté sur toute la section de l'échantillon. De plus, afin que l'air injecté percole à travers l'échantillon et ne passe pas au niveau des parois latérales de l'échantillon, l'échantillon et sa manchette sont confinés par une huile injectée à haute pression.

Une fois le régime permanent établi, on interrompt l'alimentation en gaz en amont et on bloque l'accès du gaz à l'air atmosphérique en aval. Un régime transitoire s'établit pendant lequel le gaz en amont continue de percoler à travers l'échantillon, et on observe une diminution et la pression du réservoir en amont et une augmentation de la pression du réservoir situé en aval. Dans le cas théorique où le dispositif reste dans cet état pendant un temps infiniment long, les 2 réservoirs finiront avec la même pression.

Dans ces conditions expérimentales, la loi de Darcy s'écrit :

$$\vec{q} = -\frac{\kappa}{\mu} \vec{\nabla} p \quad (\text{II-3})$$

avec \vec{q} désignant le vecteur flux de gaz (m/s), κ la perméabilité apparente de l'échantillon (m^2), μ la viscosité dynamique du gaz percolant ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), et p désignant le champ de pression au sein de l'échantillon.

Dans les conditions d'expérience, le comportement du gaz percolant utilisé peut être considéré étant celui d'un gaz parfait, aussi cela permet d'écrire :

$$\frac{p}{\rho} = \text{Constante} \quad (\text{II-4})$$

Les expressions des équations (II-3) et (II-4) s'intègrent à l'équation de conservation de la masse, ce qui permet d'exprimer la répartition de pression au sein de l'échantillon :

$$P(x, t) = \sqrt{P_1(t)^2 \left(1 - \frac{x}{h}\right) + P_0(t)^2 \frac{x}{h}} \quad (\text{II-5})$$

En projetant la relation (II-3) sur la direction de l'écoulement et en l'intégrant sur la surface de l'échantillon située en amont, on déduit une expression de la perméabilité apparente en fonction d'autres paramètres mesurables :

$$\kappa = \frac{2Qh\mu P_1(t)}{S(P_1(t)^2 - P_0(t)^2)} \quad (\text{II-6})$$

La hauteur h (m) et la section S (m²) de l'échantillon sont mesurées préalablement, la viscosité dynamique μ est également connue. P_1 et P_0 sont mesurées grâce à des manomètres présent sur la cellule.

En considérant à nouveau l'hypothèse d'un gaz parfait, et en conservant des conditions isothermes d'écoulement, l'expression de la compressibilité isotherme du gaz permet d'obtenir celle du débit volumique :

$$Q = \frac{-V_r \frac{dP_1}{dt}}{P_1} \quad (\text{II-7})$$

V_r désigne ici le volume du réservoir ainsi que le volume de canalisations accessible par le gaz en amont de l'échantillon.

Pour des considérations pratiques, la mesure de la variation de pression sera faite sur un laps de temps court au début du régime transitoire car elle peut y être considérée constante.

Le même raisonnement permet d'obtenir une expression du débit volumique en aval de l'échantillon puis de la perméabilité apparente, et cette dernière peut ensuite être comparée à celle mesurée précédemment.

En plus de ces mesures de perméabilité, des mesures de perméabilité de surface ont été effectuées sur les dalles non carottées à l'issue de chaque étape de dégradation grâce à un dispositif TORRENT (fabriqué par PROCEQ). Cependant, les résultats sur le béton de cette étude ne semblaient pas fiables (mesures non reproductibles, valeurs en dehors des intervalles vraisemblables etc.), ils n'ont donc pas été inclus dans ce rapport.

II.2.3.3 Module élastique local – Dispositif de micro-indentation

Le suivi de l'évolution des propriétés mécaniques du béton au fur et à mesure de sa dégradation par lixiviation a pu être effectué grâce à une technique de micro-indentation [Ibrahim – 2008] (voir figure II-11).

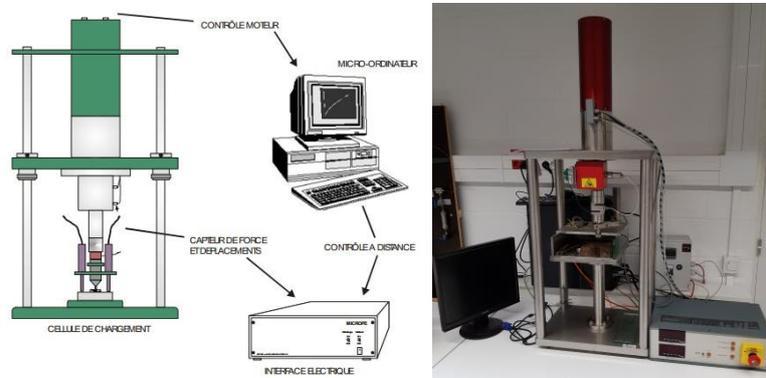


Figure II-11 : [gauche] Schéma de principe du micro-indentateur ; [droite] photo du micro-indentateur utilisé

Le principe de cette technique repose sur l'enfoncement d'un indenteur dans l'échantillon. La mesure de la force exercée sur l'indenteur ainsi que son enfoncement dans l'échantillon sur un cycle d'enfoncement/retrait de l'indenteur permet de déterminer certains paramètres élastiques de l'échantillon. Un exemple de courbe de mesure de la force exercée en fonction de l'enfoncement de l'indenteur est présenté sur la figure II-12.

Ce cycle présente une phase de relâchement du matériau entre la phase de charge et de décharge, ce qui explique la chute de la force exercée à déplacement constant pour un déplacement de 0,25 mm sur la figure II-12. Cette phase permet d'évaluer certaines caractéristiques viscoélastiques du matériau, qui ne seront cependant pas considérées dans cette étude.

Lors de la phase de charge, il est possible d'observer sur la courbe, en plus d'une zone élastique, une zone plastique, présentant une pente moins importante que celle de la zone élastique. Afin de simplifier le dépouillement des mesures effectuées, seule la partie en décharge aura été traitée, car celle-ci rend seulement compte des propriétés élastiques du matériau, objets de cette étude.

Lorsque l'indenteur est cylindrique à base plate, une solution analytique au contact entre l'indenteur et le matériau de l'échantillon supposé semi-infini a été trouvée par Boussinesq [1885] :

$$\frac{dP}{de} = \frac{E D}{1-\nu^2} \quad (\text{II-8})$$

où P représente la force appliquée (N), e représente l'enfoncement de l'indenteur (mm), E et ν sont respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson du matériau testé et D le diamètre de l'indenteur utilisé.

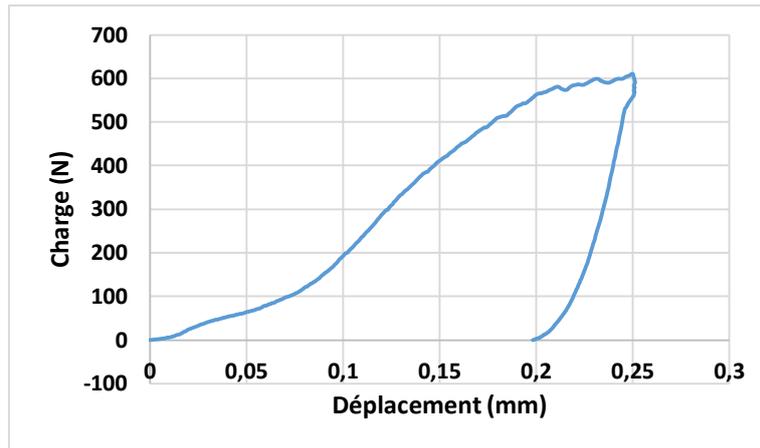


Figure II-12 : Cycle de charge/décharge d'un essai de micro-indentation sur un échantillon de béton

Il est possible de ne pas prendre en considération une variation de ν si l'on considère qu'il reste inférieur à 0,4. En effet dans ces conditions, une variation n'aurait que peu d'incidence sur le calcul. On considèrera donc un coefficient de Poisson constant à 0,2 (valeur commune pour un béton). Ainsi les variations de pente qui seront observées seront considérés uniquement imputables à une variation du module élastique.

Approche par tranche

Pour chaque tranche issue des carottes de béton, 10 points de mesure ont été sélectionnés sur chaque face. Les points sont répartis uniformément sur toute la surface interstitielle de pâte cimentaire.

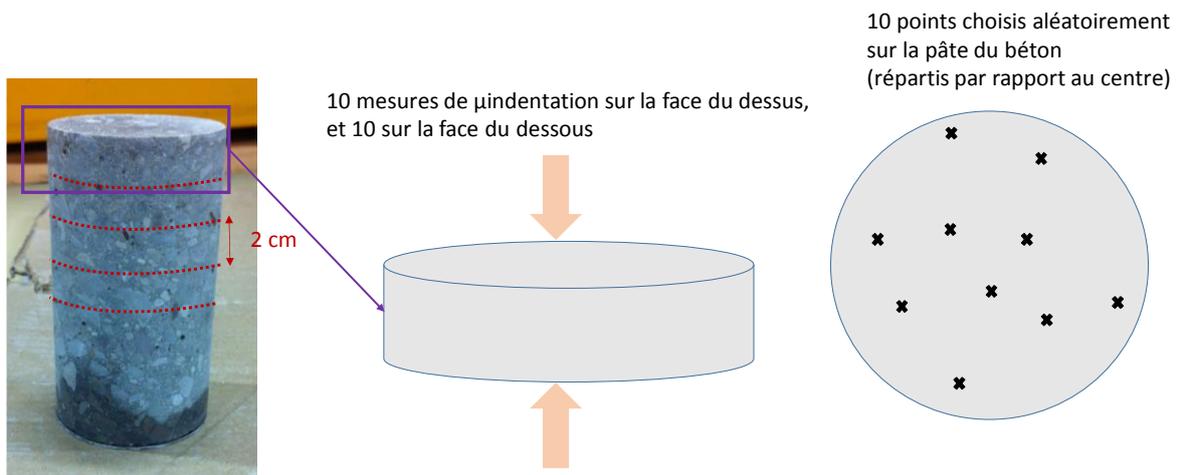


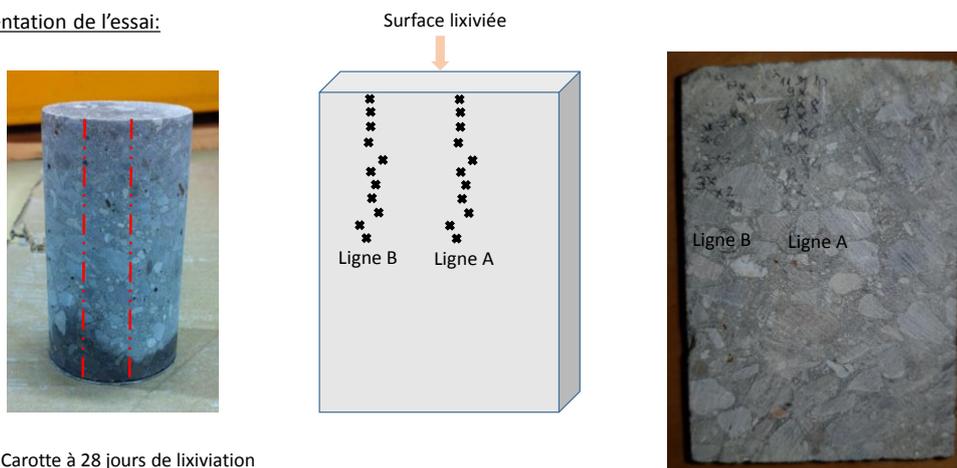
Figure II-13 : [gauche] Photo schématisant le découpage des carottes par tranches de 2 cm d'épaisseur ; [milieu] schéma représentant la démarche de microindentation sur chaque tranche et [droite] la répartition aléatoire des points d'indentation sur la pâte cimentaire

En définitive, la technique de microindentation consiste à obtenir une pente $\frac{dP}{de}$ en fonction de la profondeur et du temps de dégradation.

Approche globale

En plus des tranches issues de carottages effectués à chaque temps de mesure, un huitième carottage a été réalisé à la fin de l'étude. La carotte a ensuite été sciée dans le sens de l'axe, puis 2 séries d'une dizaine de points ont été placées sur la tranche obtenue, à partir de la surface lixiviée, afin de rendre compte de l'évolution du module élastique de manière plus continue (voir figure II-14).

Présentation de l'essai:



Carotte à 28 jours de lixiviation

Figure II-14 : [gauche] Carotte extraite en fin d'étude avec indication de découpe ultérieure ; [milieu] schéma des 2 lignes de points d'indentation choisies [droite] sur la tranche issue de la découpe, tracé de 2 lignes d'une dizaine de points d'indentation chacune

Cette mesure consiste à donner une pente $\frac{dP}{de}$ en fonction de la profondeur après la dernière dégradation (à la fin des mesures).

II.2.3.4 Mesure acoustique à l'aide du scanner hautes fréquences

Selon les résultats de Ould Naffa [2004], l'onde acoustique la plus sensible à la dégradation chimique est l'onde de surface. Il s'agit d'un résultat prévisible car cette onde se propage uniquement en surface, là où la dégradation a lieu. Il s'avère alors logique d'utiliser pour cette étude le scanner haute fréquences à ondes de surface décrit dans le paragraphe I.4.

La figure II-15 montre le scanner sur la surface d'une dalle examinée. En se référant aux paramètres et réglages détaillés dans le paragraphe I.4, les mesures ont été réalisées en respectant le protocole indiqué dans le tableau II-2.

La figure II-16 donne des exemples de signaux mesurés et les résultats de traitement qui permettent d'obtenir la caractéristique de dispersion et de l'atténuation en fonction de la fréquence. Ce type de mesure a été réalisé pour chaque étape de dégradation.

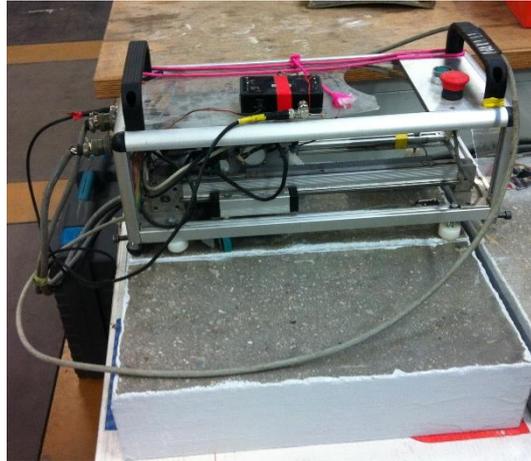


Figure II-15 : Scanner hautes fréquences posé sur la surface d'une dalle examinée (dispositif de mesure acoustique)

Afin de couvrir une bande fréquentielle aussi large que possible, les mesures ont été effectuées pour trois transducteurs différents dans les bandes [15 kHz – 130 kHz], [30 kHz – 200 kHz] et [70 kHz – 400 kHz] (voir figures II-16c et II-16d). Les courbes de dispersion de vitesse et d'atténuation ont ensuite été combinées ensemble (figures II-16e et II-16f).

Afin de donner une représentation plus homogène du béton, qui est un matériau hétérogène, les mesures ont été réalisées sur 5 profils parallèles différents espacés de 2 cm environs et les résultats ont été moyennés.

De plus, afin d'améliorer le rapport signal/bruit (SNR), le moyennage (« averaging ») du signal reçu sur une position était utilisé (entre 8 et 32 fois en fonction du niveau du signal).

Tableau II-2 : Paramètres et réglages du scanner

Nombre de profils par dalle	transducteurs utilisés (bandes fréquentielles associées)	Longueur d'un profil L (cm)	Ecart entre les points de mesure (cm)	Nombre de points de mesure par profil N	Angle d'attaque $\beta(^{\circ})$	Forme d'impulsion W(t)	« Averaging » ou moyennage
5	T50 : 15 kHz – 130 kHz	25	0,5	50	8.5	Chirp rectangulaire	32
	T75 : 30 kHz – 200 kHz						16
	T150 : 70 kHz – 400 kHz						8

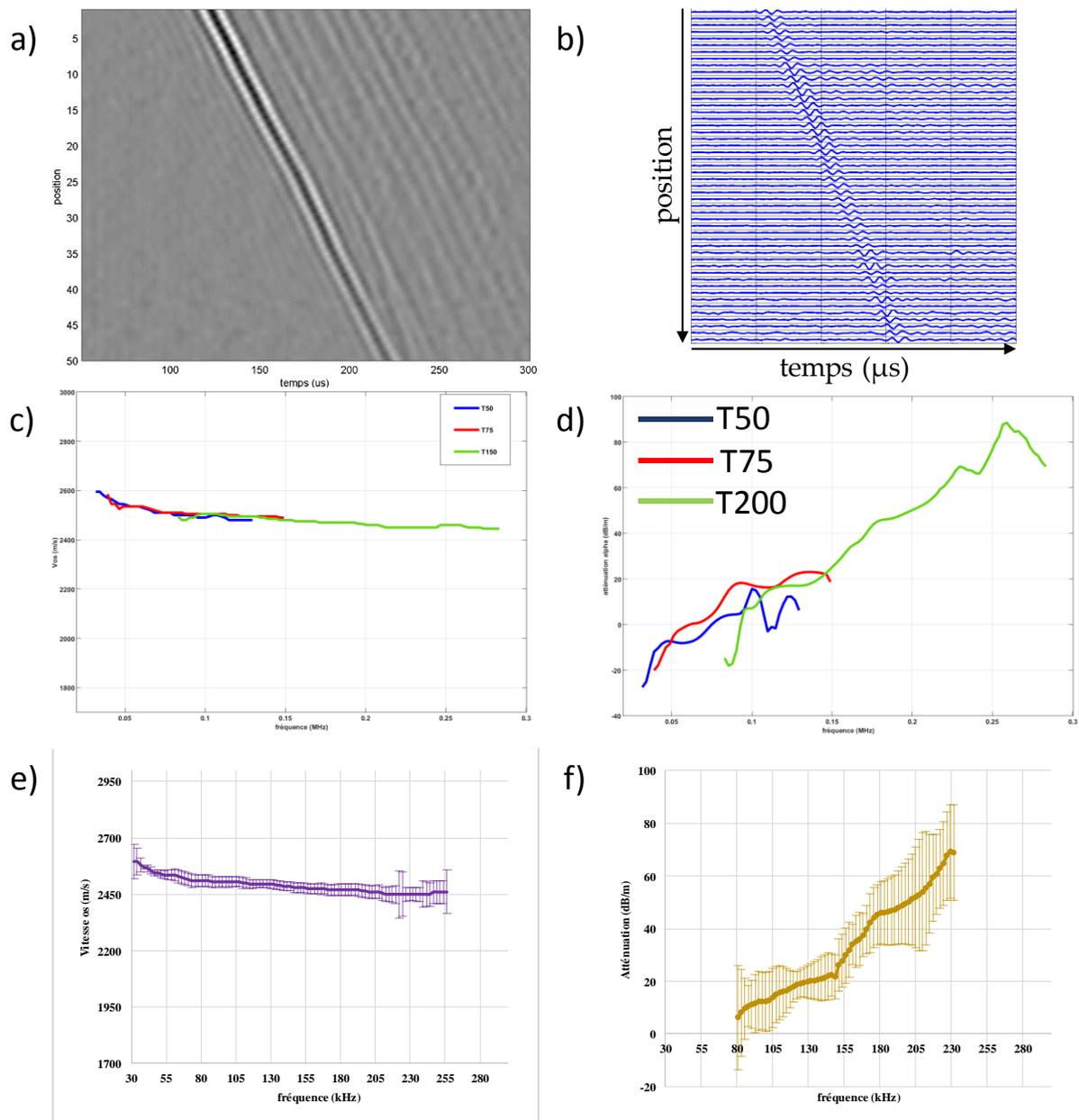


Figure II-16 : a) Exemple de B-scan en échelle de gris pour une mesure avec le transducteur T75 ; b) le même B-scan normalisé ; c) 3 courbes de dispersion de vitesse, une par transducteur ; d) 3 courbes d'atténuation, une par transducteur ; e) courbe de dispersion résultante de la combinaison des 3 courbes précédentes (c)); f) courbe d'atténuation résultante de la combinaison des 3 courbes précédentes (d))

II.3 Présentation des résultats obtenus

Cette partie sera introduite par l'observation effective de la progression du front de lixiviation grâce à un indicateur coloré. Les résultats sur des essais en laboratoire montreront ensuite la chute des propriétés élastiques et de transfert sur matériau dégradé grâce aux essais de perméabilité à l'argon et de microindentation respectivement. Enfin, une présentation des résultats sur les ondes de surface permettra de conclure sur la pertinence de cette technique CND dans le cadre de la détection d'un front de lixiviation.

II.3.1 Résultats de l'observation visuelle après utilisation de phénolphtaléine

Afin de vérifier la profondeur à laquelle le front de lixiviation s'est propagé, un indicateur coloré, la phénolphtaléine, a été appliqué sur chaque tranche, après les avoir fendues. La phénolphtaléine est un indicateur coloré dont la zone de virage avoisine 9,4. Cela donne une surface incolore quand le pH est inférieur à 9,4 et une surface rose lorsqu'il est supérieur à 9,4. Ainsi un béton sain est identifié par les zones roses tandis que les zones incolores (hors granulats visibles) indiquent un béton lixivié. La figure II-17 montre que la 2^{ème} tranche n'a pas été atteinte par le front de lixiviation, seule la première l'a été.



Figure II-17 : 2^{ème} tranche (profondeur : 2 cm à 4 cm) issue de la carotte ayant subi 28 jours de lixiviation, fendue puis enduite de phénolphtaléine

En se focalisant sur les premières tranches de chaque carotte (profondeur : 0 cm à 2 cm), on constate que le front de lixiviation progresse avec le temps d'exposition à la solution lixiviante (figure II-18). On observe également que sur chaque tranche, la profondeur atteinte par le front n'est pas uniforme. La figure II-19 présente, pour un faciès de rupture par fendage de chaque tranche présentée sur la figure II-18, l'évolution des valeurs minimales, maximales et moyennes du front de lixiviation.

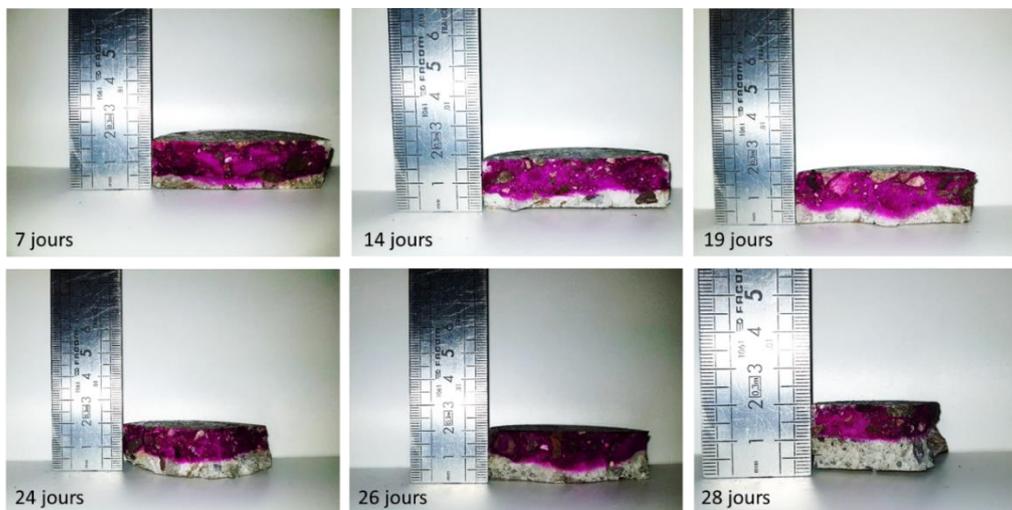


Figure II-18 : Suivi de l'évolution du front de lixiviation sur la 1^{ère} tranche de chaque carotte par l'utilisation d'un indicateur coloré

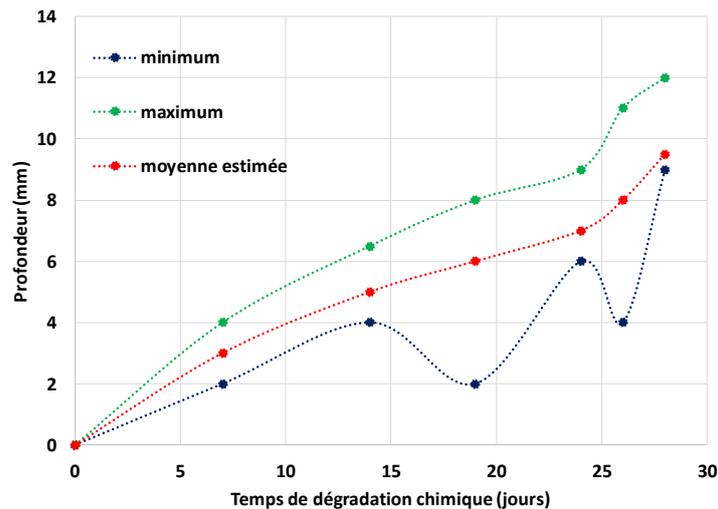


Figure II-19 : Évolution des profondeurs du front de lixiviation mesurées sur les faciès de rupture des premières tranches issues de chaque carottage

Ainsi, l'observation des faciès des tranches carottées, découpées puis fendues a permis, grâce à la phénolphthaléine, de montrer que le front de lixiviation a avancé de 5 mm en 7 jours, puis jusqu'à 10 mm de profondeur au bout de 28 jours. La vitesse d'approche du front de lixiviation sur la première semaine est comparable à d'autres mesures effectuées dans des conditions proches. D'après Agostini et al [2007], pour un mortier dont le rapport E/C est de 0,5, pour la même solution lixiviante, le front a progressé de 4 mm en 4 jours. Jebli et al [2015] ont également obtenu la même vitesse de progression sur les premiers jours pour la même solution de nitrate d'ammonium, pour un béton dont le rapport E/C vaut 0,5.

L'étendue des valeurs des profondeurs observées pour chaque échantillon montre que le béton utilisé est très hétérogène, ce qui sera confirmé par les mesures de microindentation dont les résultats sont détaillés ci-après.

II.3.2 Résultats des mesures de microindentation sur tranches issues de carottages

Chaque tranche fait approximativement 2 cm d'épaisseur. Les surfaces à 19 mm et à 21 mm de profondeur étant 2 surfaces contiguës mais appartenant à 2 tranches différentes, elles sont identifiées avec des profondeurs proches mais différentes. En réalité elles correspondent toutes les deux à une profondeur de 20 mm environ. Le même raisonnement s'applique pour les autres faibles écarts de profondeur indiqués sur la figure II-20. Une autre présentation complémentaire de ces mesures est présentée en annexe figure A.II.3.2.

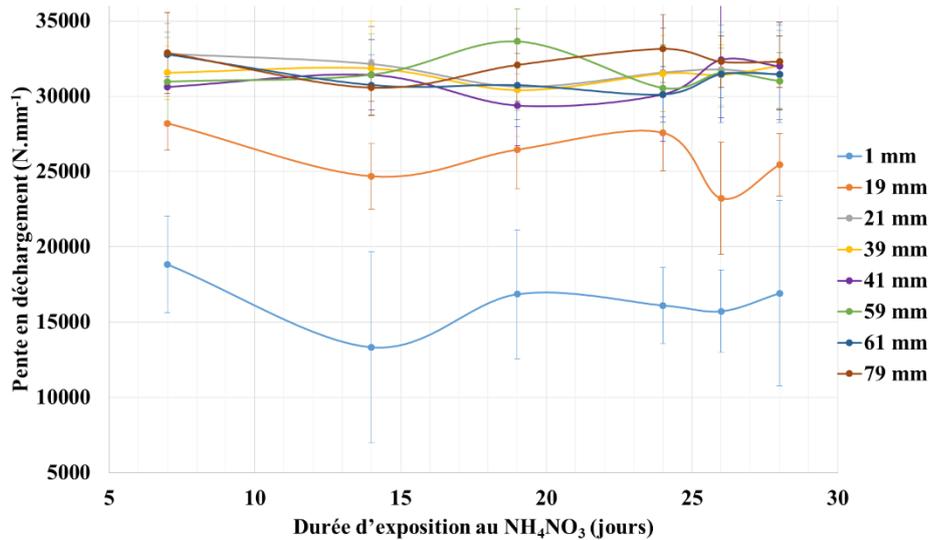


Figure II-20 : Évolution de la pente [Force/déplacement] sur essai de microindentation en fonction du temps d'exposition à la solution lixivante pour chaque face de chaque tranche issue des carottages

On observe que seule la première couche a été affectée par la lixiviation. Le module élastique mesuré a été divisé par 2 entre l'état sain et les 7 premiers jours de dégradation, en considérant que les couches les plus profondes correspondent à un matériau sain. En revanche, il y a peu d'évolution au fur et à mesure du temps d'exposition, même si le front de lixiviation progresse effectivement. Cela permet de conclure que la technique de microindentation permet uniquement de distinguer un matériau sain d'un matériau dégradé, mais ne permet pas de suivre l'évolution d'un front de dégradation chimique avec précision.

On remarque que les écart-types sont importants, mais n'empêche pas l'interprétation des résultats, ni l'évaluation de la grandeur mesurée. Cela manifeste une inhomogénéité du matériau sur sa surface. Cette inhomogénéité observée par microindentation est corroborée avec l'analyse par l'indicateur coloré. Comme explicité dans le point suivant, les mesures de perméabilité à l'argon sont plus sensibles que les mesures de microindentation.

Globalement, on peut dire que la dégradation chimique (donc l'augmentation de la pente) se limite à la couche de surface à une profondeur de 2 cm environs. La dégradation ne se propage donc que jusque 2 cm. Ces résultats sont surprenants car on attendrait une progression plus importante de la profondeur de dégradation en fonction de temps.

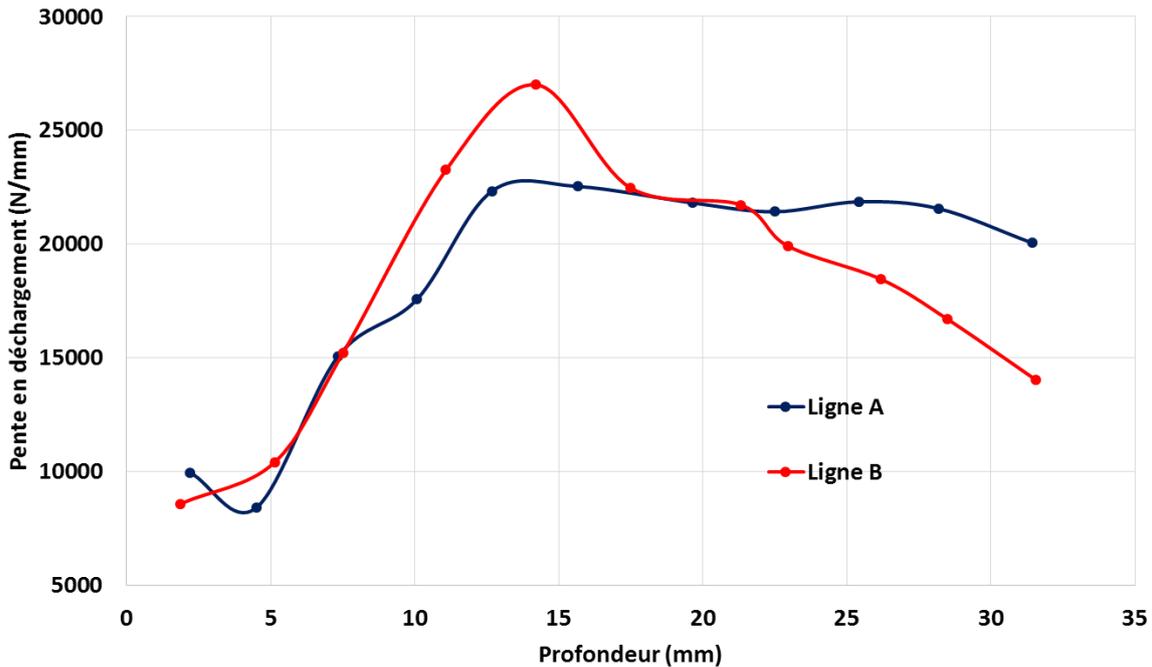


Figure II-21 : Évolution de la pente [Force/déplacement] sur essai de microindentation pour les 2 lignes de points choisis sur la carotte tranchée suivant l'axe, à 28 jours de dégradation chimique

Les résultats de la deuxième série de mesures (l'approche globale présentée au paragraphe II.2.3.3) sont présentés sur la figure II-21. On observe pour chaque ligne de points une augmentation progressive de la pente en déchargement avec la profondeur, puis une stagnation à partir de 12 mm environ. Les 2 lignes de points fournissent des résultats très proches, ce qui atteste de la fiabilité de ces mesures.

Cependant, les valeurs du paramètre mesuré pour la première série de mesures (Fig. II-20) varient entre 14000 N/mm et 34000 N/mm, tandis que pour la seconde série de mesures, elles varient entre 8000 N/mm et 27000 N/mm, alors que pour un même état de dégradation, on s'attendrait à des valeurs identiques ou proches. Cette différence n'est pas expliquée pour le moment.

La technique de microindentation indique donc également que la dégradation chimique n'est pas allée au-delà des 2 premiers centimètres de béton. L'approche globale notamment a permis d'observer qu'au bout de 28 jours d'attaque chimique, le front de lixiviation est allé jusque 12 mm de profondeur environ, ce qui est cohérent avec les observations après application de phénolphtaléine.

II.3.3 Résultats des mesures de perméabilité à l'argon sur tranches issues de carottages

Dans la mesure où la lixiviation du béton augmente sa porosité, la perméabilité d'un échantillon dégradé doit à priori être plus élevée que celle d'un échantillon sain. Les mesures de perméabilité effectuées sur les différentes tranches de carotte, pour chaque étape de dégradation, illustrent cette augmentation de perméabilité. La ligne pointillée sur la figure II-21 indique l'évolution attendue pour la tranche de profondeur 0-2 cm.

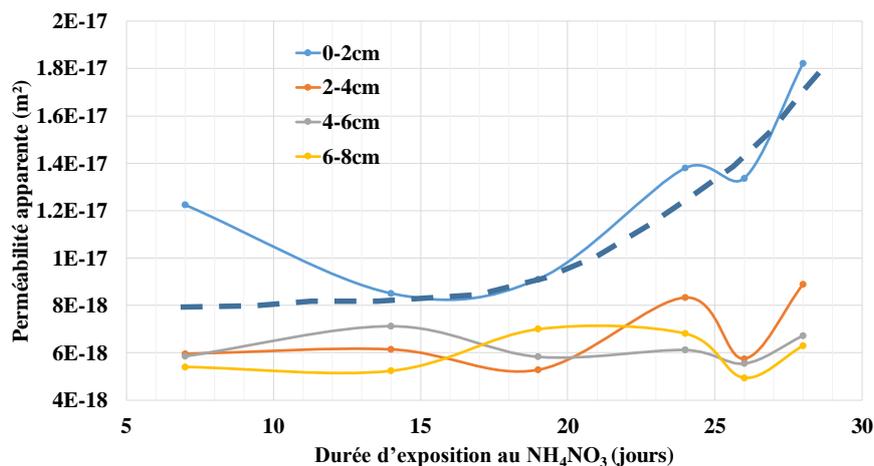


Figure II-22: Évolution de la perméabilité apparente à l'argon en fonction du temps d'exposition à la solution lixiviante, pour chaque tranche issue des carottages, pour une pression de confinement de 50 bars ; la ligne pointillée indique l'évolution attendue

La diminution de perméabilité entre 7 et 14 jours n'est pas expliquée actuellement. On observe en effet sur la figure II-22, à l'instar des mesures de microindentation, que seuls les deux premiers centimètres de chaque carotte ont été affectés significativement par la lixiviation. Il a été démontré à l'aide de la phénolphthaléine qu'à la fin des mesures, seul 1 cm de profondeur de béton a été lixivié. On peut donc considérer que toutes les mesures sur les 2^{èmes}, 3^{èmes} et 4^{èmes} couches des carottes ont été faites sur un matériau sain, et les variations des 3 courbes correspondantes sur la figure II-22 correspondent plutôt à un bruit de mesure de perméabilité sur matériau inhomogène (soit $4,0 \cdot 10^{-18}$ m² d'incertitude environ). On constate alors qu'au bout de 7 jours de dégradation chimique, la perméabilité à l'argon a doublé par rapport à celle du matériau non dégradé. Les mêmes tendances ont été observées lorsque la pression de confinement était de 30 bars et 80 bars. Ces résultats sont présentés en annexe figure A.II.3.3.

On peut donc dire que la dégradation chimique, caractérisée par l'augmentation de la perméabilité, se limite à la couche de surface de profondeur de 2 cm environs. Ce résultat est cohérent avec les résultats de la méthode de microindentation présentés précédemment.

II.3.4 Résultats des mesures acoustiques sur dalles lixiviées

II.3.4.1 Résultats sur les vitesses de phase de l'onde de surface

On souhaite ici observer l'évolution des propriétés élastiques (principalement le module d'Young, lié à la vitesse des ondes). L'objectif est d'analyser la vitesse de propagation des ondes de surface en fonction du temps d'exposition à la solution de nitrate d'ammonium.

Pour comprendre l'interprétation des courbes de dispersion, il faut rappeler que les ondes de surface se propagent dans une couche dont la profondeur est proche de la longueur d'onde (voir paragraphe I.3.2). Comme la longueur d'onde $\lambda(f)$ varie en fréquence (cf. Eq. (I-4)), la pénétration de l'onde dans le matériau varie aussi en fréquence. Ainsi, les résultats observés en fonction de la longueur d'onde peuvent être interprétés comme étant en fonction de la profondeur de la couche auscultée.

Dans ce paragraphe, nous allons donc analyser l'évolution de la vitesse $V_{ph}(f)$ en fonction de la fréquence et de la longueur d'onde, calculée comme :

$$\lambda(f) = \frac{V_{ph}(f)}{f} \quad (\text{II-9})$$

Cela pourra nous donner des informations sur les effets de la lixiviation sur le béton. On rappelle (voir chapitre I.3.2) que dans un milieu homogène, la vitesse de phase de l'onde de surface est constante et égale à la vitesse de groupe. Si la vitesse augmente avec la longueur d'onde (donc avec la pénétration), ceci indique que le module élasticité augmente avec la profondeur (Eqs. (I-12) et (I-14)).

Ces courbes ont été représentées sur la figure II-23 pour chaque étape d'exposition à la solution lixivante.

En premier lieu, on constate qu'à l'état initial, la courbe de vitesse est relativement horizontale. Comme précisé au chapitre I, une courbe de dispersion horizontale pour des ondes de surface illustre le caractère homogène sur la profondeur du matériau ausculté. On constate cependant une faible pente, avec des vitesses légèrement plus faibles en surface qu'en profondeur, avec de plus grandes incertitudes en surface qu'en profondeur. Cela peut s'expliquer par les propriétés différentes de la couche de surface du béton : une plus grande porosité engendre une matière moins condensée et diminue ainsi la vitesse de l'onde en surface. La légère pente de vitesse observée peut être le signe d'un léger gradient de propriétés élastiques du béton sur la profondeur.

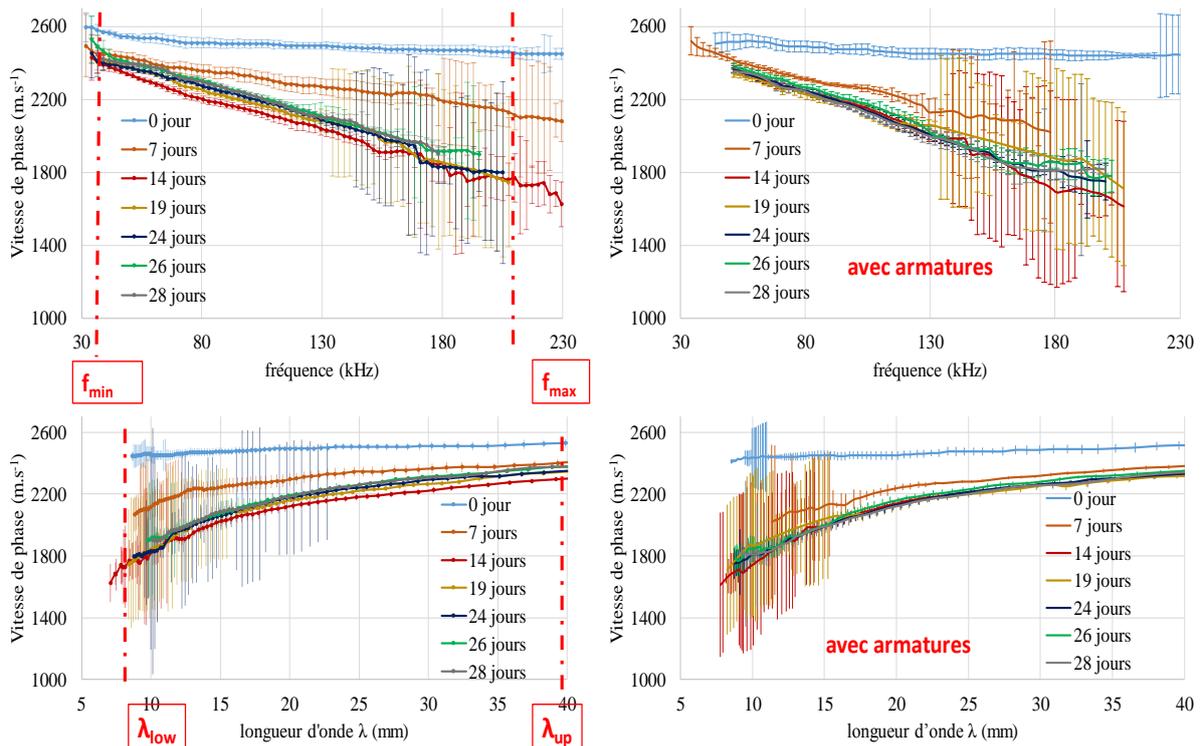


Figure II-23 : Vitesses de phase en fonction de la longueur d'onde et de la fréquence pour les dalles [gauche] sans armatures et [droite] avec armatures

Lorsque l'on se focalise sur l'évolution de cette courbe avec le temps d'exposition au nitrate d'ammonium, on observe une franche diminution de la vitesse pour les longueurs d'onde les plus courtes, et une diminution de moins en moins forte au fur et à mesure que les longueurs d'onde augmentent. Pour les plus faibles valeurs de longueur d'onde (par exemple pour $\lambda = 10$ mm), ce qui correspond à de faibles épaisseurs de couches traversées par les ondes, la vitesse diminue d'environ 350 m/s (soit 14 % de la valeur à l'état initial) au bout de 7 jours d'exposition, et d'environ 650 m/s (soit 27 % de la valeur à l'état initial) au bout de 14 et 19 jours d'exposition. Pour les plus grandes longueurs d'onde (par exemple pour $\lambda = 50$ mm), ce qui correspond à de grandes épaisseurs de couches traversées par les ondes, la vitesse diminue d'environ 105 m/s (soit 4 % de la valeur à l'état initial) au bout de 7 jours d'exposition, et d'environ 165 m/s (soit 6 % de la valeur à l'état initial) au bout de 14 et 19 jours d'exposition.

Pour le béton non dégradé, les écart-types des vitesses (notés σ_v par la suite) obtenus sont très faibles pour les grandes longueurs d'onde (15 m/s donc 0,5 % de la valeur à l'état initial) et augmentent légèrement pour les hautes fréquences lorsque l'on se rapproche des faibles longueurs d'onde (1 % en moyenne). De tels résultats témoignent du fait que l'homogénéité du béton est très bonne et ainsi le signal est de bonne qualité.

Plusieurs phénomènes peuvent expliquer ceci. En premier lieu, plus une longueur d'onde est courte, plus la fréquence de l'onde est grande et plus l'atténuation $\alpha(f)$ augmente (voir Chapitre I.3.1). De plus, lorsqu'une onde rencontre un obstacle, plus la dimension caractéristique de cet obstacle est proche de la longueur d'onde, plus l'onde va se diffracter sur l'objet, et se multi-diffuser dans toutes les directions. Dans le béton examiné, les granulats tels que graviers et gravillons ont des dimensions allant jusque 20 mm environ. Ainsi les ondes dont les longueurs d'onde sont comprises entre 7 mm et 23 mm sont plus diffractées que les autres, ce qui disperse les résultats en vitesse. Les granulats sont « invisibles » acoustiquement pour les ondes de grandes longueurs d'onde. En définitive, ce phénomène provoque une atténuation supplémentaire.

Cependant, c'est la durée de lixiviation qui entraîne l'augmentation la plus importante de l'écart-type. Ceci veut dire que la destruction de la structure du béton par le nitrate d'ammonium a provoqué une considérable augmentation de la non-homogénéité du béton (en augmentant la porosité), ce qui augmente d'autant plus l'atténuation (voir paragraphe suivant). Enfin, le rapport signal-sur-bruit (SNR) diminue et l'écart-type de vitesse mesuré augmente. Ce phénomène est illustré sur la figure II-24 qui montre une augmentation globale de l'étendue des écart-types de vitesse $\sigma_{vmax}-\sigma_{vmin}$ avec le temps d'exposition.

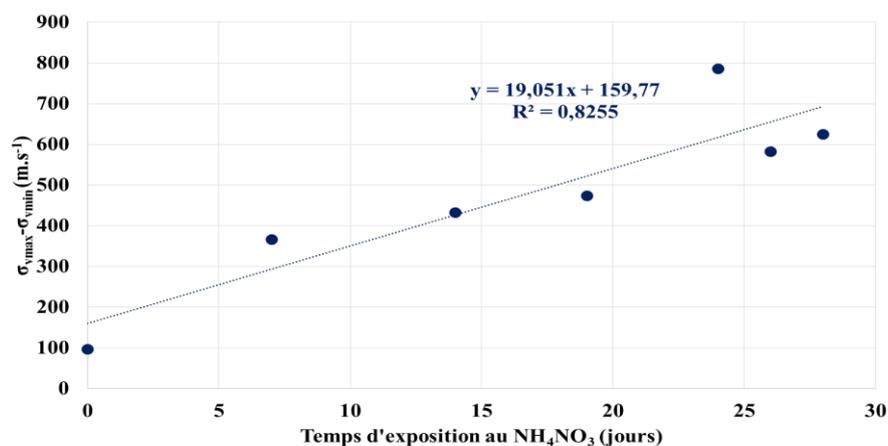


Figure II-24 : Étendue des écart-types de vitesse $\sigma_{vmax}-\sigma_{vmin}$ avec le temps d'exposition

On constate qu'à partir de 14 jours, les courbes de dispersion de vitesse sont très similaires. Cela peut s'expliquer par la cinétique de propagation du front de lixiviation, qui est fonction de la racine carrée du temps d'exposition. Cela peut aussi illustrer le fait que la réaction est quasi terminée sur le matériau en surface, et que le peu de matériau qui réagit encore ne suffit pas à rendre ces modifications visibles au niveau des observables des ondes de surface. Il est également possible que le front de lixiviation ait dépassé la profondeur maximale détectable par les ondes de surface (entre 50 mm et 60 mm), et n'est donc pas « vu » par les ondes de surface, qui ne pénètrent pas suffisamment le béton. Cela rend nécessaire l'utilisation d'une technique

permettant d'envoyer des ondes de fréquences inférieures à 30 kHz, soit des longueurs d'ondes supérieures à 60 mm, donc l'utilisation du scanner bases fréquences présenté dans le chapitre I. Malheureusement ce scanner n'était encore pas disponible au moment de cette étude. Comme la dalle lixiviée est toujours disponible, une mesure complémentaire pourrait être encore réalisée si cette recherche se poursuit.

Il est donc possible de détecter les effets de la lixiviation directement à partir des courbes de dispersion. On constate que la lixiviation provoque une diminution de la vitesse des ondes de surface. Si on observe la vitesse pour une profondeur d'auscultation ou pour une fréquence fixée, la vitesse diminue avec le temps de lixiviation et se stabilise à partir du 14^{ème} jour de dégradation (Fig. II-25b). Notons que cette variation est de l'ordre de 20 %, ce qui donne le même ordre de grandeur que la variation obtenue par Ould Naffa et al [2004] montrée sur la figure II-2.

L'autre facteur bien corrélé avec la lixiviation est la pente de la courbe de dispersion. Un phénomène similaire était déjà observé [Piwakowski et al – 2014], et afin de quantifier la dégradation du béton, des gradients de vitesse GV , définis comme une pente moyenne des courbes de dispersion en longueur d'onde et en fréquence ont été proposés:

$$GV_{\lambda} = \frac{\Delta V}{\Delta \lambda} = \frac{V_d - V_s}{\lambda_d(V_d) - \lambda_s(V_s)} \quad (\text{II-10})$$

$$GV_f = \frac{\Delta V}{\Delta f} = \frac{V(f_{low}) - V(f_{high})}{f_{high} - f_{low}} \quad (\text{II-11})$$

où λ_s et λ_d désignent la longueur d'onde à faible profondeur (*shallow*) et à profondeur correspondant au béton non dégradé (*deep*) respectivement, et où f_{high} et f_{low} désignent une haute fréquence et une basse fréquence choisies respectivement. À titre d'exemple, les gradients GV_{λ} caractérisant un mur jeune (10 ans) et un mur vieux (65 ans) auscultés sur le même site sont montrés sur la figure II-25a: la différence entre les murs y est vue plus clairement. La section c) de cette figure montre les gradients en fonction du temps de lixiviation. Notons qu'en effet l'indicateur GV varie de 500 % en fonction du temps de dégradation ; il est donc est plus sensible que la vitesse (qui varie uniquement de 20 %).

La présence d'armatures d'acier coulées à 3 cm de profondeur par rapport à la surface auscultée par les ondes de surface ne fait apparaître aucun changement significatif sur les courbes de dispersion de vitesses (Fig. II-23). Les écart-types paraissent cependant plus importants pour la dalle avec armatures, ce qui peut venir du fait que les armatures participent à la multidiffusion des ondes envoyées, et dispersent ainsi les mesures de vitesses. Cela témoigne du fait que les ondes sont peu gênées par les armatures et que les conclusions de ce paragraphe sont aussi valables pour le béton armé.

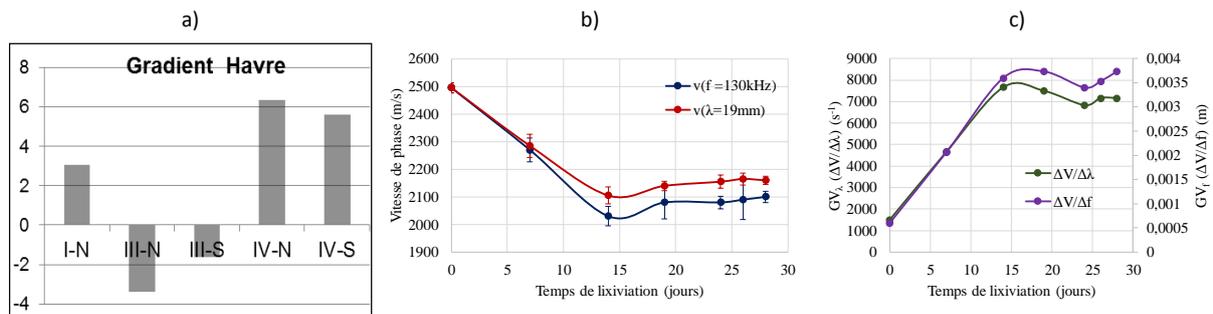


Figure II-25: a) Gradients GV obtenus pour des murs jeunes de 10 ans (III-N et III-S) et des murs vieux de 65 ans (I-N, IV-N et IV-S) [Piwakowski et al – 2014] ; b) évolution de la vitesse de phase dans la dalle lixiviée pour la profondeur 19mm et pour la fréquence 130kHz en fonction du temps de lixiviation ; c) évolution des gradients de vitesse GV pour la dalle lixiviée en fonction du temps de lixiviation

II.3.4.2 Identification de la couche lixiviée par l'inversion de la caractéristique de dispersion

Dans le chapitre I il est expliqué qu'une structure en couches stratifiée correspond à une caractéristique de dispersion $V_{ph}(f)$ donnée. La procédure d'inversion a pour but d'extraire la composition mécanique d'une structure en couches à partir de la caractéristique de dispersion $V_{ph}(f)$ obtenue expérimentalement. Un tel problème n'a pas de solution analytique, ainsi la solution est recherchée par un algorithme qui cherche une structure dont la caractéristique de dispersion $V_{phcalc}(f)$ calculée sera la plus proche que possible de la caractéristique mesurée $V_{phmes}(f)$.

L'algorithme d'inversion consiste à minimiser une fonction objectif (appelée fonction misfit) définie par la norme euclidienne du vecteur des différences entre la caractéristique de dispersion théorique (calculée) $V_{phcalc}(f,P)$ et expérimentale (mesurée) $V_{phmes}(f)$ pour une structure donnée, où P désigne l'ensemble des paramètres du modèle, incluant notamment les vitesses transversales V_s et l'épaisseur de chaque couche, ainsi que la vitesse des ondes longitudinales V_L et la masse volumique ρ pour un modèle stratifié.

Une telle approche est utilisée en géophysique sous le nom de technique MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) [Ryden et al – 2004] et est utilisée pour l'imagerie de structure de couches géologiques à partir d'enregistrements d'ondes de surface. Le logiciel d'inversion nommé « cloud », développé au laboratoire [Safinowski – 2011] ayant pour objectif de réaliser une imagerie de la peau d'un béton est justement fondé sur cette approche. Depuis, le logiciel a été testé et validé, et utilisé au cours de nombreuses études sur le béton [Senso – 2009 ; Piwakowski et al – 2011 ; Drelich et al – 2015 ; Kaczmarek et al – 2015 ; Piwakowski et al – 2014 ; Kaczmarek et al – 2016 ; Drelich et al – 2018]. Le logiciel « cloud » est utilisé dans cette thèse pour l'identification de la structure du béton lixivié.

Puisque les informations fournies par la caractéristique de dispersion mesurée $V_{phmes}(f)$ est limitée et que le modèle de couches de béton superposées est une approximation de la structure réelle, la solution donnée par la procédure d'inversion n'est pas unique. Comme le résultat de la fonction misfit présuppose généralement de nombreux minima, la non-unicité de l'identification du modèle aux résultats expérimentaux peut être limitée en utilisant une méthode d'optimisation hybride [Socco et Boiero – 2008]. Une telle approche a été adoptée pour le logiciel « cloud ». L'inversion est répétée M fois, et à chaque répétition, les paramètres inconnus de départ P sont générés de manière aléatoire. Le modèle Haskell-Thomson est utilisé pour résoudre le problème direct [Haskell – 1953]. Pour le nombre d'itérations M (qui doit être fixé correctement), chaque répétition donne une solution caractérisée par la valeur de l'erreur (ou misfit) C . Les K meilleurs résultats d'inversion sélectionnés (donnant des minima de la fonction d'erreur inférieurs au seuil C_{max} définie par l'utilisateur) sont ensuite moyennés et les valeurs moyennes des paramètres P et leurs écart-types donnent le résultat attendu. La procédure « cloud » a été testée avec succès sur des données synthétiques (venant d'un modèle en utilisant le problème direct) et sur des données expérimentales (venant de tests en laboratoire) [Drelich et al – 2015].

Dans la procédure d'inversion, la structure recherchée (modèle P) est définie comme une séquence de N couches parallèles de profondeurs $d_1, d_2 \dots d_{N-1}$, la dernière couche étant supposée semi-infinie. Chaque couche est caractérisée par sa densité $\rho_1 \dots \rho_N$, sa Vitesse longitudinale $V_{L1} \dots V_{LN}$ et sa Vitesse transversale $V_{S1} \dots V_{SN}$ (figure II-26).

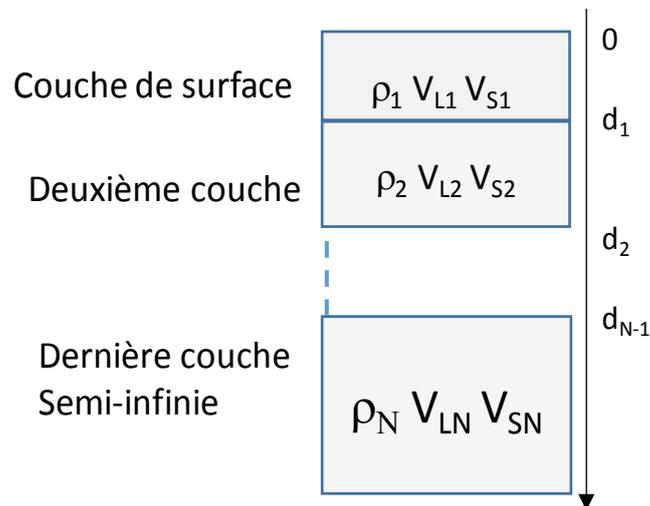


Figure II-26 : Schéma et notations du modèle utilisés pour la procédure d'inversion

Typiquement, $V_{L1 \dots N}$ et $\rho_{1 \dots N}$ sont prédéfinies (considérées comme connues) et le résultat d'inversion consiste à retrouver la séquence de profondeurs d_i et de vitesses transversales correspondantes V_{Si} , c'est-à-dire la relation $V_{Si} = f(d_i)$, $i=1 \dots N$.

La figure II-27 illustre les étapes d'inversion sur un exemple de mesures réalisées dans la cadre du projet SENSO. Le modèle P de la structure recherché était constitué de 2 couches (solution simpliste, la plus rapide). Ainsi, le résultat final (section h de la figure) présente deux valeurs V_{s1} et V_{s2} et une profondeur d_1 de première couche proche de 4 cm.

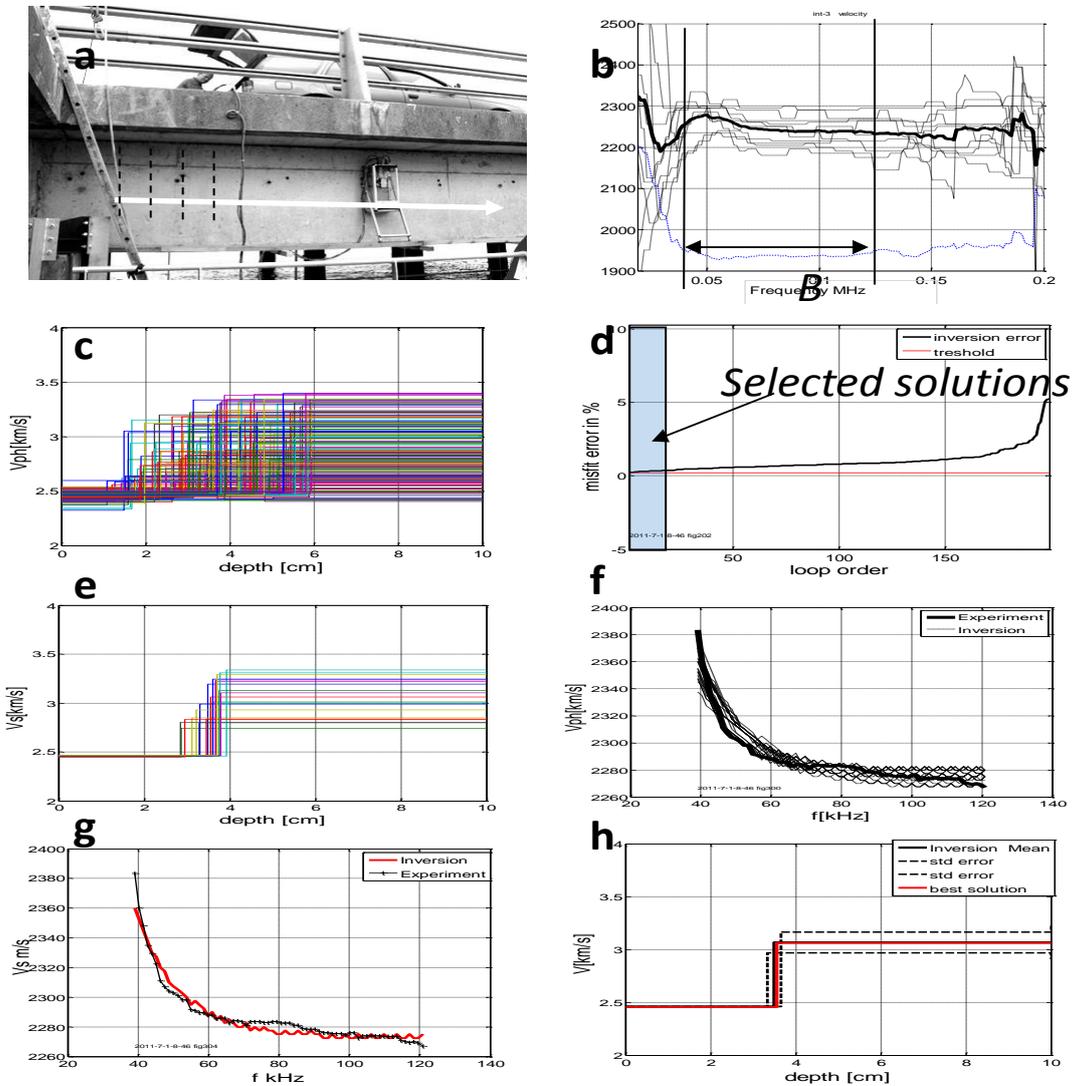


Figure II-27: Mesures effectuées sur une plateforme d'un port maritime et résultats obtenus: **a)** la face externe de la plateforme auscultée avec le dispositif de mesure et la ligne examinée (flèche blanche) – les lignes noires pointillées indiquent les différents profils d'ondes de surface ; **b)** Courbes de dispersion mesurées $V_{ph_mes}(f)$ et leur moyenne (trait épais) – B indique l'intervalle de fréquences considéré pour l'inversion ; **c)** $M = 200$ solutions de l'inversion tracées sous la forme de la vitesse transversale en fonction de la profondeur ; **d)** Valeurs de la fonction misfit des solutions de c) classées par ordre croissant ; **e)** Les $K = 20$ meilleures solutions de c) ayant une valeur de fonction d'erreur inférieure à 0.25% ; **f)** Caractéristiques de dispersion calculées $V_{ph_calc}(f)$, correspondant aux solutions de e) ; **g)** $V_{ph_calc}(f)$ pour la meilleure inversion (misfit 0.22%) comparée à la caractéristique de dispersion expérimentale d'entrée $V_{ph_mes}(f)$; **h)** Résultat final : Vitesse transversale moyenne et son écart-type en fonction de la profondeur [Piwakowski et al – 2011]

L'inversion des courbes de dispersion résultant des étapes consécutives de lixiviation a été effectuée en utilisant les paramètres donnés dans le tableau II-3. La vitesse longitudinale V_L et la densité ρ de chaque couche sont considérées fixes car cet algorithme est moins sensible à leurs variations, relativement aux variations de V_s et d . Leurs valeurs ont été mesurées sur les carottes, par mesure acoustique en contact pour V_L et par pesée pour ρ .

Tableau II-3 : Paramètres du programme Cloud utilisés pour l'inversion

Nombre de couches N	Nombre d'itérations M	Nombre de solutions retenues K	$V_{L1...LN}$ m/s	$\rho_{1...N}$ kg.m ⁻³	Seuil d'erreur %
7	100	15-60	4200	2375	0,25

A titre exemple, la figure II-28a montre les valeurs de la fonction erreur « misfit » en ordre croissant pour l'ensemble des 100 itérations obtenus pendant l'inversion du cas « 7j » de lixiviation. La ligne rouge représente le seuil 0,25 % des solutions retenues. La section b) compare la dispersion calculée V_{phcalc} avec la dispersion mesurée V_{phmes} pour les cas sélectionnés où l'erreur était la plus faible. Il est clairement visible que les deux courbes s'accordent bien.

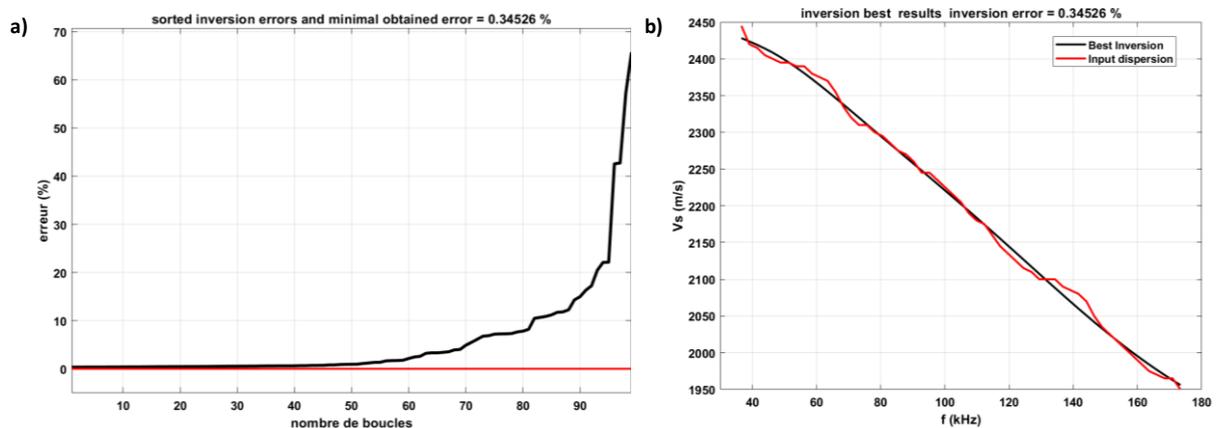


Figure II-28 : a) Valeurs de la fonction « misfit » pour 100 itérations du programme d'inversion appliqué à la dispersion correspondant à 28 jours de dégradation ; b) Comparaison entre la courbe expérimentale mesurée et la courbe du meilleur modèle calculé

La figure II-29 montre les résultats du processus d'inversion sur les courbes de dispersion de vitesses pour un béton non dégradé (0 jours) et très dégradé (28 jours) , à titre d'exemple. Le résultat $V_{s_i} = f(d_i)$ apparaît sur les courbes brisées pleines et on y retrouve $N = 7$ couches distinctes. Bien entendu, le modèle composé de couches discrètes est une approximation, car dans le béton la variation des propriétés doit être continue. Afin de rendre les résultats plus proches de la solution physique, les courbes brisées $V_s(d)$ sont lissées.

Notons aussi que l'écart type de la solution augmente avec la profondeur. Il est aussi visible que même le béton non dégradé n'est pas homogène en profondeur, la vitesse de la couche de surface étant légèrement plus faible que la vitesse du béton pour les profondeurs $d > 0,5$ cm (ce qu'on pourrait déduire à partir la dispersion $V_{ph}(f)$: courbe décroissante avec la fréquence, cf. Fig. II-23).

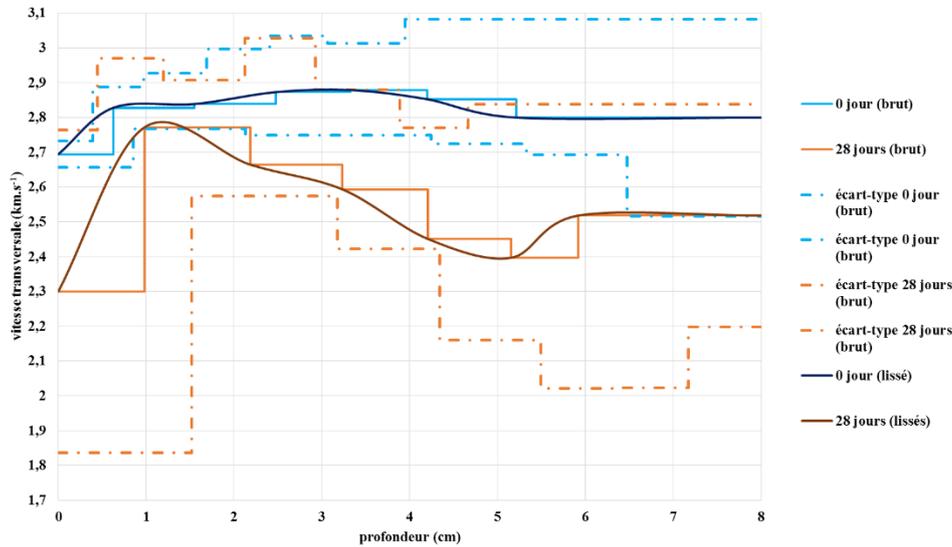


Figure II-29 : Résultats de l'inversion des courbes de dispersion pour un béton non dégradé (0 jour) et un béton très dégradé (28 jours) ; les lignes brisées indiquent les résultats bruts, les lignes pointillées indiquent les écart-types

Afin d'interpréter les résultats d'inversion, nous nous limitons à la présentation des résultats incluant les trois cas distincts : dégradation à 0, 7 et 24 jours. Les résultats sont présentés sur la figure II-30. Les résultats complets présentant la vitesse brute, les écart-types ainsi que les vitesses lissées sont présentés dans l'Annexe Chapitre II sur la Figure A.II.3.4.

D'après Drelich et al [2018], les bornes λ_{low} et λ_{up} affichées sur la figure II-23, correspondant aux limites de validité des courbes de dispersion, et sont reliées à la fiabilité de l'inversion. Pour obtenir des résultats fiables, la profondeur de couche d obtenue grâce à l'algorithme d'inversion doit respecter les relations :

$$\frac{\lambda_{low}}{d} \leq 1 \quad (II-12)$$

$$\frac{\lambda_{up}}{d} \geq 3 \quad (II-13)$$

On peut donc noter que dans cette étude (voir figure II-23), dans l'intervalle de fréquences $[f_{min} - f_{max}]$ où les résultats sont exploitables, nous avons $\lambda_{low} = 7mm$ et $\lambda_{up} = 60mm$. Cela donne l'encadrement (approximatif) suivant : $7mm \leq d \leq 20mm$. Cela signifie que l'inversion de la courbe de dispersion pourra donner des résultats fiables pour les profondeurs : $7mm \leq d \leq 20mm$. Ainsi, les courbes sur la figure II-29 sont présentées uniquement pour $d \leq 2,5$ cm.

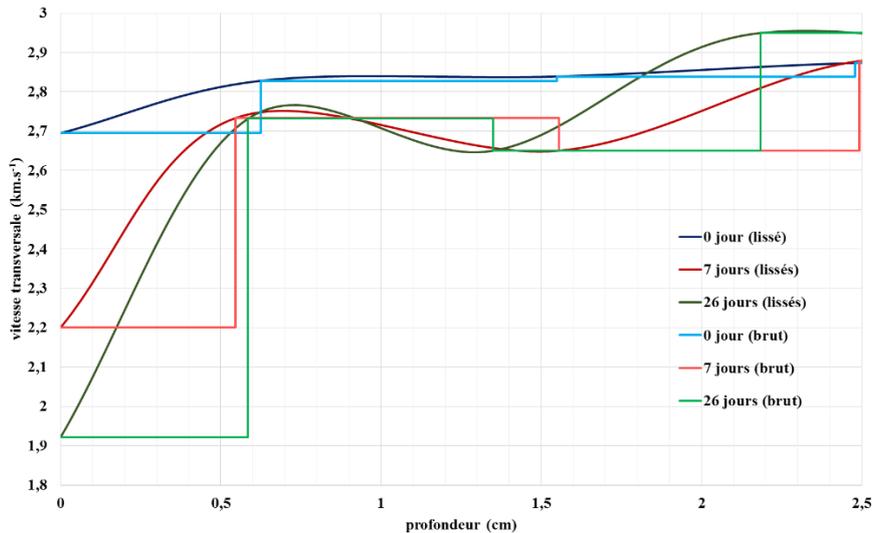


Figure II-30 : Résultats de l'inversion des courbes de dispersion de vitesse pour une dégradation durant 0, 7 et 24 jours

Ainsi, en suivant l'évolution de la vitesse transversale en fonction de la profondeur, on constate l'apparition d'un fort gradient de dégradation dans les 6 premiers millimètres environs (ce que nous identifions comme étant le front de lixiviation). Ensuite, dans l'intervalle 5 – 20 mm, la dégradation affiche un gradient plus faible, et se stabilise à partir de la profondeur de 13 mm (là où les courbes brutes atteignent en majorité un plateau). Au-delà de 7 jours d'exposition, ce front ne semble pas progresser davantage. En revanche la couche déjà attaquée continue de se dégrader.

L'analyse des toutes les courbes obtenues (voir Annexe figure A.II.3.4) confirme que l'inversion des vitesses montre peu de variations sur les derniers temps d'exposition, ce qui correspondra à une superposition des courbes de dispersion sur les résultats présentés en annexe.

Lorsque l'on observe (Annexe figure A.II.3.4) l'évolution de la vitesse transversale de la première couche identifiée, en excluant les courbes dont les écart-types sont trop importants (pour 24 et 26 jours), on constate une diminution progressive de la vitesse transversale, de 2700 m/s pour l'état initial à 1800 m/s environ pour l'état final. Cela correspond à une différence de 900 m/s (soit 30 % de l'état initial), ce qui est considérable. Cette variation de vitesse transversale démontre la variation de propriétés mécaniques due à la lixiviation, plus particulièrement la variation du module de Young. En effet, compte tenu de la faible influence du coefficient de Poisson sur la vitesse transversale (voir l'équation (I-10) du chapitre I), seul le rapport $\sqrt{E/\rho}$ peut avoir un impact significatif. En prenant en compte les valeurs de masses volumiques connues par mesures de masses et de volumes sur les tranches, on obtient un module de Young variant de 20 GPa pour l'état initial à 8,6 GPa pour l'état final, soit 57 % de variation environ.

II.3.4.3 Résultats sur l'atténuation de l'onde de surface

Dans ce paragraphe nous allons analyser la façon dont la lixiviation affecte l'atténuation des ondes de surface. Etant donné que la lixiviation détruit la structure du béton et augmente sa porosité, on peut supposer que l'atténuation d'onde, exprimée par le coefficient $\alpha(f)$, devrait augmenter avec le temps de traitement au nitrate d'ammonium. La figure II-31 montre que $\alpha(f)$ augmente effectivement avec le temps de dégradation.

Comme dans le cas de la vitesse, on observe que des dalles avec des armatures donnent des résultats très similaires. Cela témoigne du fait que les ondes sont peu gênées par les armatures et que les conclusions de ce paragraphe sont également valides pour le béton armé.

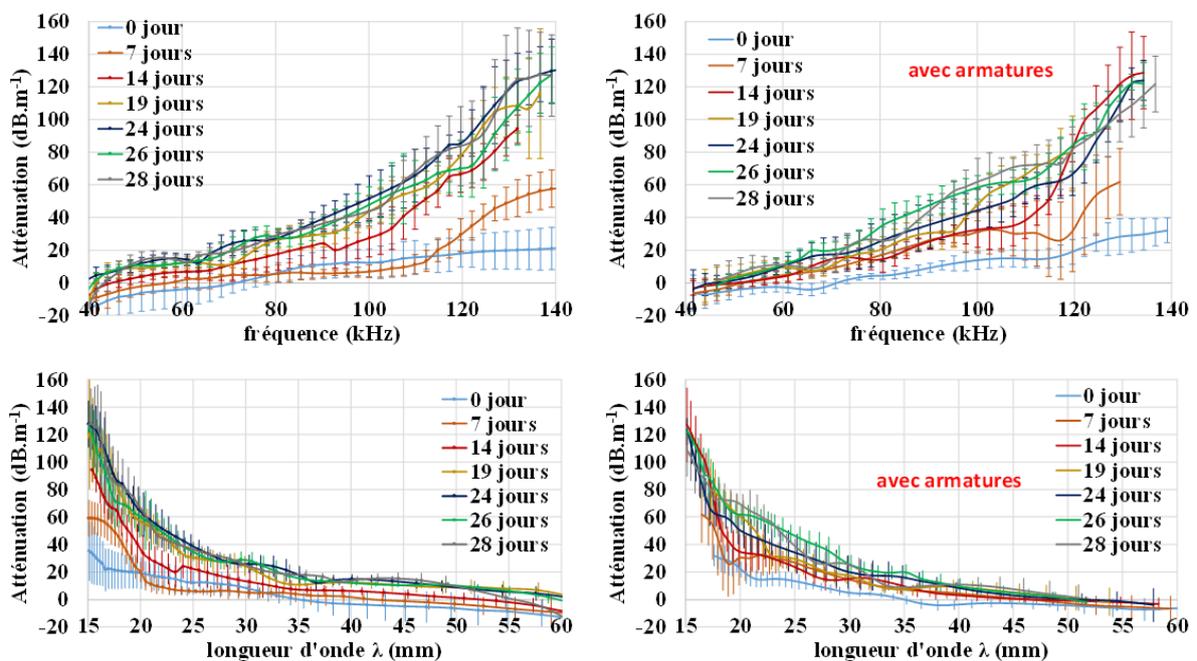


Figure II-31 : Atténuation $\alpha(f)$ en fonction de la longueur d'onde et de la fréquence pour une dalle sans armatures [gauche] et avec armatures [droite]

La dégradation chimique entraîne une augmentation progressive de l'atténuation, surtout au niveau des hautes fréquences/basses longueurs d'onde. À partir de la figure II-33a, qui montre l'évolution de l'atténuation pour $f = 130$ kHz, on peut conclure que la variation de l'atténuation est de l'ordre 600 %, ce qui indique que l'atténuation est très sensible à la lixiviation. Cette observation confirme aussi certains résultats de la recherche antérieure (figure II-2, [Ould Naffa – 2004], et [Goueygou et al – 2001]). Le matériau lixivié atténue davantage les ondes de surface que le matériau sain, ce qui peut s'expliquer par la multiplication des hétérogénéités du matériau dégradé et l'augmentation de la porosité, accentuant le phénomène de multidiffusion des ondes acoustiques. La conclusion est la même que pour l'observable de vitesse.

Concernant le coefficient d'atténuation, on constate à partir de la figure II-32, que sa variation en fonction de la fréquence correspond à l'évolution attendue (Eq. (I-21)), à savoir $\alpha = a_1 \cdot f + a_2 \cdot f^2$. Effectivement, comme le montre la figure II-32, avec le temps de dégradation de béton, le facteur linéaire a_1 diminue globalement mais le facteur parabolique a_2 augmente de manière considérable (environ 600% entre le 5^{ème} et le 15^{ème} jour). Le facteur a_2 pourrait ainsi servir comme indice de la dégradation chimique.

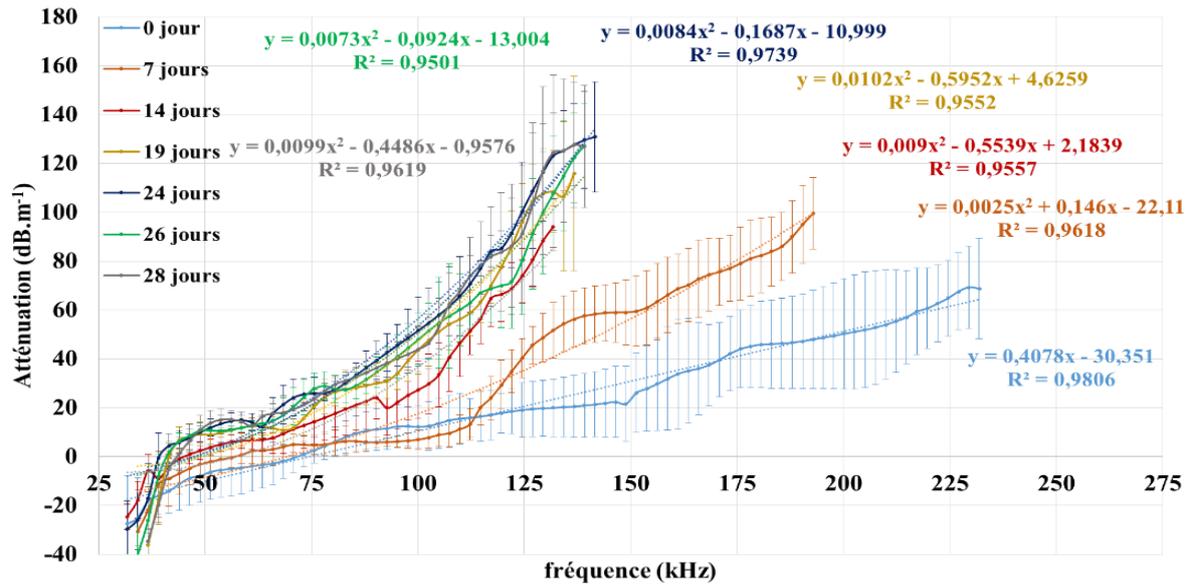


Figure II-32 : Courbes d'atténuation en fonction de la fréquence, avec régressions paraboliques associées

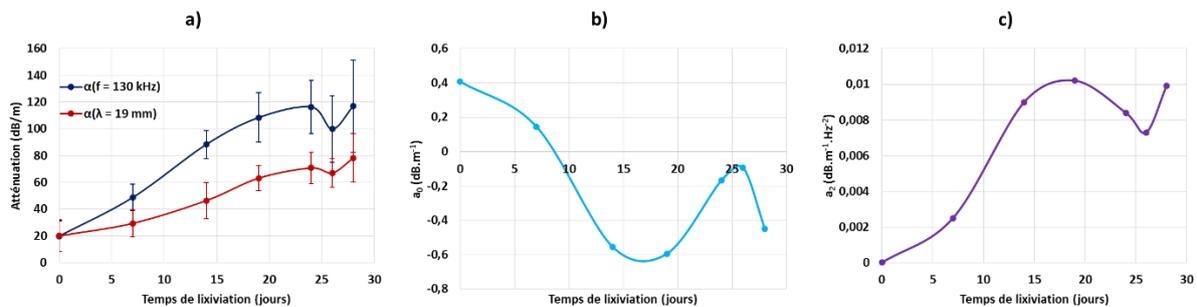


Figure II-33 : a) Coefficient d'atténuation pour une fréquence ($f = 130$ kHz) et une longueur d'onde ($\lambda = 19$ mm) fixées en fonction de temps de dégradation b) Coefficients d'interpolation parabolique a_1 en fonction du temps de dégradation ; c) Coefficient d'interpolation parabolique a_2 en fonction du temps de dégradation

II.4 Conclusion

Toutes les méthodes utilisées, destructives et CND, donnent des résultats très proches : la couche est dégradée à une profondeur proche de 1 cm et la propagation de la dégradation ralentit à partir de cette profondeur. Le tableau II-4 résume les résultats obtenus dans ce chapitre.

Tableau II-4 : Résultats sur la profondeur de béton dégradé pour l'ensemble des méthodes utilisées

Méthode		Profondeur de dégradation cm	Commentaire
Indicateur coloré		0,9	Résultat le plus fiable
Microindentation	Cylindres	2	
	Approche continue	1,3	
Perméabilité au gaz		2	
Inversion de la courbe de dispersion		0,6	Dégradation forte
		1,3	Fin de dégradation

Il est également confirmé qu'à partir de 14 jours d'exposition au nitrate d'ammonium, la dégradation ne progresse plus, ou de façon trop lente – ce qui s'explique par le fait que la progression de la lixiviation suit une cinétique de diffusion.

En ce qui concerne le résultat obtenu à l'aide du scanner HF, la détection et la quantification de la dégradation du béton paraît être très bonne. L'atténuation d'onde (en plus du coefficient a_2) et les gradients de vitesse GV apparaissent ici comme des observables très sensibles à la lixiviation (augmentation respectivement de 600 % et 500 % pendant les tests effectués), alors que la vitesse varie seulement de 20 %.

De plus la méthode d'inversion qui la succède permet de déterminer la profondeur du front de lixiviation : les valeurs de profondeur de ce front (13 mm) correspondent à celles obtenues par d'autres méthodes destructives: l'apparition d'une couche dégradée de profondeur légèrement supérieure à 6 mm. On observe que le front de dégradation continue légèrement jusqu'à 13 mm. L'information sur la vitesse nous permet de remonter au module d'élasticité (équation (I-14)).

Finalement la méthode par ondes de surface, la seule méthode non destructive présentée dans cette étude, a montré sa pertinence dans l'étude de la lixiviation des surfaces de béton, et des matériaux du génie civil à priori. Sa capacité à détecter un front de lixiviation rend compte de son intérêt pour évaluer la durée de vie des structures affectées par la lixiviation. Dans la suite de cette recherche il pourrait être intéressant d'examiner la dalle lixiviée à l'aide du scanner BF - ce qui pourrait affiner les résultats d'inversion (grâce à l'augmentation de pénétration de l'onde dans la dalle).

Annexes Chapitre II

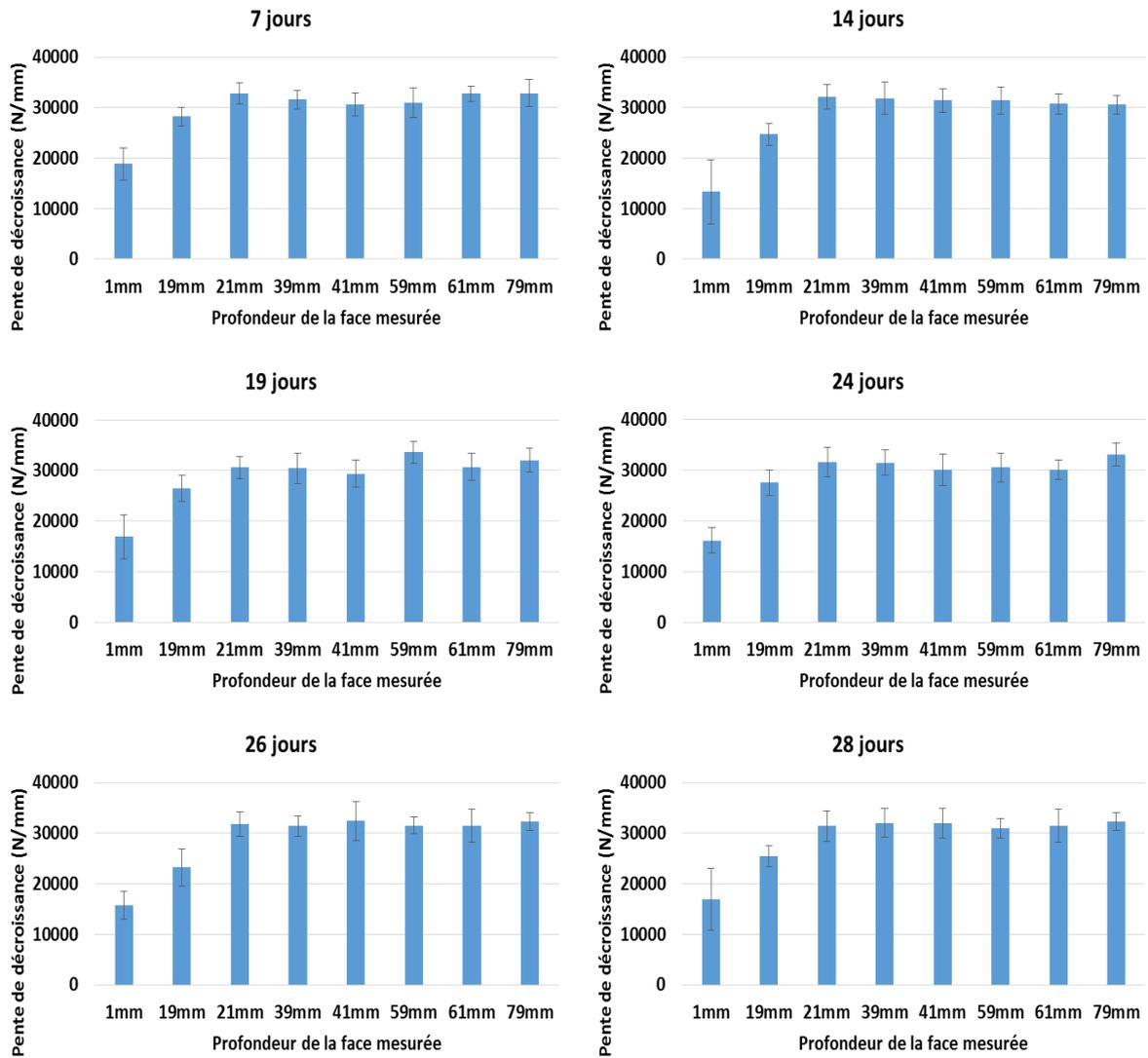


Figure A.II.3.2 : Évolution de la pente [Force/déplacement] sur essai de microindentation en fonction de la profondeur par rapport à la surface exposée à la solution lixiviante en fonction du temps d'exposition au nitrate d'ammonium pour chaque tranche issue des carottages

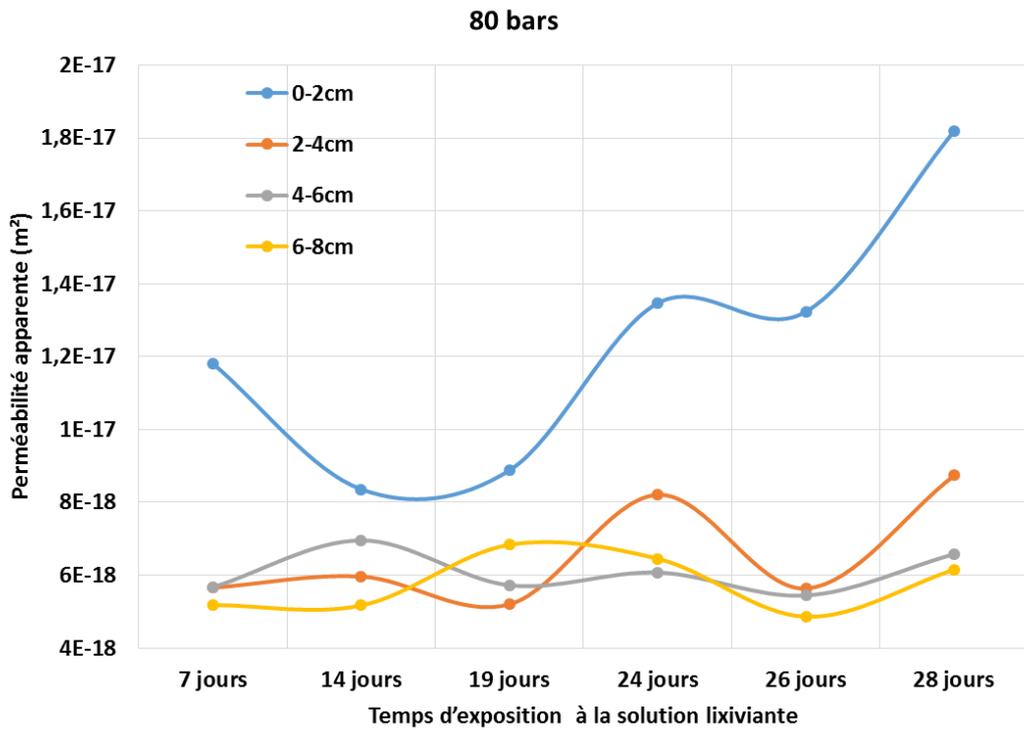
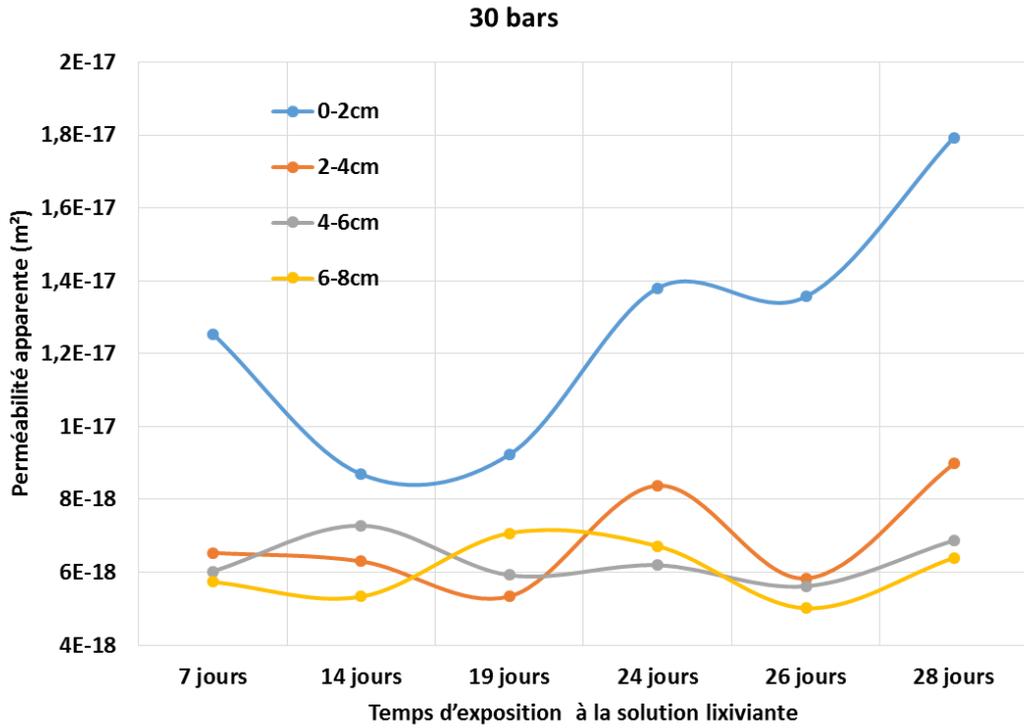


Figure A.II.3.3 : Évolution de la perméabilité apparente à l'argon en fonction du temps d'exposition à la solution lixivante, pour chaque tranche issue des carottages, pour une pression de confinement de 30 et 80 bars

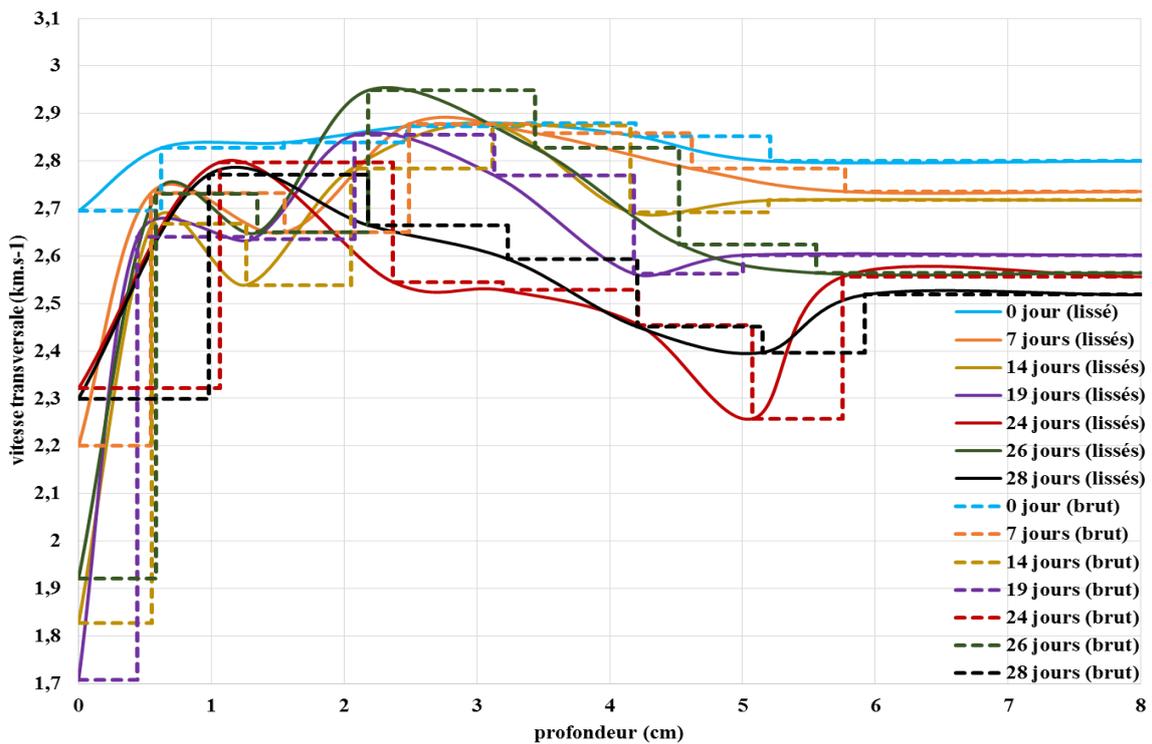
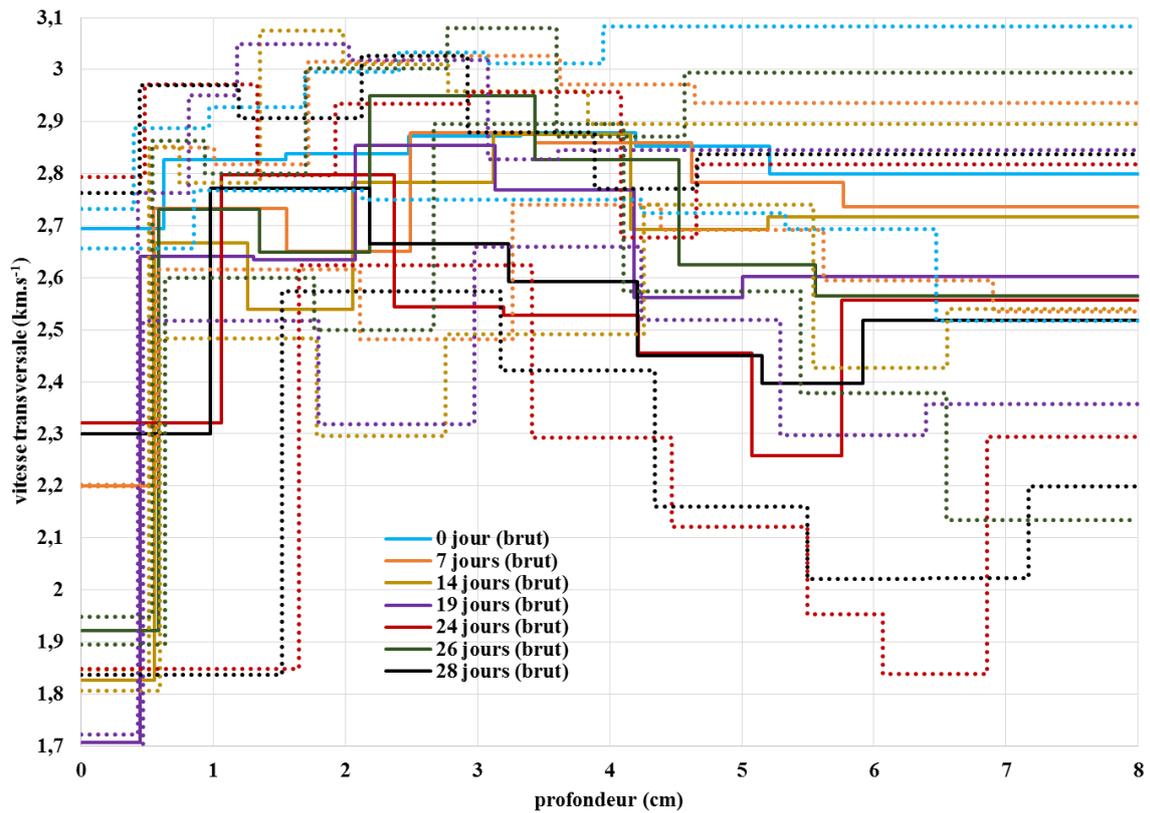


Figure A.II.3.4 : Résultats de l'inversion des courbes de dispersion de vitesse pour une dégradation pour chaque étape de dégradation : [haut] chaque courbe brute avec ses écart-types ; [bas] chaque courbe brute avec la courbe lissée associée

Références bibliographiques Chapitre II

[Agostini et al – 2007] F. AGOSTINI, Z. LAFHAJ, F. SKOCZYLAS, H. LOODSVELDT, Experimental study of accelerated leaching on hollow cylinders of mortar, *Cement and Concrete Research* (2007), Volume 37, Issue 1, Pages 71-78, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.018>.

[Boussinesq – 1885] J. BOUSSINESQ, Applications des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, Gauthier-Villars, Paris 1885.

[Carde et François – 1997] C. CARDE et R. FRANCOIS, Effect of the leaching of calcium hydroxide from cement paste on mechanical and physical properties, *Cement and Concrete Research*, Volume 27, Issue 4, April 1997, Pages 539-550.

[Drelich et al – 2015] R. DRELICH, M. KACZMAREK, B. PIWAKOWSKI, « Estimation of Parameters of Heterogeneous Materials by Non-Contact, Method of Surface Waves: Study of the Role of Frequency Range » 9th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering, NDTCE15, September 15-17 2015 Berlin 2015.

[Drelich et al – 2018] R. DRELICH, M. KACZMAREK et B. PIWAKOWSKI, Accuracy of parameter identification using the dispersion of surface waves and the role of data quality for inhomogeneous concrete, *NDT and E International* (2018), doi:10.1016/j.ndteint.2018.05.002.

[Goueygou et al – 2001] M. GOUEYGOU, S. OULD NAFFA, B. PIWAKOWSKI et F. BUYLE-BODIN, Non Destructive Evaluation Of Degraded Concrete Cover Using High-Frequency Ultrasound, IEEE UFFC Symposium, Atlanta, USA, October 2001.

[Haskell – 1953] N. A. HASKELL, The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 43, Pages 17–34.

[Ibrahim – 2008] N. IBRAHIM, Caractérisation des propriétés mécaniques des géomatériaux par technique de micro indentation, octobre 2008, Université des sciences et technologies de Lille.

[Jebli et al – 2015] M. JEBLI, B. MIELNICZUK, J. JAMIN, C. PELISSOU et M.S. EL YOUSOUFI, Etude expérimentale de la lixiviation du béton à l'échelle de l'interface pâte de ciment-granulats, 33^{èmes} Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA (2015).

[Kaczmarek et al – 2015] M. KACZMAREK, B. PIWAKOWSKI, R. DRELICH, « Non-Contact Ultrasonic Non-Destructive Techniques: State of the Art and Their Use in Civil Engineering » 9th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering, NDTCE15, September 15-17, 2015 Berlin 2015.

[Kaczmarek et al – 2016] M. KACZMAREK, B. PIWAKOWSKI, R. DRELICH, Noncontact Ultrasonic Nondestructive Techniques: State of the Art and Their Use in Civil Engineering. *J. Infrastruct. Syst.* 2016; 23:B4016003. doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000312.

[Loosveldt-Claudot et al – 2002] H. LOOSVELDT-CLAUDOT, Z. LAFHAJ et F. SKOCZYLAS, Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar, *Cement and Concrete Research*, Volume 32, Issue 9, September 2002, Pages 1357-1363, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00793-7.

[Ould Nafa – 2004] S. OULD NAFA, Evaluation de la dégradation du béton par ondes ultrasonores, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambresis, mai 2004.

[Ould Nafa et al – 2002] S.OULD NAFFA, M.GOUEYGOU, B. PIWAKOWSKI et F. BUYLE-BODIN. Detection of Chemical Damage in Concrete using Ultrasound, *Ultrasonics*, 2002, pp 247-251.

[Piwakowski et al – 2008] B. PIWAKOWSKI, P. SAFINOWSKI et A. KOSECKI, Contrôle Non Destructif du béton par ultrasons à l'aide d'un dispositif automatisé, Journées COFREND Toulouse 2008.

[Piwakowski et al – 2011] B. PIWAKOWSKI, P. SAFINOWSKI et M. KACZMAREK, « Surface Wave Technique In Evaluation Of Concrete Cover: Data Processing And Identification Method » International Congress on Ultrasonics > ICU 2011, Gdansk, Poland, September 2011, published by AIP.

[Piwakowski et al – 2014] B. PIWAKOWSKI, Q. LIU, J.-P. BALAYSSAC, G. VILLAIN, V. GARNIER, M. KACZMAREK, R. DRELICH, « Identification of inhomogeneous concrete cover by non-contact ultrasonic method », 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM) and Second European Conference of The Prognostics and Health Management Society ; Nantes France July 8-10 2014.

[Phung et al – 2016] Q.T. PHUNG, N. MAES, D. JACQUES, J. PERKO, G. DE SHUTTER, G. YE, Modelling the evolution of microstructure and transport properties of cement pastes under conditions of accelerated leaching, *Construction and building materials*, Volume 115, 15 July 2016, Pages 179-192, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.049.

[Ryden et al – 2004] N. RYDEN, C. PARK, P. ULRIKSEN et R.D. MILLER, Multimodal Approach to Seismic Pavement Testing, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 130, Issue 6, June 2004, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:6(636).

[Safinowski – 2011] P. SAFINOWSKI, Diagnostic ultrasonore de la dégradation mécanique et structurale du béton, Ecole Centrale de Lille, Kazimierz Wielki University, Institute of Mechanics and Applied Computer Science, Bydgoszcz (Pologne), 2011.

[Saito et Deguchi – 2000] H. SAITO et A. DEGUCHI, Leaching tests on different mortars using accelerated electrochemical method, *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Issue 11, Novembre 2000, Pages 1815-1825.

[SENSO – 2009] Projet ANR : « Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton » Partenaires scientifiques LMDC – Université de Toulouse, GHYMAC – Université de Bordeaux IEMN – Ecole Centrale de Lille, LCPC – Nantes, LCND – Université de la Méditerranée, ONERA – Toulouse, LEAT – UMR 6071 – Université Sophia Antipolis.

[Socco et Boiero – 2008] L. V. SOCCO et D. BOIERO, Improved Monte Carlo inversion of surface wave data, *Geophysical Prospecting*, Volume 56, Issue 3, Pages 357-371, April 2008.

Chapitre III

Identification d'une zone délaminée dans un béton

III.1 Introduction

La délamination est un phénomène observé à de très nombreuses reprises dans les structures en béton armé du génie civil. Elle peut être initiée lors de la phase de ressuage qui suit le coulage du béton, lorsque les granulats, l'eau de gâchage et l'air entraîné se déplacent encore. Si ces derniers constituants n'ont pas atteint une surface libre, ils se retrouvent concentrés à un certain niveau, ce qui favorise la création de vide. Ces zones de vide localisé sont particulièrement fragiles et peuvent entraîner une rupture mécanique sur de plus ou moins grandes surfaces au sein d'une dalle de béton. La figure III-1 illustre ce phénomène sur une petite surface.

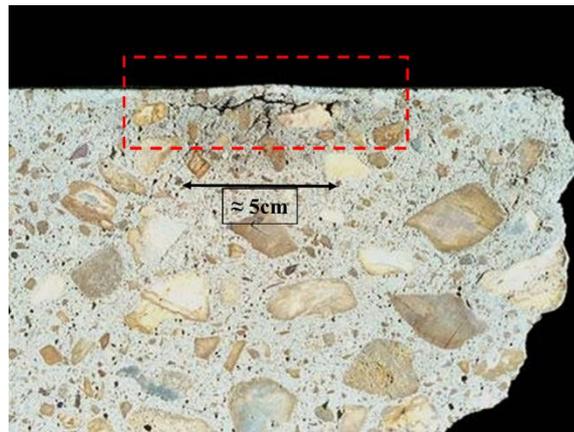


Figure III-1 : Vue en coupe d'une dalle délamérée en surface

La délamination peut également se produire lors de la pose d'un revêtement en béton. Au moment du coulage du béton, l'air entraîné a pu rester au niveau de la surface revêtue, créant ainsi des zones délaminées.

Enfin l'état de contraintes d'une structure peut produire des zones délaminées au sein de celle-ci. Certains défauts dans la mise en place de la précontrainte d'une structure incurvée peuvent induire des concentrations de contraintes radiales, favorisant ainsi la délamination [Stalnaker et Fugler – 1992]. Les charges appliquées à la structure, ponctuellement ou de manière cyclique, peuvent aussi engendrer de la délamination au niveau de zones plus fragiles.

Les méthodes actuelles de détection de zones délaminées sont surtout des méthodes acoustiques, telles que la méthode d'impact-écho [Sansalone et Streett – 1997 ; Balayssac et Garnier – 2018 ; Garnier et al – 2013 ; Abraham et al – 2000]. Cette technique est également employée en utilisant des ondes de surface dans une configuration semi-contacte (cf. Fig. I-11) avec un choc mécanique comme source et un microphone comme récepteur [Sun et al – 2018 ; Sun et al – 2017 ; Zhang et al – 2012 ; Zhu et Popovics – 2007].

Il est possible de détecter la délamination par des méthodes de transmission (des ondes L ou S) mais cela nécessite un accès aux 2 faces de la structure que l'on souhaite diagnostiquer. L'approche pulse-écho est peu efficace, car pour obtenir une résolution acceptable, l'émission de grandes fréquences sont nécessaires (500 kHz ou plus), en fonction de la profondeur de délamination cherchée.

L'objectif de ce chapitre est de tester les capacités du scanner acoustique hautes fréquences (présenté dans Chapitre I et déjà utilisé dans Chapitre II) à détecter une zone désaminée horizontale (parallèle à la surface de béton auscultée). Le paragraphe III.2 présentera les protocoles simulant la délamination qui auront été mis en place, et le paragraphe III.3 présentera les résultats obtenus.

III.2 Démarche expérimentale

III.2.1 Préparation des échantillons avec la délamination artificielle

L'objectif étant d'évaluer la capacité du scanner ultrasonore sans contact à détecter des zones délaminées dans des structures. Plusieurs cas simulant une délamination ont été testés.

Pour ce faire, 3 séries d'éprouvettes ont été fabriquées en laboratoire :

Première série de dalles

Pour la première série d'éprouvettes, le mortier a été choisi comme matériau afin, en premier lieu, d'observer le comportement des ondes acoustiques de surface sur un matériau proche du béton, mais plus homogène. Cela aura permis de limiter les phénomènes de diffusion et diffraction de l'énergie de l'onde lorsqu'elle entre en contact avec les gros granulats. Cinq dalles de mortier ont ainsi été fabriquées. Leurs dimensions sont de 12 x 25 x 50 cm³. La composition du mortier est donnée dans le tableau III-1.

Table III-1 : Formulation du mortier utilisé pour l'étude sur la délamination

Composants	Eau	Ciment	Sables (0-4 mm)	Plastifiant (Sikaplast)
Quantité massique (kg/m ³ de béton)	251	481	1243	2,6

Afin de simuler une zone délaminée (horizontale), une ou plusieurs feuilles de polyane d'épaisseur $40\ \mu\text{m}$, ont été placées à la profondeur de 3 cm parallèlement à l'une des 2 surfaces de $25 \times 50\ \text{cm}^2$, et ensuite la deuxième couche de béton a été coulée. Le schéma de la figure III-2 décrit plus spécifiquement la constitution des 5 dalles de mortier fabriquées ainsi.

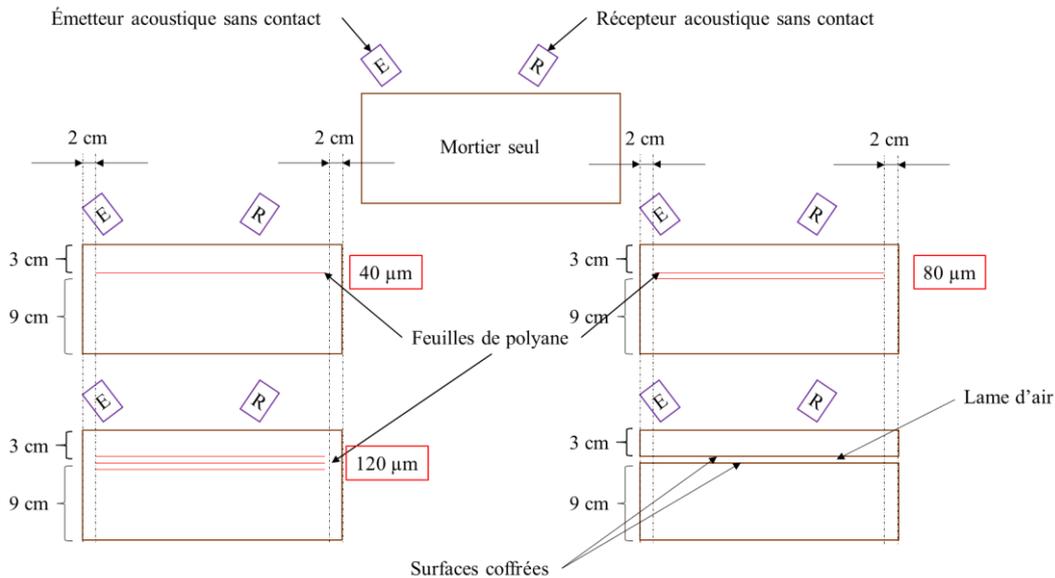


Figure III-2 : Description schématique des profils des dalles de mortier (série 1)

Les feuilles de polyane ont toutes été immergées à $d = 3\ \text{cm}$ par rapport à la surface libre du coffrage.

La surface des feuilles de polyane immergées est de $21 \times 46\ \text{cm}^2$, centrée sur la grande surface, de sorte qu'il n'y avait aucune rupture mécanique sur tout le pourtour des dalles (sauf la cinquième, de fait).

La cinquième dalle permet de simuler une rupture mécanique complète entre 2 parties de béton. Les 2 surfaces mises en contact correspondent à 2 surfaces coffrées, coulées séparément, séchées et ensuite superposées. Elle constitue la simulation la plus grossière d'une zone délaminée : la rupture mécanique est réelle, même si ce faciès de rupture est peu probable (la rupture est ici presque parfaitement parallèle à la surface sur laquelle le système de mesure sera posé). La figure III-3[gauche] illustre cette cinquième dalle.

Le fait d'avoir immergé plusieurs épaisseurs de polyane dans les dalles permet d'évaluer la sensibilité du système de mesure à l'épaisseur de la délamination et d'évaluer la pertinence des feuilles de polyane comme modèle de délamination.

Le choix de la surface non coffrée comme surface auscultée s'est révélé être un désavantage, car les irrégularités à la surface ont perturbé les mesures acoustiques sans contact.



Figure III-3 : [gauche] Cinquième dalle de la série 1, composée d'une dalle de 3 cm d'épaisseur et une dalle de 9cm d'épaisseur, superposée ; [Droite] dalle de la série 2 : mise en place de l'interface huilée

Deuxième série de dalles

Une deuxième série de 3 dalles a ensuite été fabriquée en laboratoire. Il a été décidé d'utiliser du béton pour cette série, une fois que les effets de délamination ont été étudiés pour la série 1. Le tableau III-2 donne la formulation du béton utilisé par la suite. Afin de faciliter la mesure avec le scanner à hautes fréquences, la longueur des dalles a été augmentée. Leurs dimensions sont de 8 x 25 x 80 cm³. La surface auscultée était cette fois-ci la surface coffrée, pour éviter les anomalies observées sur la série 1.

Tableau III-2 : Formulation du béton utilisé pour l'étude sur la délamination

Composants	Eau	Ciment	Sables (0 -4 mm)	Graviers (4 – 11 mm)	Graviers (8 - 16 mm)	Plastifiant (Sikaplast)
Quantité massique (kg/m ³ de béton)	167	320	830	445	550	2,6

Chaque dalle a été construite en 2 zones: une moitié de dalle contenant la simulation de délamination, et une moitié de dalle ne contenant que du béton, servant ainsi de zone témoin sur laquelle comparer les résultats des mesures acoustiques obtenus sur la première moitié. Trois dalles de béton ont ainsi été fabriquées :

1. la zone délaminée a été simulée par 2 feuilles de polyane
2. la zone délaminée a été simulée par 2 feuilles de polyane
3. la zone délaminée a été simulée par une couche d'huile de décoffrage (Fig. III-3[droite])

Le schéma de la figure III-4 explique notre démarche.

Cette série aura permis d'observer la sensibilité du système de mesure dans le béton (mortier et granulats) et d'évaluer la pertinence d'une couche d'huile de décoffrage en tant que rupture mécanique.

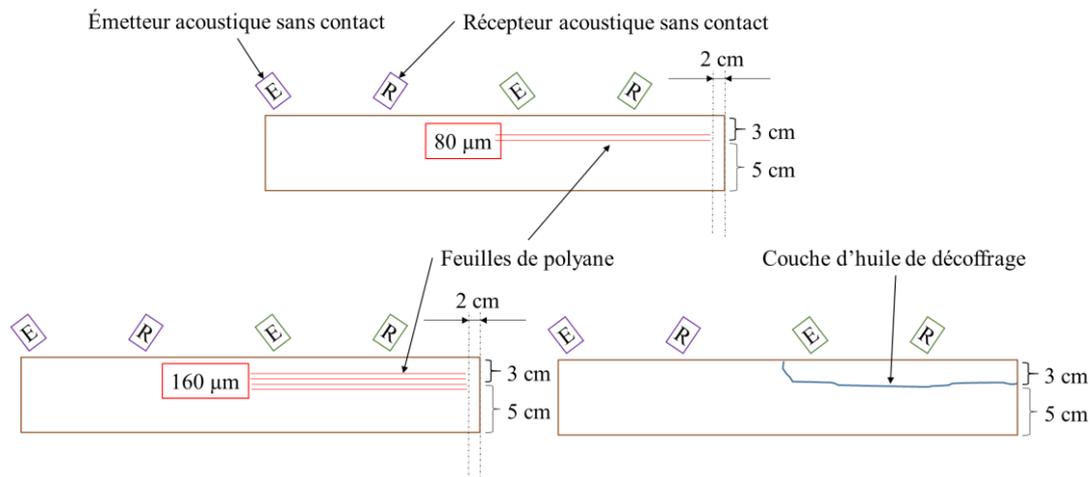


Figure III-4 : Description schématique des profils des premières dalles de béton (série 2)

Troisième série de dalles

Enfin, une troisième série de 2 dalles de béton a été coulée. Les dimensions des dalles ainsi que la composition du béton sont les mêmes que celles de la série précédente. La configuration de la simulation de délamination est également la même que celle de la série précédente, à la différence près que les délaminations seront complètement traversantes sur toute la demi-surface considérée, comme illustré sur les figures III-4 et III-5, cela afin de s'assurer que le contact mécanique existant sur toute la circonférence des dalles de la deuxième série n'empêche pas le phénomène de délamination.

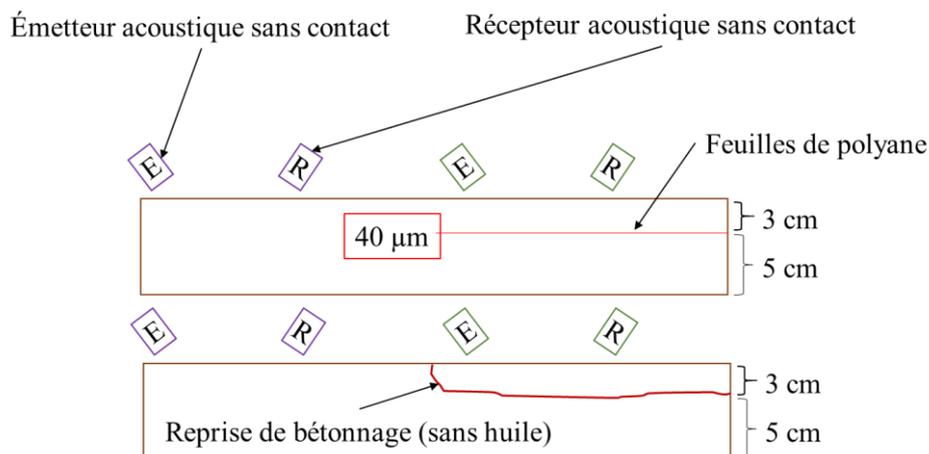


Figure III-5 : Description schématique des profils des dalles de béton supplémentaires (série 3)

La première dalle est similaire à la dalle avec une feuille de polyane de la série 1, et a pour but de déterminer l'impact éventuel des points de contact sur le périmètre de la surface dans le cas de la feuille de polyane. La deuxième dalle était coulée en deux étapes, dont l'une est illustrée sur la figure III-6 : la deuxième couche était coulée un jour après la première (aucune feuille de polyane n'était utilisée). Cela permet d'évaluer la pertinence d'une reprise de bétonnage en tant que modèle de délamination.

L'ensemble de cette étude aura ainsi testé 4 ruptures mécaniques vues comme modélisations possibles de délamination :

- couche de polyane de différentes épaisseurs (séries 1, 2 et 3)
- 2 surfaces coffrées placées l'une contre l'autre (série 1)
- couche d'huile de décoffrage (série 2)
- reprise de bétonnage (série 3)



Figure III-6 : Photo de la deuxième dalle de la figure III-5 : reprise de bétonnage à 3 cm de profondeur par rapport à la surface libre

III.2.2 Protocole des mesures acoustiques

La délamination consiste en une fissure plane, orientée parallèlement à une surface libre d'une structure. Étant donné le grand contraste acoustique entre le béton et l'air, la délamination agit comme le fond de la dalle donc provoque une diminution locale de l'épaisseur d d'une dalle auscultée. En suivant l'explication donnée dans le paragraphe I.3.3 (voir la figure I-15), on peut rappeler que lorsque la profondeur de la dalle est plus grande que la longueur d'onde de l'onde de surface :

$$d > \lambda_{OS}, \quad (\text{III-1})$$

les conditions pour qu'une onde de surface non dispersive se propage sont remplies. Si on prend en compte que $\lambda_{OS} = \frac{v_{ph}(f)}{f}$ (équation I-4), l'équation (III-1) peut se réécrire pour la fréquence :

$$f_c > \frac{v_{ph}(f)}{d} \quad (\text{III-2})$$

où f_c indique la fréquence de coupure à partir laquelle l'onde de surface pourra se propager.

Lorsque l'épaisseur d diminue et devient plus faible que λ_{os} , donc si :

$$f_c < \frac{V_{ph}(f)}{d}, \quad (III-3)$$

cela va créer les conditions nécessaires à l'apparition des modes A_0 et S_0 des ondes de plaque (onde de Lamb). Ce phénomène est illustré sur la figure III-7 pour une profondeur de délamination $d = 3$ cm et pour un béton ayant les mêmes propriétés acoustiques que celui utilisé pour la fabrication des dalles. Il est clairement visible que si $f_c > 0,08$ MHz, les deux modes d'ondes de plaque A_0 et S_0 disparaissent et deviennent une onde de surface (non dispersive, $V_{ph} = \text{constante}$). Finalement si on connaît la fréquence de coupure, la profondeur de la délamination d peut alors être estimée proche de :

$$d \approx \lambda(f_c) = \frac{V_{ph}(f_c)}{f_c} = \frac{2500 \text{ m/s}}{0,08 \text{ MHz}} = 3,125 \text{ cm} \quad (III-4)$$

Autrement dit, on attend qu'une délamination de faible épaisseur (quelques microns par exemple) à 3 cm de profondeur se comporte comme une dalle de 3 cm d'épaisseur. Ainsi, plus l'épaisseur d de la zone délaminée est importante, plus la fréquence de coupure f_c va diminuer.

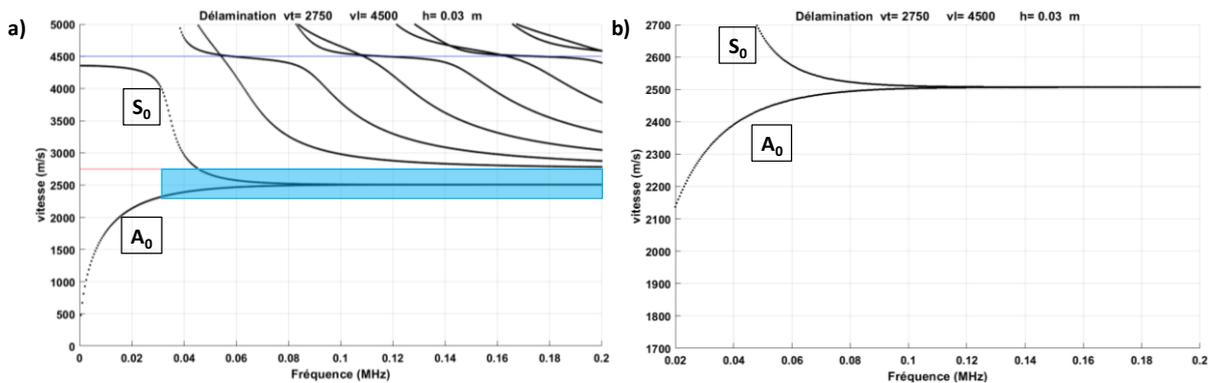


Fig.III-7 : a) Les modes A_0 et S_0 ainsi que les modes supérieurs des ondes de plaque dans une dalle d'épaisseur 3 cm ; b) Zoom de la zone où l'onde de surface apparaît (Note : cette simulation est valable pour le matériau béton, donc pour les séries 2 et 3)

Afin de faire apparaître des ondes de Lamb, il s'avère logique d'utiliser pour cette étude une zone fréquentielle centrée autour de la fréquence f_c , c'est-à-dire de 40 kHz à 150 kHz. Conformément au tableau II-2 (Chapitre II), il faut utiliser le scanner hautes fréquences à ondes de surface, essentiellement dans les deux bandes [40 kHz – 100kHz] et [50 kHz – 150kHz]. En définitive, afin de couvrir une bande fréquentielle aussi grande que possible, les mesures ont été effectuées dans les 3 bandes [40 kHz – 100 kHz], [50 kHz – 150 kHz] et [100 kHz – 300 kHz]. Les courbes de dispersion obtenues ont ensuite été combinées. En se référant aux paramètres et réglages détaillés dans le paragraphe I.4, les mesures ont été réalisées en respectant le protocole décrit dans le tableau III-3.

Tableau III-3 : Paramètres et réglages du scanner

Série de mesures	Nombre de profils par dalle	Nombre de transducteurs	Longueur d'un profil L (cm)	Ecart entre les points de mesure (cm)	Nombre de points de mesure par profil N	Angle d'attaque β (°)	Forme d'impulsion n W(t)	« Averaging »
Série 1	8	3	25	0,2	125	10	Chirp rectangulaire	8 – 32
Série 2	5	3	25	0,5	50	8,5	Chirp rectangulaire	8 – 32
Série 3	5	3	25	0,25	100	8,5	Chirp rectangulaire	8 – 32

Comme pour l'étude de la lixiviation, afin de donner une représentation plus homogène d'un matériau à priori non homogène, les mesures ont été réalisées sur 5 ou 8 profils (suivant la série) parallèles, espacés de 1 cm ou 2 cm suivant la série, et les résultats ont été moyennés. Afin d'améliorer le rapport signal/bruit (SNR), un moyennage (« averaging ») de plusieurs signaux reçus sur une position donnée était utilisé (entre 8 et 32 signaux moyennés par position du récepteur, en fonction du niveau de signal). La figure III-8 montre l'une des mesures sur la dalle de la série 1 contenant une feuille de polyane.

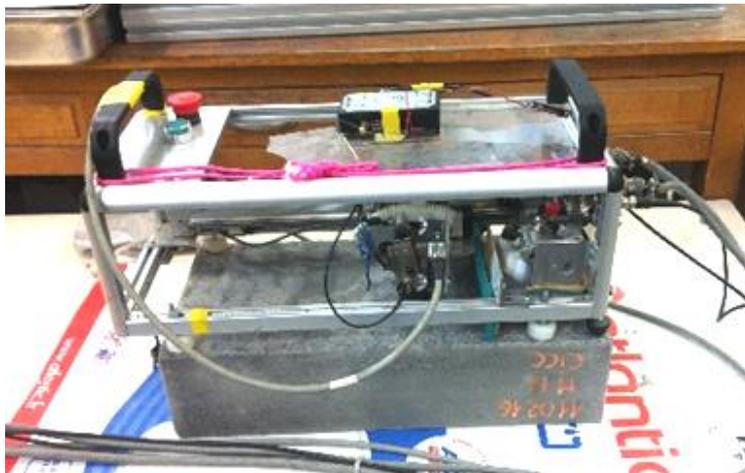


Figure III-8 : Scanner à hautes fréquences effectuant une mesure sur une dalle de la série 1

III.3 Résultats

III.3.1 Interprétation des résultats

Cette partie va présenter les résultats obtenus sur les 3 séries de dalles fabriquées et leurs différentes façons de simuler une délamination dans du mortier ou dans du béton. L'interprétation des résultats concernant la délamination va essentiellement se baser sur la caractéristique de dispersion d'une éprouvette selon qu'elle est traversée par des ondes de surface (ondes guidées par la surface qu'elles parcourent) ou par des ondes de plaque (ondes guidées par 2 surfaces parallèles). En effet, puisque les premières ondes sont non dispersives, leur courbe de dispersion est donc attendue horizontale, alors que les secondes sont dispersives, et leur vitesse (les modes A_0 et S_0) varie avec la fréquence. On attend donc qu'une zone délaminée à 3 cm se comporte comme une dalle d'épaisseur 3 cm.

III.3.2 Première série de dalles

La figure III-9 montre les caractéristiques des dispersions ainsi que les B-scans des résultats d'opération Slant-Stack, qui affichent plus de détails de la dispersion. Sur ces dalles, 8 profils ont été scannés, ce qui a donné 8 caractéristiques de dispersion. La Figure III-9 présente leur moyenne. La figure III-10 regroupe les résultats et présente l'écart-type.

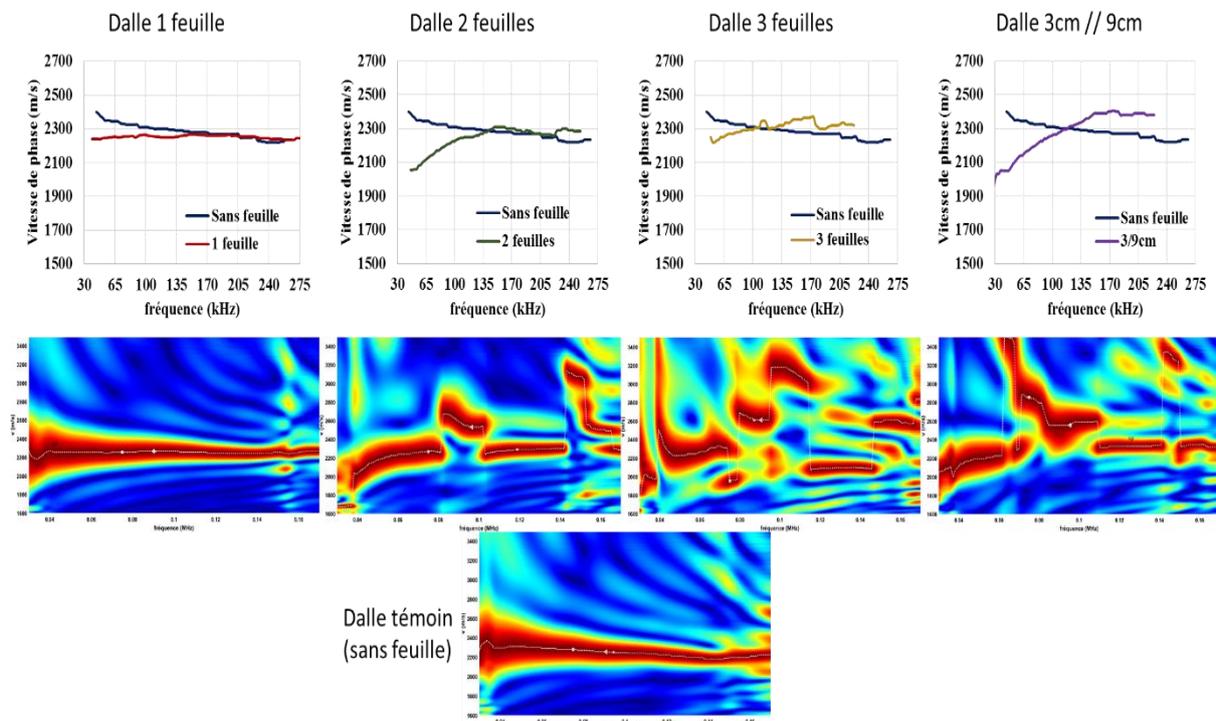


Figure III-9 : Résumé des courbes de dispersion des 5 dalles de mortier de la série 1, ainsi que leurs transformations Slant-Stack respectives pour le transducteur centré sur 75 kHz

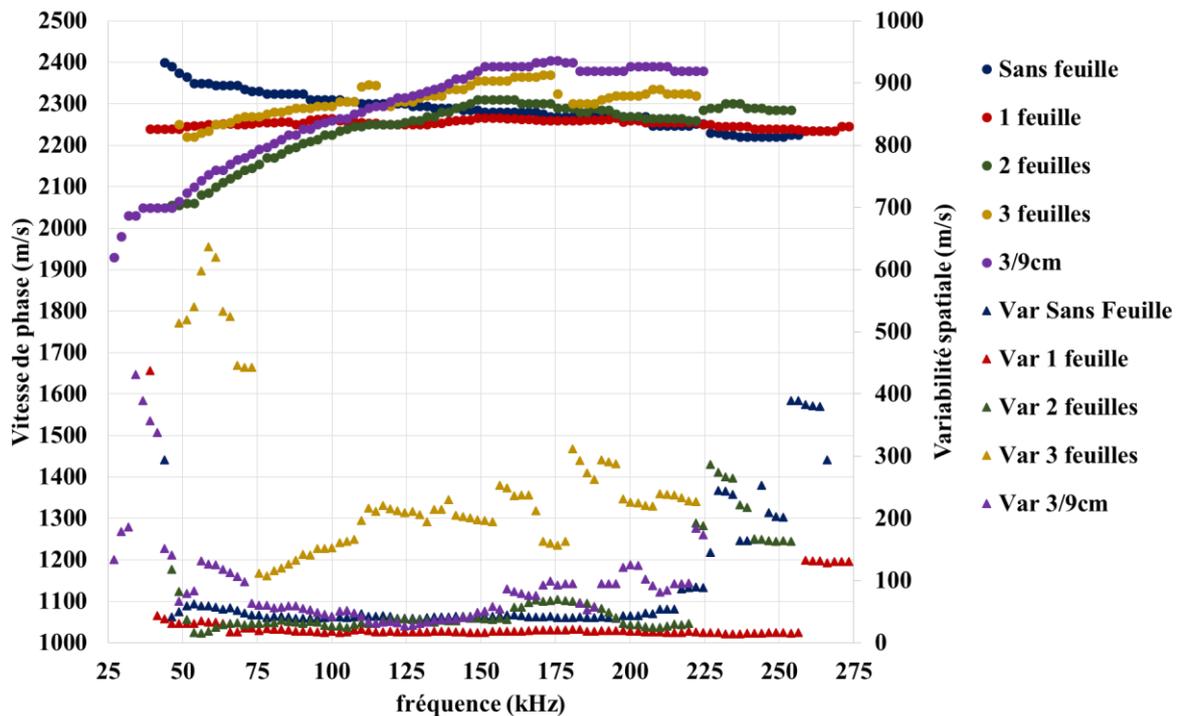


Figure III-10 : Résumé des courbes de dispersion des 5 dalles de mortier de la série 1 avec leurs écart-types (nommé Var)

L'analyse de ces résultats nous conduit aux conclusions suivantes.

La courbe de dispersion de l'éprouvette de contrôle (« Sans feuille ») montre une légère décroissance en fonction de la fréquence, là où une vitesse indépendante de la fréquence serait attendue. Il s'agit cependant du même phénomène que celui observé sur une éprouvette de béton sain dans le cadre de l'étude sur la lixiviation du béton. Il s'agit très probablement d'un léger gradient de propriétés dû au fait que le béton ou le mortier de peau est plus poreux, la vitesse y est donc plus faible et la dispersion observée peut correspondre à ce phénomène.

La courbe de dispersion de la dalle contenant une feuille de polyane ($40 \mu\text{m}$ d'épaisseur) se trouve être horizontale, hors le mortier est dans le même état que pour la dalle de contrôle car les dalles ont toutes été préparées et stockées dans les mêmes conditions. On observe donc bien un effet de la feuille de polyane sur la courbe de dispersion. Sur cette courbe de dispersion, bien que les ondes de surface prédominent (la vitesse dépend très peu de la fréquence), le mode A_0 des ondes de plaque commence à apparaître, conformément aux prévisions car c'est surtout au niveau des basses fréquences que cette courbe diffère de celle de la dalle de contrôle.

Le passage des ondes de surface vers les ondes de plaque se voit plus clairement sur la courbe de la dalle contenant 2 feuilles. Le mode A_0 des ondes de plaque est clairement identifiable avec $f_c \approx 100 \text{ kHz}$.

La courbe de dispersion de la dalle contenant 3 feuilles de polyane ne suit cependant pas cette logique, elle semble avoir un comportement plus proche de la dalle contenant une seule feuille. Cela étant, la variabilité spatiale de la courbe « 3 feuilles » est presque 10 fois plus grande que les autres, ce qui implique que cette courbe est moins facilement comparable aux les autres. Cette grande variabilité spatiale est en réalité expliquée par une plus grande sensibilité de cette mesure aux différents modes des ondes de plaque, comme on peut le voir sur les B-scans. Sur cette figure, on voit apparaître plusieurs modes supérieurs symétriques et antisymétriques, ce qui fausse (augmente) la vitesse mesurée. En effet, conformément à la figure III-7, ces modes tendent vers la vitesse V_s , plus grande que V_{os} . On reste donc dans la continuité d'un transfert des ondes de surface vers les ondes de plaque, mais la présence de ces modes gêne la partie horizontale de la courbe – ce que l'on peut prévoir à la base de la figure III-7.

Enfin, la courbe « 3//9cm » montre à la fois un mode A_0 sans équivoque, ainsi que ses modes supérieurs qui commencent à dominer, comme dans les cas de la dalle avec 3 feuilles. Cela indique clairement que l'onde est maintenant une onde de plaque, et pour cause.

On remarque que les modes A_0 des courbes « 2 feuilles » et « 3 cm // 9 cm » sont très proches. Cela semble indiquer que 2 feuilles de polyane immergées dans une dalle de mortier se comportent acoustiquement comme une lame d'air, tandis qu'une seule feuille de polyane ne paraît pas suffisant pour complètement découpler mécaniquement 2 parties de mortier. Une épaisseur de 80 μm de polyane est donc suffisante pour simuler une délamination.

Ces résultats confirment alors qu'une détection de la délamination horizontale est possible par l'analyse des courbes de dispersion et la recherche de l'apparition du mode A_0 de l'onde de plaque (le plus facilement détectable). Ce phénomène peut aussi être accompagné par l'apparition des modes supérieurs de l'onde de plaque.

De plus, on trouve que la simulation de la délimitation par deux feuilles de polyane est quasi équivalente à une lame d'air (la dalle 3 cm // 9 cm).

III.3.3 Deuxième série de dalles

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures III-11, III-12 et III-13. La figure III-12 montre la dispersion de façon plus détaillée ainsi que l'écart type des mesures. Le premier élément remarquable est l'horizontalité des courbes de dispersion des zones témoin de chaque dalle ce qui témoigne une plus grande homogénéité des dalles au regard des dalles de série 1. Les surfaces auscultées sur cette série ont été coffrées contrairement aux dalles de mortier et cela pourrait expliquer cet effet.

L'écart type des mesures est très faible, généralement plus faible que 50 m/s et il augmente dans les zones d'apparition des modes A_0 et S_0 .

Pour chaque dalle, on observe une superposition des 2 courbes correspondant aux zones « témoin » et « délaminée » sur la bande fréquentielle [175 kHz – 300 kHz], où les ondes se propagent comme des ondes de surface.

Sur la bande fréquentielle [50 kHz – 75 kHz], on observe une apparition des modes proches de S_0 et A_0 . Ces effets suivent le comportement attendu: le plus prononcé est le cas « 4 feuilles », où l'épaisseur de la délamination est la plus grande.

Cela valide donc l'hypothèse selon laquelle, en diminuant la fréquence de l'onde envoyée sur une surface délaminée, l'onde se comporte en premier lieu comme une onde de surface, puis lorsque sa longueur d'onde atteint la délamination, elle est en plus guidée par celle-ci et devient une onde de plaque.

Les fréquences de coupure f_c peuvent y être approximativement estimées respectivement à 180 kHz, 160 kHz et 100 kHz pour les cas «2 feuilles», « 4 feuilles » et « huile » - ce qui donne l'estimation des profondeurs de délamination suivante : 1,3 cm, 1,5 cm et 2,5 cm. Ces résultats indiquent que l'estimation de la profondeur à partir des résultats expérimentaux est trop simpliste et ne donne pas les profondeurs attendues.

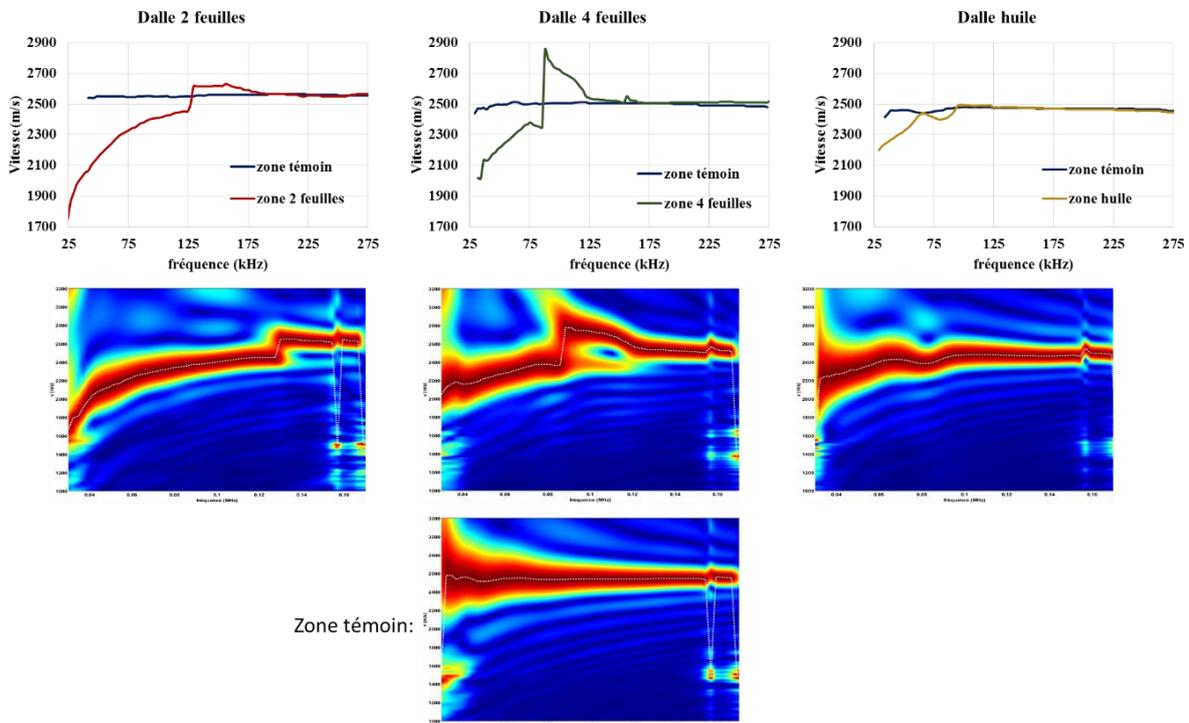


Figure III-11 : Résumé des courbes de dispersion des 3 dalles de mortier de la série 2, ainsi que leurs transformations Slant-Stack respectives pour le transducteur centré sur 75 kHz

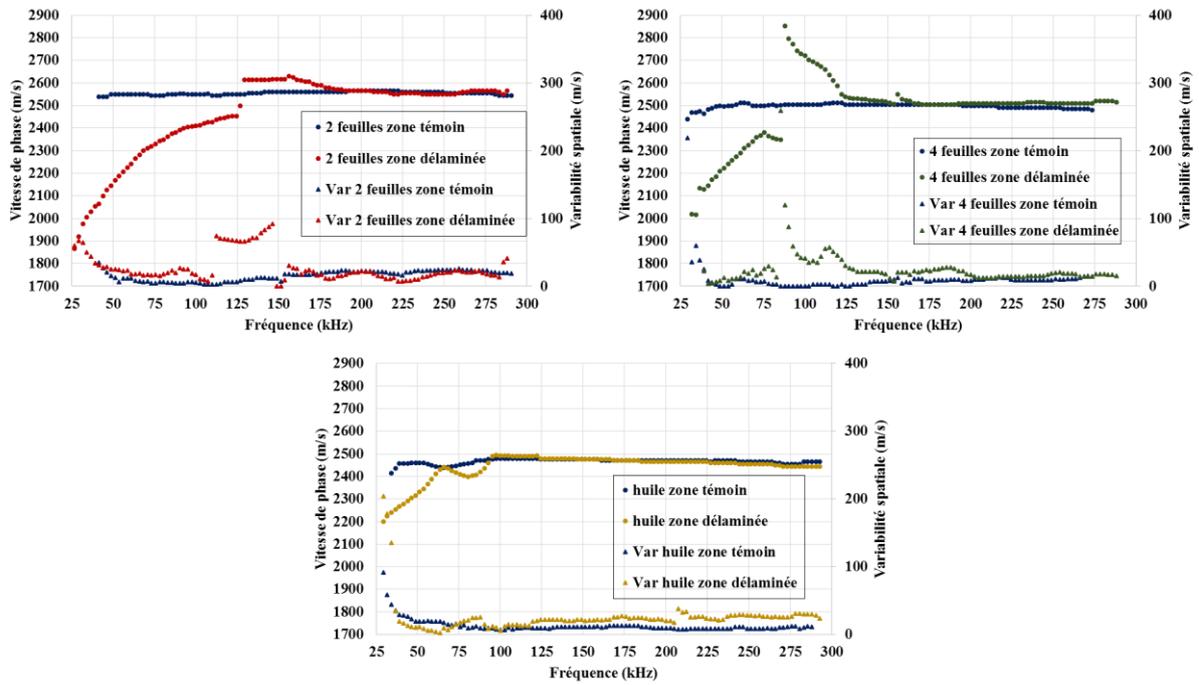


Figure III-12 : Résumé des courbes de dispersion des 3 dalles de béton de la série 2, avec leurs écart-types

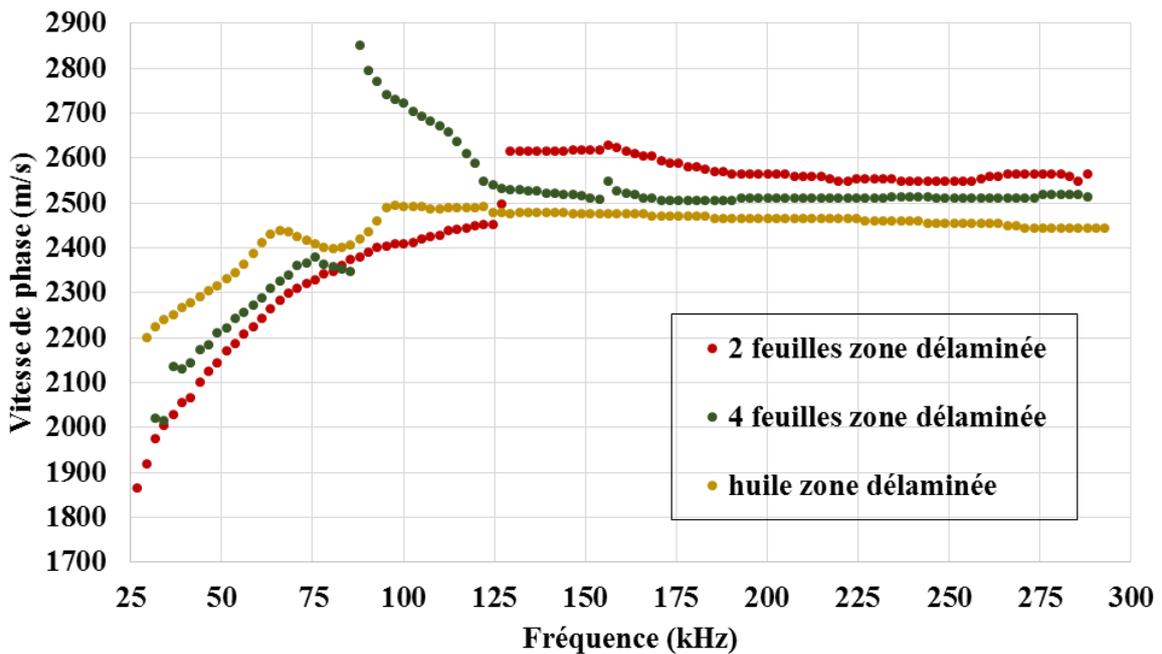


Figure III-13 : Comparaison des courbes de dispersion des zones délaménées des 3 dalles de la série 2

De plus, pour la dalle contenant une couche d'huile de décoffrage, la partie de la courbe de dispersion de la zone délaminée est moins déformée que celle des cas précédents, ce qui semble signifier que la partie délaminée de cette dalle est mécaniquement moins découplée que celles des dalles contenant des feuilles de polyane, même si le phénomène de délamination est observé.

Cette série des mesures a donc bien confirmé que la délamination dans le béton peut être détectée par l'apparition des modes A_0 et S_0 des ondes de plaques dans la caractéristique de dispersion (et aussi des modes supérieures qui « brouillent » l'image). Notons que le cas de l'huile génère uniquement une faible apparition du mode A_0 , sans S_0 .

De plus, il est confirmé que la délamination peut effectivement être simulée par au minimum 2 feuilles de polyane.

Afin de quantifier les délaminations obtenus dans cette série de dalles, nous avons procédé à l'expérimentation expliquée sur les figures III-14 et III-15. Les dalles ont été examinées par transmission, dans une configuration sans contact (cf. Fig. I-10). L'émetteur sans contact 75 kHz est le même que celui utilisé dans la scanner HF et le récepteur BAT (également le même utilisé pour le scanner HF) étaient installés sur le scanner 3D du laboratoire (Fig. III-14), ce qui a permis de balayer toute la surface de la dalle. La possibilité de tester le béton par transmission était déjà validé par [Liu et al – 2013 ; Liu – 2014 ; Liu et al – 2014] et est aussi décrite par Kaczmarek et al [2016]. Ici, cette technique est utilisée pour vérifier la qualité de délamination. Le signal reçu constitue l'onde longitudinale transmis à travers la dalle.

La zone scannée avait les dimensions 60 x 15 cm² et était définie de manière à couvrir à moitié la partie saine et à moitié la partie delaminée. Le scanning était réalisé avec un pas $dx = dy = 1$ cm. Dans la partie saine, le signal devrait passer sans problème et cette partie sert comme référence, alors que dans la partie delaminée le signal devrait être bloqué (on n'attend que du bruit).

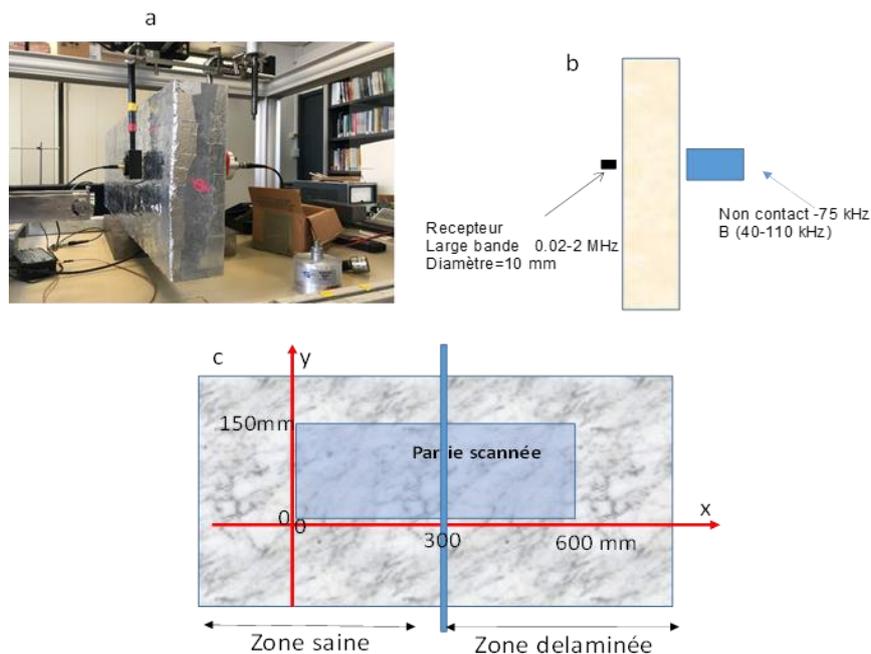


Figure III-14 : a) Dalle pendant le test de transmission sans contact b) explication symbolique de l'expériment c) la zone scannée

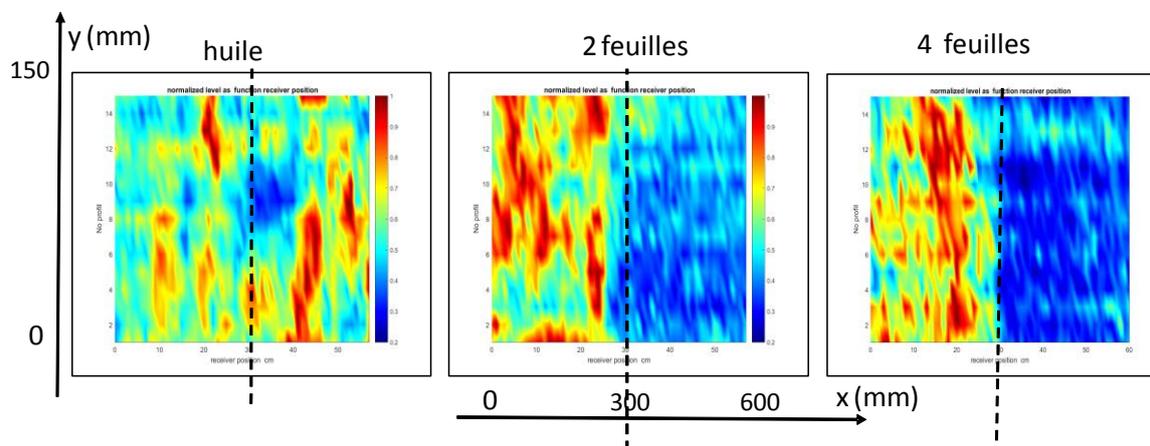


Figure III-15 : C-scan représentant le niveau de l'onde transmis à travers de la dalle : la partie gauche correspond à la zone saine, la partie droite à la zone délainée, la couleur bleu correspond au niveau du bruit

Les résultats obtenus (Fig. III-15) confirment que la présence de 2 et 4 feuilles bloque le passage de l'onde (couleur bleu sur les parties gauches), ce qui signifie que la délamination y est effective : on observe un grand contraste entre la partie saine et délainée. Notons que ces deux cas sont quasi identiques. On observe en revanche que le béton de la partie saine (côté gauche des figures) n'est pas homogène: le signal observé y est très variable ce qui témoigne d'une non homogénéité du béton. Au contraire, la dalle « huile » n'affiche pas exactement les effets attendus et on observe partout les mêmes variations du signal, variations identiques à celles observées sur les parties saines des dalles avec 2 et 4 feuilles. En conclusion : l'huile n'est pas « vue » par transmission par l'onde longitudinale et ce résultats confirme nos conclusions précédents (Fig.III.11) (attention : ce test devrait être confirmé par la transmission des ondes transversales pour exclure complètement le rôle de l'huile, ce dernier test étant uniquement faisable avec une méthode de contact mais n'a pas été effectué).

III.3.4 Troisième série de dalles

Les figures III-16 et III-17 montrent les résultats obtenus pour la troisième série de mesures. Le cas « une feuille » ne montre pas les effets observés dans la série 1, ce qui confirme l'observation précédente : une feuille n'est pas suffisante pour simuler une délamination. La même conclusion s'applique en ce qui concerne la reprise de bétonnage. Cette reprise de bétonnage n'est également pas « vue » par le système de mesure comme une délamination – probablement parce que la reprise de bétonnage n'assure qu'une trop faible rupture mécanique pour être détectée par l'onde acoustique. La zone de reprise de bétonnage semble se comporter de manière très similaire à la zone témoin.

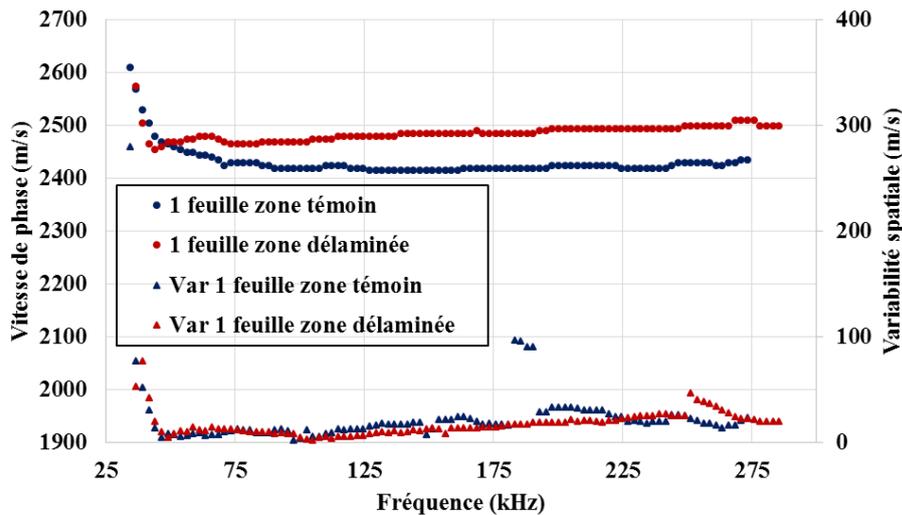


Figure III-16 : Courbes de dispersion de la troisième série de dalles pour la dalle contenant une feuille de polyane

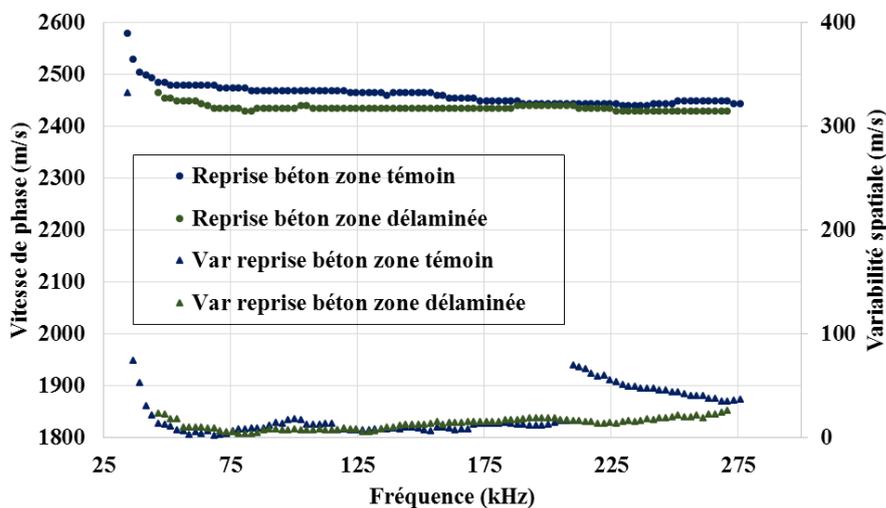


Figure III-17 : Courbes de dispersion de la troisième série de dalles pour la dalle contenant une reprise de bétonnage

III.4 Conclusion

Tous les résultats obtenus ont permis de démontrer la capacité de la technique acoustique basée sur l'utilisation des ondes de surface à détecter une zone délaminée. C'est la différence de propriétés dispersives entre les ondes de surface et les ondes de plaque qui permet d'identifier une zone délaminée.

Ces résultats confirment alors qu'une détection de la délamination est possible par l'analyse des courbes de dispersion et la recherche de l'apparition des modes A_0 et S_0 de l'onde de plaque (modes les plus facilement détectables). Ce phénomène peut aussi être accompagné par l'apparition des modes supérieures de l'onde de plaque.

On remarque que les résultats pour les cas « 2 feuilles » et « 3 cm // 9 cm » dans la série 1 sont très proches. Cela semble indiquer que 2 feuilles de polyane immergées dans une dalle de mortier se comportent acoustiquement comme une lame d'air, tandis qu'une seule feuille de polyane n'est pas suffisante pour complètement découpler mécaniquement 2 parties de mortier. Une épaisseur de 80 μm de polyane est donc suffisante pour simuler une « vrai » délamination mais une seule feuille de polyane (40 μm) n'est pas suffisante pour complètement découpler mécaniquement 2 parties de mortier. La détection d'une telle anomalie s'est révélée relativement difficile car les symptômes sont très discrets.

Finalement, on trouve que la simulation de la délimitation par deux feuilles (ou plus) de polyane est quasi équivalente au modèle le plus proche d'une vraie délamination simulé dans cette étude : une lame d'air.

En revanche, la reprise de bétonnage n'est pas vue comme une délamination par le scanner, probablement parce que la reprise de bétonnage n'assure qu'une trop faible rupture mécanique entre deux couches de béton.

En perspective de cette étude, l'approximation de la profondeur de la délamination peut être affinée par l'utilisation d'une technique d'inversion des courbes de dispersion selon un modèle d'ondes de plaque.

Etant donné qu'une approche sans contact peut-être automatisée et utilisée pour l'auscultation des grandes surfaces on pourrait envisager une telle solution à l'avenir. Il serait aussi intéressant de coupler le scanner à onde de surface avec l'approche de l'impact écho semi-contact automatisé dans le même scanner.

Références bibliographiques Chapitre III

[Abraham et al – 2000] O. ABRAHAM, C.-H. LEONARD, P. COTE et B. PIWAKOWSKI, Time frequency analysis of impact-echo signals: numerical modelling and experimental validation, American Concrete Institute Materials Journal, Volume 97, Issue 6, January 2000, Pages 645-657.

[Balayssac et Garnier – 2018] J.-P. BALAYSSAC et V. GARNIER, Evaluation non destructive des ouvrages en génie civil, ISTE Editions, 2018.

[Garnier et al – 2013] V. GARNIER, B. PIWAKOWSKI, O. ABRAHAM, G. VILLAIN, C. PAYAN, J.-F. CHAIX, Acoustical techniques for concrete evaluation : Improvements, comparisons and consistencies, Construction and Building Materials, Volume 43, June 2013, Pages 598 – 613.

[Krautkrämer – 1990] J. KRAUTKRÄMER et H. KRAUTKRÄMER, Ultrasonic Testing of Materials, Springer Berlin Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-662-10680-8.

[Liu et al – 2013] Q. LIU, B. PIWAKOWSKI, Z. LAFHAJ, Accurate non-contact air-coupled velocity measurements in planar elastic samples , Proceedings of 13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials, May 2013, Le Mans, France.

[Liu – 2014] Q. LIU, Contribution à la caractérisation des mortiers par des méthodes ultrasonores: relations entre les propriétés mécaniques et acoustiques, Thèse de doctorat à l'Ecole Centrale de Lille, 2014.

[Liu et al – 2014] Q. LIU, B. PIWAKOWSKI, Z. LAFHAJ, K. AGRED, Automated non-contact NDT by ultrasonic surface waves, International Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT), Chengdu China, June, 2014.

[Parmentier et al – 2009] B. PARMENTIER, V. POLLET et G. ZARMATI, Le retrait empêché du béton, Centre Scientifique et Technique de la Construction, Les Dossiers du CSTC, Numéro 2/2009, Cahier n°3, page 12.

[Sansalone et Streett – 1997] M. J. SANSALONE, W. B. STREETT, Impact-echo Nondestructive evaluation of concrete and masonry, Bullbrier Press, Jersey Shore, PA, 1997.

[Stalnakker et Fugler – 1992] J. J. STALNAKER et M. D. FUGLER, Analysis of delamination of Post-Tensioned Silos, Journal of Structural Engineering, Volume 118, Issue 4, April 1992.

[Sun et al – 2017] H. SUN, S. HAM, Acoustic evaluation of concrete delaminations using ball-chai impact excitation, Journal of the Acoustical Society of America, Volume 141, Issue 5, May 2017, DOI: 10.1121/1.4983343.

[Sun et al – 2018] H. SUN, J. ZHU, S. HAM, Automated Acoustic Scanning System for Delamination Detection in Concrete Bridge Decks, Journal of Bridge Engineering, Volume 23, Issue 6, June 2018, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001237.

[Zhang et al – 2012] G. ZHANG, R. S. HARICHANDRAN, P. RAMUHALLI, An automatic impact-based delamination detection system for concrete bridge decks, *NDT & E International*, Volume 45, Issue 1, January 2012, DOI: 10.1016/j.ndteint.2011.09.013.

[Zhu et POPOVICS – 2007] J. ZHU, J. S. POPOVICS, Imaging concrete structures using air-coupled impact-echo, *Journal of Engineering Mechanics*, June 2007, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:6(628), 628–640.

Chapitre IV

Suivi d'un front de perturbation hydrique

IV.1 Introduction

Le principal objectif de cette partie est d'évaluer si la méthode acoustique peut donner des résultats fiables (ou prometteurs) envers l'évaluation de la saturation locale du matériau béton, en particulier. Le problème de fond qui est posé est qu'on peut considérer que la saturation est un état (et non une propriété) du matériau qui va varier de manière continue dans une structure, contrairement à une fissuration ou une délamination qui peuvent toutes deux concerner une zone très localisée donc entraînant un changement brutal dans un mode de propagation d'ondes. La lixiviation peut aussi donner une variation continue de propriétés (porosité, module) mais avec d'importants contrastes. La saturation en eau est donc un tout autre problème que celui posé par les précédents. Comme indiqué plus haut, elle caractérise un état du matériau qui est directement lié à la structure poreuse de celui-ci. Pour un équilibre à une humidité donnée, elle pourra prendre des valeurs très différentes selon la répartition de la taille des pores et de la taille des jonctions qui vont relier des familles de pores. En parallèle, la même saturation, pour deux matériaux différents, n'indique pas la même quantité d'eau (pour une masse ou un volume donné) et elle n'a donc pas le caractère intrinsèque qu'aurait un module d'Young ou une masse volumique (sèche) par exemple. Un autre problème lié au séchage du matériau poreux réside dans les effets physiques liés à ce séchage (ou à une imbibition qui sera moins fréquemment rencontrée in-situ). De manière globale la dessiccation va entraîner un retrait, appelé retrait de dessiccation (l'imbibition provoquant un gonflement), et dans un béton ce retrait va concerner la seule pâte de ciment car les granulats siliceux ou calcaires sont souvent pas ou très peu poreux. Ces retraits (voir [Brue – 2009] et [Yurtdas – 2003]) sont de l'ordre de plusieurs centaines de micro-déformations induites par, ce qu'on peut considérer en première approche, le retrait de la pâte. On va donc avoir un premier effet de structure autour du granulat 'indéformable' entouré par une gangue de pâte dont le retrait est plus ou moins localement empêché, résultant en une fissuration locale. A cet effet local s'ajoute un effet de structure, plus global, qui est lié en grande partie à la cinétique extrêmement lente du séchage sous humidité. Si on considère le cylindre schématisé ci-dessous (figure IV-1) on remarque qu'on va avoir une zone externe en séchage (non homogène) qui entoure une zone non affectée par celui-ci. Ce noyau ne se déforme donc pas (pas de retrait), il va donc jouer un rôle équivalent à celui du granulat de l'échelle locale et s'opposer au retrait de la zone qui l'entoure. Pour un matériau fragile tel le béton, le retrait empêché va provoquer une fissuration complémentaire d'une autre échelle a priori. En parallèle, le même phénomène va agir comme une « précontrainte » sur le noyau. En théorie, les propriétés élastiques ne devraient pas être affectées par cette précontrainte mais, en

pratique, elle agit sur un matériau (peut-être) déjà micro-fissuré et donc augmenter le module d'Young. La micro-fissuration initiale peut elle-même être due au retrait endogène de la pâte ou à des effets thermiques et mécaniques. D'un point de vue local la zone A du cylindre aura un module qui devrait diminuer par fissuration et la zone B un module qui augmenterait. A l'échelle de l'éprouvette cylindrique le résultat global est plus incertain. A l'échelle d'une structure plus massive et de géométrie moins simple c'est encore plus complexe. A une échelle encore plus petite, celle des hydrates, on pourra retrouver une rigidification locale due au départ d'eau liée (mais ce sera aux forts séchages) car concernant des départs d'eau des micro ou méso pores et un assouplissement induit par une micro-fissuration. Au bilan on a donc de multiples effets contradictoires pour un matériau hétérogène comme le béton et des impacts à différentes échelles qui ne permettent pas de conclure à un effet systématique sur le module élastique qui est la propriété clef. L'argument 'simpliste' qui serait de croire que le séchage va créer des poches d'air dans lesquelles les ondes se propageraient moins vite ne résiste pas non plus à l'analyse. Les pores (ou la porosité) d'un béton ne sont ni des cylindres, ni des sphères régulièrement répartis mais des enchevêtrements de vides tortueux, de taille hétérogène, et contenant de multiples ponts solides. Certains de ces vides sont si petits (méso voire micro-porosité) qu'ils restent toujours occupés par de l'eau adsorbée en surface dont le rôle moyen sur la propagation d'onde échappe à la portée du travail actuel. C'est pour cela sans doute, que les rares résultats de la littérature peuvent sembler contradictoires. Les données sont obtenues uniquement dans le domaine géophysique. Pour le calcaire, la vitesse longitudinale est comprise entre 3500 m/s et 6000 m/s et la vitesse transversale est comprise entre 2000 m/s et 3300 m/s. On trouve une grande variation des vitesses et coefficient de Poisson pour le calcaire (voir figure IV-6).

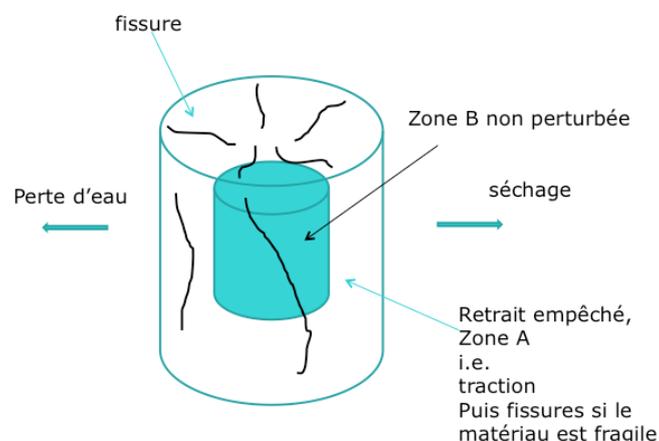


Figure IV-1 : Effet de structure pendant le séchage

IV.2 Essais préliminaires sur matériau homogène : un calcaire de Bourgogne

L'objectif de ce chapitre est de vérifier si le scanner ultrasonore à ondes de surface peut être utilisé pour estimer le teneur en eau dans le béton. Le chapitre introductif a mentionné que le cas du béton était (un peu) particulier du fait de son hétérogénéité à différentes échelles. Ainsi il nous a semblé utile d'appliquer cette méthode acoustique sur un matériau plus simple, plus facile à interpréter, pour ensuite revenir sur le cas plus complexe du béton. Notre choix a porté vers un calcaire dont une grande quantité était disponible au laboratoire. Dans ce paragraphe nous allons traiter le cas du calcaire. Le béton sera traité dans la section IV.3.

IV.2.1 Organisation de l'expérimentation

Le choix du matériau a porté vers un bloc cubique de 1 m de côté (voir figure IV-2) que nous disposions au laboratoire. Le matériau constitutif est à plus de 95 % composé de calcite, très poreux (19,90 %) et perméable ($4,45 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$) [Lion – 2008]. L'impossibilité de sécher le bloc cubique complet implique que le matériau avant le démarrage des tests est à humidité relative ambiante. Afin d'étudier la saturation en fonction de la profondeur, l'idée était de faire des phases d'imbibition par ajout successif de couches d'eau d'un centimètre d'épaisseur. Après chaque imbibition on a effectué une mesure acoustique et mesuré en parallèle la répartition de la saturation en eau sur des cylindres témoins.



Figure IV-2 : Bloc de calcaire utilisé pour les mesures acoustiques, et schéma du dispositif d'étanchéification

L'expérimentation a été réalisée en parallèle, de la manière suivante : 2 blocs de calcaire identiques, de dimensions identiques ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$), ont été sélectionnés pour ce travail. Le 1^{er} bloc a été utilisé pour faire des mesures acoustiques, le 2^{ème} bloc a été utilisé pour caractériser la saturation sur des échantillons témoins cylindriques prélevés sur ce bloc.

L'expérimentation comprend 6 états d'imbibition. L'état 0 est l'état initial, c'est la référence. Les 5 états suivants sont le résultat d'une imbibition obtenue par ajout sur la surface du bloc de 1 cm d'eau (1620 g d'eau sur le bloc destiné aux mesures acoustiques, 6,64 g d'eau sur la colonne de cylindres pour les mesures de saturation) à différentes périodes dont la durée est liée au temps nécessaire aux types de mesures à effectuer entre chaque phase d'imbibition.

Tableau IV-1: Chronologie des mesures sur calcaire (identique pour les 2 dispositifs de mesure)

Temps	Action
$t = t_0$	Ajout de 1 cm d'eau
$t_1 = t_0 + 34 \text{ min}$	Fin absorption, Début mesures Etat 1
$t_2 = t_1 + 46 \text{ min}$	Fin mesures Etat 1, ajout de 1 cm d'eau
$t_3 = t_2 + 20 \text{ min}$	Fin absorption, Début mesures Etat 2
$t_4 = t_3 + 40 \text{ min}$	Fin mesures Etat 2, ajout de 1 cm d'eau
$t_5 = t_4 + 25 \text{ min}$	Fin absorption, Début mesures Etat 3
$t_6 = t_5 + 40 \text{ min}$	Fin mesures Etat 3, ajout de 1 cm d'eau
$t_7 = t_6 + 30 \text{ min}$	Fin absorption, Début mesures Etat 4
$t_8 = t_7 + 40 \text{ min}$	Fin mesures Etat 4, ajout de 1 cm d'eau
$t_9 = t_8 + 35 \text{ min}$	Fin absorption, Début mesures Etat 5
$t_{10} = t_9 + 40 \text{ min}$	Fin mesures Etat 5

Afin d'éviter que l'eau ne coule sur les parois du premier bloc, une protection étanche a été fabriquée, ce qui permettait de mettre de l'eau sur une seule des surfaces du bloc (réduisant également la surface d'absorption de l'eau à $90 \times 90 \text{ cm}^2$). La figure IV-3 illustre la solution adoptée.

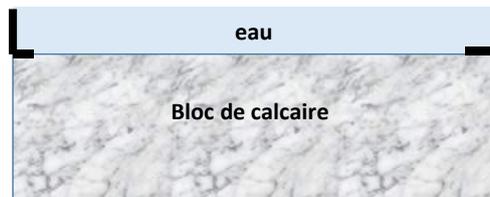


Figure IV-3 : Schéma de la procédure d'imbibition par 1cm d'eau sur la surface de calcaire étanchéifiée sur ses bords

La figure IV-4 illustre une phase d'imbibition d'eau sur l'une des surfaces du 1^{er} bloc.



Figure IV-4 : Illustration du protocole expérimental sur le bloc calcaire (imbibition de 1cm d'eau sur la surface de calcaire étanchéifiée sur les côtés)

Parallèlement, un échantillon cylindrique a été prélevé à partir du 2^{ème} bloc. Ensuite le cylindre a été coupé en tranches (figure IV-5). Les tranches ont été placées à l'étuve pour les sécher (pour obtenir un véritable état sec).

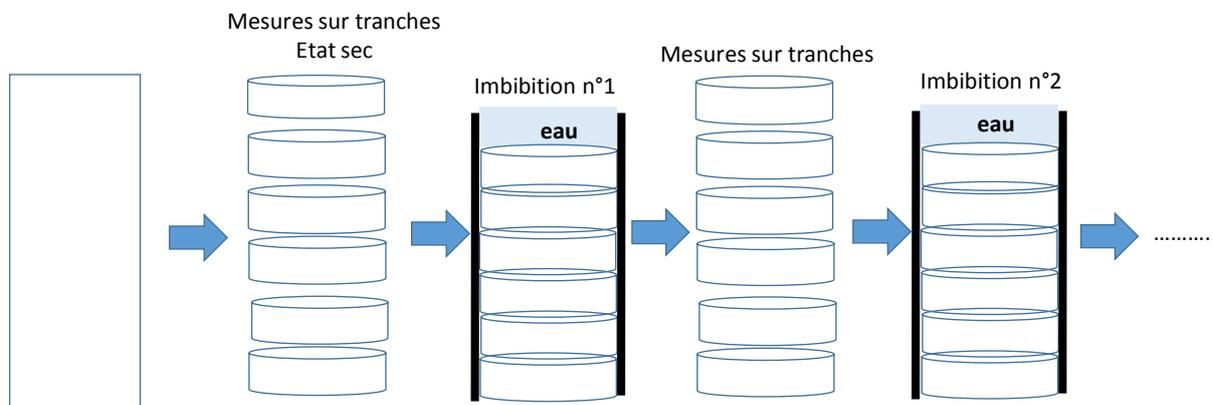


Figure IV-5 : Illustrations de phases consécutives procédure d'imbibition par 1 cm d'eau sur les tranches assemblées étanchéifiées sur les côtés

Les phases d'imbibition ont été réalisées selon le même emploi du temps que celui utilisé pour les mesures acoustiques. Afin de simuler une grande épaisseur de calcaire, les tranches ont été réassemblées avec une bande plastique étanche et des colliers de serrage (figure IV-5 et figure IV-6) au moment de chaque phase d'imbibition. De plus, pour chacune de ces phases, la même quantité d'eau par unité de surface absorbante a été ajoutée. Ainsi, les conditions expérimentales relatives aux mesures acoustiques et aux mesures de masses sur tranches ont été identiques. Au cours des phases de mesure, chaque tranche était pesée avec une balance de précision au 1/100^{ème} de gramme. Les tranches étaient ensuite réassemblées le plus rapidement possible, pour que l'imbibition ne soit interrompue que pendant un court instant (5 minutes environ). Les tranches étaient marquées sur leur paroi, afin de pouvoir les identifier, identifier quelle surface devait être dirigée vers le haut, et afin de pouvoir les orienter angulairement afin de garantir un réassemblage de tranches cylindriques le plus identique possible. Les marques sont visibles sur la figure IV-6a.



Figure IV-6 : a) 14 tranches d'un même cylindre de calcaire prélevé sur le 2^{ème} bloc ; b) imbibition de 1 cm d'eau sur la colonne de tranches réassemblées

IV.2.2 Mesures sur éprouvettes cylindriques

Afin de suivre l'état de saturation du matériau, un suivi de la masse de chaque tranche a été effectué après chaque phase d'imbibition. Les expérimentations sur tranches cylindriques étaient faites de telle manière que les tranches étaient imbibées avec la même quantité d'eau proportionnellement à la surface que celle pour les mesures acoustiques. Au moment de la mesure de masse, pour chaque état, les cylindres étaient désassemblés en tranches et chaque tranche était pesée afin d'établir sa saturation :

$$Sr = \frac{V_{eau}}{V_{vides}} \quad (IV-2)$$

$$V_{eau} = \frac{m_{tranche} - m_{sèche}}{\rho_{eau}} \quad (IV-3)$$

$$V_{vides} = \frac{m_{saturée} - m_{sèche}}{\rho_{eau}} \quad (IV-4)$$

où Sr représente la saturation, V_{eau} et V_{vides} représentent les volumes occupés par l'eau et les vides (eau + air) respectivement, $m_{tranche}$, $m_{sèche}$ et $m_{saturée}$ représentent les masses de l'échantillon au moment de la mesure, à un état sec et à un état saturé, et ρ_{eau} représente la masse volumique de l'eau.

Indépendamment des mesures de saturation, nous avons estimé la porosité pour chaque tranche en utilisant la formule :

$$Porosité = \frac{(m_{saturée} - m_{sèche}) / \rho_{eau}}{V_{total}} \quad (IV-5)$$

IV.2.3 Mesures non destructive à l'aide du scanner à ondes de surface hautes fréquences

Des mesures acoustiques ont été réalisées sur le premier bloc avec le scanner à ondes de surface à hautes fréquences.

Comme la profondeur de saturation supposée était de l'ordre de quelques centimètres, on a appliqué la même procédure que celle utilisée dans le Chapitre II (la recherche de la profondeur de lixiviation, voir Tableau II-2, paramètres du scanner) : les mesures ont été faites dans la bande fréquentielle [45 kHz – 250 kHz] en utilisant 3 sous-bandes fréquentielles.

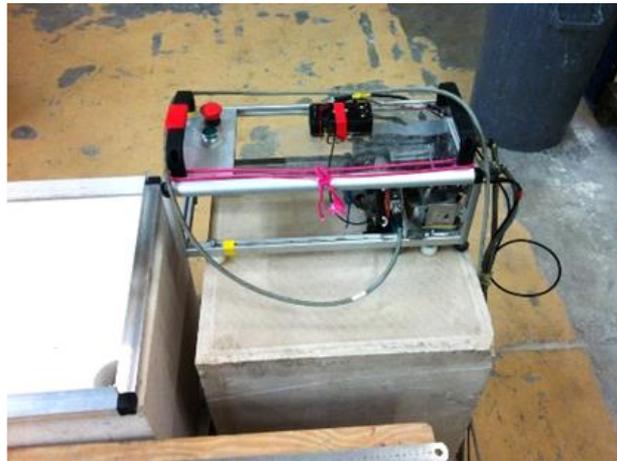


Figure IV-7 : Mesure avec le scanner acoustique sans contact après une phase d'imbibition

IV.2.4. Résultats obtenus

IV.2.4.1 Résultats à partir des tranches prélevées

Les résultats de saturation en fonction de la profondeur pour chaque étape d'imbibition sont présentés sur la figure IV-8. Cette figure nous donne la répartition de la saturation avec la profondeur, jusqu'à une dizaine de centimètres, mesurée par séchage et pesée. La saturation ne dépasse pas 70 % mais le contraste entre les mesures est suffisant pour évaluer l'avancement de la saturation.

On trouve une porosité constante ($\approx 18\%$) en fonction de la profondeur (figure IV-8a). La masse volumique et la saturation dans les conditions ambiantes sont respectivement 2160 kg/m^3 et $2,7\%$.

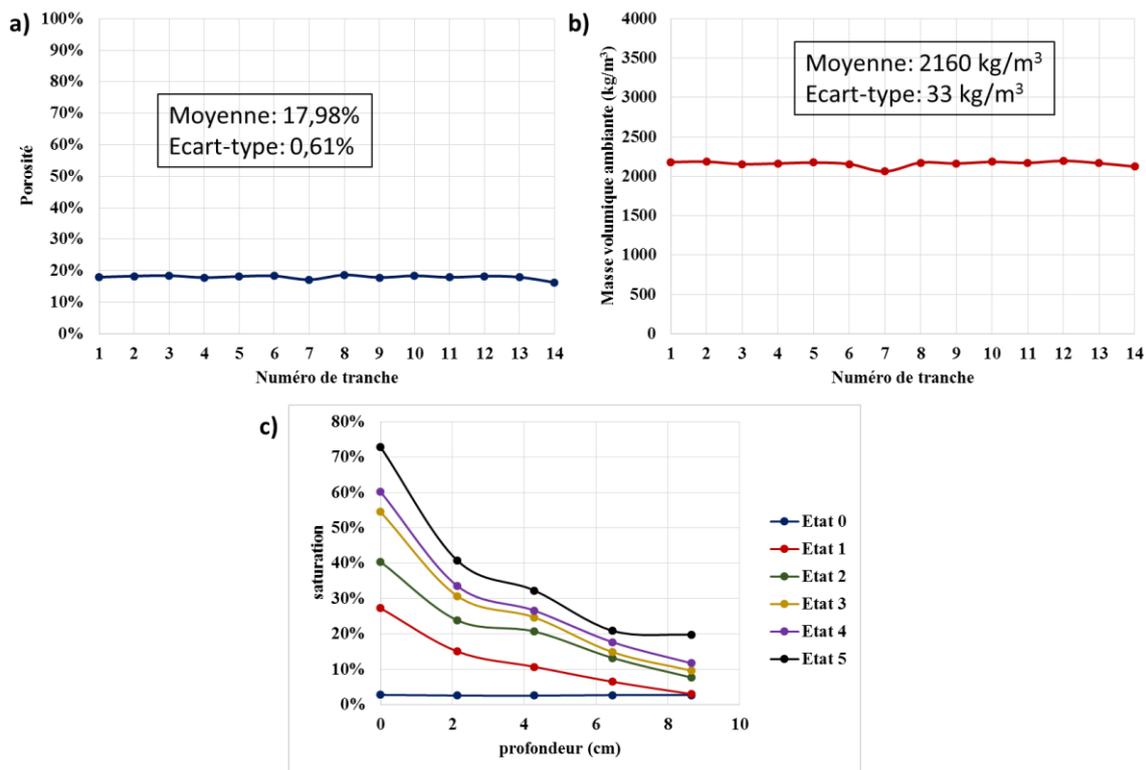


Figure IV-8 : Mesures initiales à l'état ambiant de a) la porosité et b) la masse volumique; c) variation de la saturation avec la profondeur pour différents états d'imbibition

IV.2.4.2 Résultats obtenus avec les méthodes acoustiques

À l'aide du scanner hautes fréquences

Les mesures de vitesses de phase $V_{ph}(f)$ à l'état zéro (dans la suite nous allons appeler cet état « sec », pourtant il s'agit de la saturation ambiante) et après chaque imbibition sont montrées sur la figure IV-9. L'analyse de la figure nous montre un grand contraste entre la partie à l'état sec et la partie comprenant les états saturés. La section (b) de cette figure présente V_{ph} en fonction de la longueur d'onde λ (voir équation (I-4)). Une telle présentation nous permet d'obtenir une information sur la profondeur de pénétration des ondes (pénétration $\approx \lambda$).

On constate que l'imbibition provoque 2 phénomènes : une chute de la vitesse de l'onde de surface, et un changement de pente de la courbe de dispersion. À l'état sec, la vitesse près de la surface est plus grande qu'en profondeur. Cela change à l'état saturé, c'est en profondeur que la vitesse devient plus faible (changement de pente de la caractéristique). Chaque imbibition consécutive provoque de moins en moins de changement. Ceci peut être dû au fait que la pénétration des ondes dans le matériau est de l'ordre de 6 à 8 cm, donc il est possible que les grandes différences de saturation sont à une profondeur plus grande et que l'onde ne pénètre pas assez pour les « voir ».

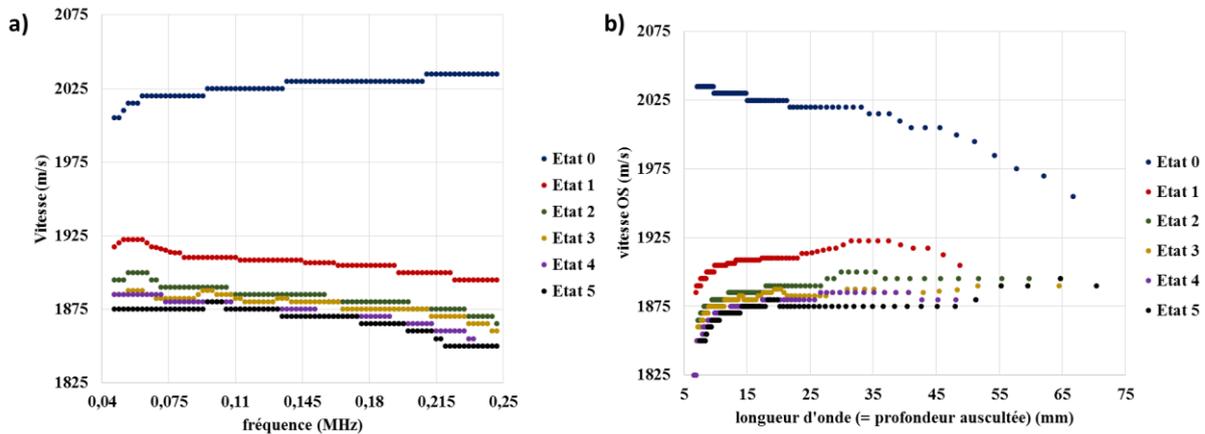


Figure IV-9: Résultats de dispersion des mesures acoustiques sur bloc calcaire en fonction de a) la fréquence et b) la longueur d'onde (donc en fonction de la pénétration de l'onde)

À l'aide de mesures par transmission

Parallèlement aux mesures faites avec le scanner, des mesures de vitesses longitudinales et transversales à l'état sec et saturé ainsi que la mesure du module de Young ont été effectuées. Les mesures de vitesse ont été réalisées par méthode « classique » de transmission en contact (cf. Fig. I-9) et les résultats sont présentés sur la figure IV-10. Ils s'accordent globalement avec les vitesses déjà présentées dans l'Annexe figure A.IV.2.4.2a. Leur analyse montre que le module est peu sensible à la saturation et diminue seulement de 1,7 % avec la saturation. De même, la vitesse longitudinale augmente légèrement (1,4 %) entre l'état sec et l'état saturé. En prenant en compte la figure IV-10c, on peut déduire que la vitesse transversale diminue avec la saturation de manière considérable (16 %). Cela est cohérent avec les résultats obtenus pour les ondes de surface, dont la vitesse diminue également avec la saturation, car la vitesse transversale est directement liée avec la vitesse des ondes de surface : elle vaut environ 1,1 fois la vitesse des ondes de surface (voir équation (I-12)).

On peut aussi en déduire que le coefficient de Poisson du calcaire augmente considérablement avec la saturation (V_p/V_s augmente avec la saturation ; voir figure IV-11). En prenant la formule (I-13) on retrouve qu'en effet, le coefficient de Poisson vaut 0,12 à l'état sec et 0,29 à l'état saturé, soit une augmentation de 140 %. Les valeurs obtenues sont indiquées sur la courbe de la figure IV-11 et elles s'accordent avec d'autres informations sur le calcaire présentées en Annexes figures A.IV.2.4.2a, A.IV.2.4.2b et A.IV.2.4.2c.

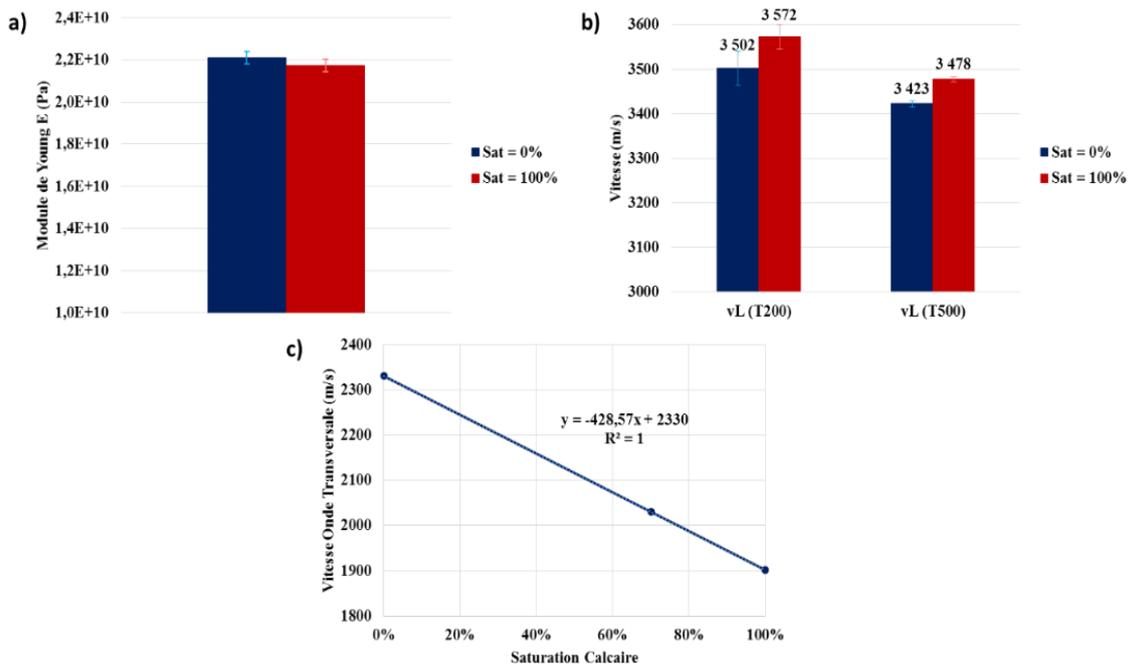


Figure IV-10 : Résultats de mesures sur matériau sec et saturé pour a) le module de Young, b) la vitesse longitudinale pour 2 fréquences différentes et c) la vitesse transversale

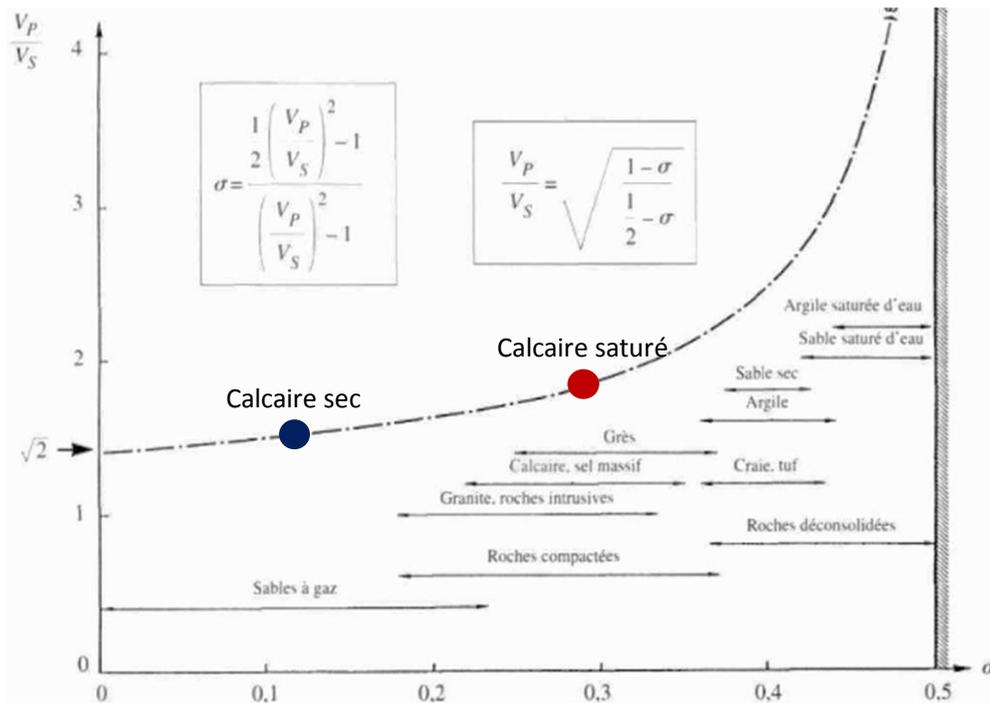


Figure IV-11 : Évolution du rapport entre la vitesse longitudinale et la vitesse transversale dans un matériau en fonction de son coefficient de Poisson [Mari et al – 1998] ; les points en couleurs indiquent les coefficients de Poisson (0,12 à l'état sec et 0,29 à l'état saturé) obtenus pour le calcaire examiné

Saturation en fonction de la profondeur : par inversion de $v_{ph}(f)$

L'inversion des courbes de dispersion a été effectuée selon la procédure décrite dans le chapitre II, en supposant que la vitesse longitudinale et la densité moyenne sont constantes et en utilisant les paramètres donnés dans le tableau IV-2. L'annexe figure A.IV.2.4.2d justifie cette supposition pour la vitesse longitudinale.

Tableau IV-2 : Paramètres du programme Cloud utilisé pour l'inversion

Nombre de couches N	Nombre d'itérations M	Nombre de solutions retenues K	$V_{L1...LN}$ m/s	$\rho_{L1...N}$ kg.m ⁻³	Seuil d'erreur %
7	50	20	3500	2200	0,1

Les résultats qui représentent la vitesse transversale en fonction de la profondeur sont montrés sur figure IV-12a (les résultats bruts avant le lissage avec les écart-types sont présentés en annexe figure A.IV.2.4.2e). Ils ont été obtenus en fixant un « misfit error » inférieur à 0,1 %. La moyenne et l'écart-type ont été obtenus à partir de K = 19 résultats qui remplissaient ce critère. Sur la section (a), on observe la variation des vitesses transversales (proportionnelles aux vitesses d'ondes de surface) en fonction de la profondeur. Les calculs ont été menés jusqu'à une profondeur de 9 cm, mais selon les conclusions présentées par Drelich et al [2018] (Eq. (II-12) et (II-13)), les résultats de l'inversion sont fiables jusqu'à une profondeur qui correspond à un tiers de la longueur d'onde la plus longue utilisée pour l'auscultation. Comme sur la caractéristique de dispersion, la longueur d'onde maximale exploitée est de l'ordre de 6 cm (voir figure IV-9), les résultats fiables sont dans un intervalle entre 0 et 2 cm. Notons cependant que les courbes obtenues suivent une évolution logique jusque 5 cm, ce qui nous informe que la saturation augmente de façon monotone (sauf pour le cas « sec »). Les parties moins fiables sont indiquées sur les figures par une surface grisée. Ces résultats confirment ceux obtenus sur les tranches.

Les résultats obtenus montrent qu'à l'état sec, il existe une couche de profondeur 2 cm dans laquelle la saturation diminue pour ensuite augmenter en fonction de la profondeur. Ces résultats ne coïncident pas avec la saturation des tranches à l'état sec (figure IV-8), mais il faut rappeler que le bloc de calcaire n'a pas été séché (car trop volumineux). Sa saturation de départ à la surface était alors égale à la saturation ambiante, et on ne peut pas exclure que sa saturation diminuait dans les deux premiers centimètres.

Pour les autres états de saturation, la vitesse transversale augmente avec la profondeur, donc la saturation diminue. Etant donné que l'on a disposé de mesures de vitesses transversales en fonction de saturation (figure IV-10), et étant donné le fait que cette relation vitesse/saturation est linéaire, il a été possible de convertir les vitesses d'ondes transversales en saturation, ce qui est présenté sur la section b ($Sat = \frac{2330 - V_S}{538,61}$). Notons que pour l'état sec, au niveau de la surface la saturation est de 20 %, ce qui ne s'accorde pas avec la saturation ambiante (2,7 %) car les tranches étaient séchées préalablement.

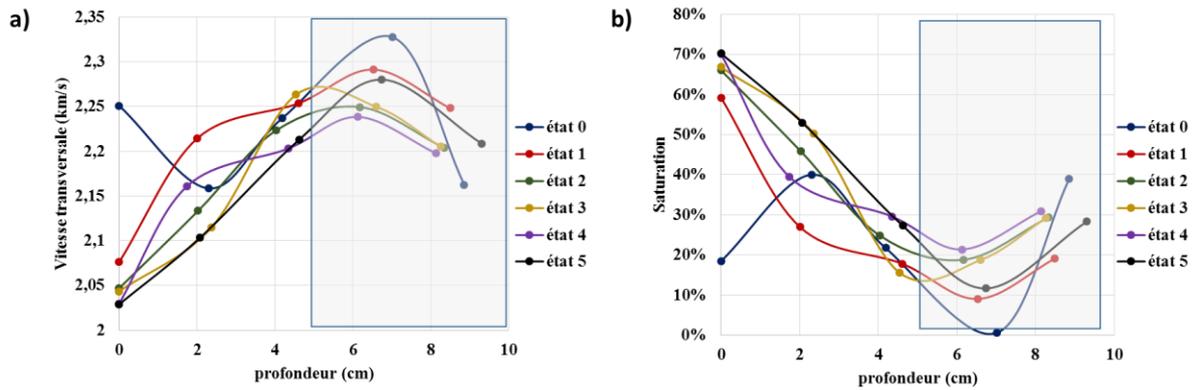


Figure IV-12 : a) Inversion des courbes de dispersion des ondes de surface : vitesse transversale en fonction de la profondeur b) conversion de la vitesse transversale en saturation, la partie grisée indique la zone moins fiable

Conclusion concernant le calcaire de Bourgogne

Les courbes de saturation obtenus par inversion suivent une évolution logique jusque 5 cm ce qui nous informe que la saturation augmente de façon monotone (sauf cas « sec »). Ces résultats corrélerent bien avec ceux obtenus sur les tranches.

On observe ainsi une grande sensibilité de la méthode quand on traduit la vitesse des ondes de surface en vitesse des ondes transversales à une profondeur donnée. Les résultats après calibration permettent de retrouver un profil de saturation assez cohérent dans la profondeur.

On peut remarquer que si on souhaite avoir une estimation de la saturation réelle, il est indispensable de calibrer la méthode. Il est alors montré que s'il y a une relation connue entre la vitesse V_s et la saturation, la technique d'ondes de surface associée à une méthode d'inversion permet d'évaluer le gradient de saturation.

En revanche, il est tout à fait possible, sans calibration (et pour ce matériau !) d'évaluer directement (ou d'estimer) à partir des courbes de dispersion une présence d'eau porale plus ou moins grande.

Il semble qu'à partir de la troisième imbibition, le front de saturation a dépassé la profondeur maximale atteinte par les ondes de surface. Il est donc envisageable de considérer des ondes de surface de plus basses fréquences (avec le scanner à ondes de surface basses fréquences) afin de pouvoir suivre ce front pendant une plus grande partie de sa progression.

Il se peut que la quantité d'eau ajoutée à chaque étape d'imbibition ait été trop grande, car dès la première imbibition, les deux premiers centimètres de calcaire étaient saturés. Une quantité d'eau plus faible pourrait permettre d'observer l'évolution de la saturation de manière plus fine.

Enfin, il faut noter que le matériau inspecté, le calcaire, a des propriétés particulières : le module d'élasticité E diminue avec la saturation alors que le coefficient de Poisson augmente de façon monotone avec la saturation (ce qui n'est pas le cas pour le béton).

D'un point de vue global, on a une vitesse transversale qui diminue avec la saturation, ce qui disqualifie une hypothèse qui pourrait être basée sur une vitesse d'onde plus élevée dans l'eau que dans l'air, ce qui est pourtant vrai pour l'onde longitudinale. On peut en revanche penser que cela pourrait être dû à un module d'Young qui diminue, soit à cause d'une fissuration (même si peu probable sur ce type de matériau), soit à cause d'un changement de propriétés intrinsèques des matériaux (dissolution de la calcite par exemple).

IV.3 Essais sur un mur d'essais en béton armé

IV.3.1 Présentation de l'ouvrage

La société EDF avait confié au laboratoire, il y a quelques années, la réalisation d'un mur de simulation destiné à évaluer la résistance de parois d'étanchéité disposées sur la surface du mur. L'intérieur du mur est équipé de diffuseurs de gaz dont le rôle est de reproduire le test d'épreuve décennal des enceintes de confinement de deuxième génération. Ce mur est composé de trois zones tests dont deux ont été utilisées pour tester des parois en BFUP (figure IV-8a). La troisième était disponible et ceci a permis de tester l'efficacité d'un arrosage périodique destiné à restaurer, au moins en partie, la perméabilité du béton saturé. La taille d'une zone de test est d'environ 2,40 m de largeur et de hauteur. La longueur totale du mur est ainsi de 7,40 m.

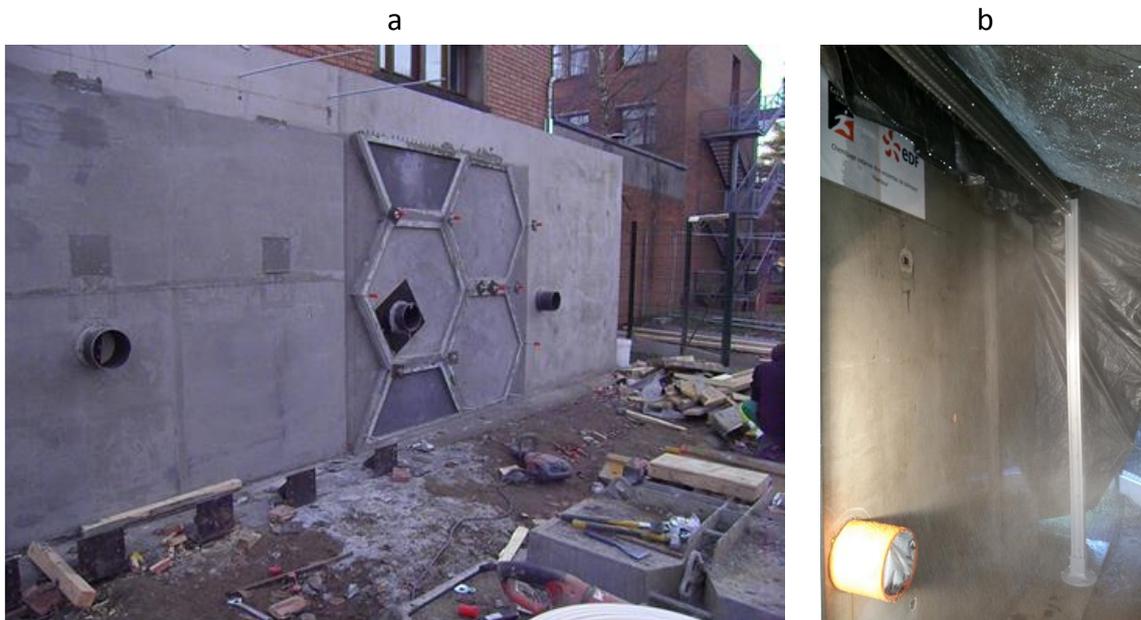


Figure IV-13 : a) Réalisation des parois d'étanchéité sur le mur. La zone de droite est disponible pour l'arrosage ; b) arrosage du mur (un brouillard d'eau est projeté sur le mur)

La figure IV-13b présente le dispositif d'arrosage qui est simplement constitué de petites buses en plastique. Elle permet une pulvérisation de fines gouttelettes dont on peut programmer la périodicité et la durée. En revanche il n'est pas possible de maîtriser la saturation regagnée par le mur, même si une estimation sur éprouvettes cylindriques a été faite (les résultats sont présentés figure IV-14). On peut voir sur la figure IV-14 que l'imbibition par arrosage permet de gagner très rapidement en saturation et qu'elle pénètre profondément dans le matériau. On supposera qu'il en est de même pour la saturation dans le mur dont l'épaisseur totale est de 500 mm. Il contient en revanche des diffuseurs de gaz de grande taille, situés à une profondeur de 100 mm dans le mur. Ces diffuseurs peuvent perturber les mesures acoustiques qui ont de ce fait été réalisées jusqu'à 50 mm de profondeur à l'aide du scanner HF.

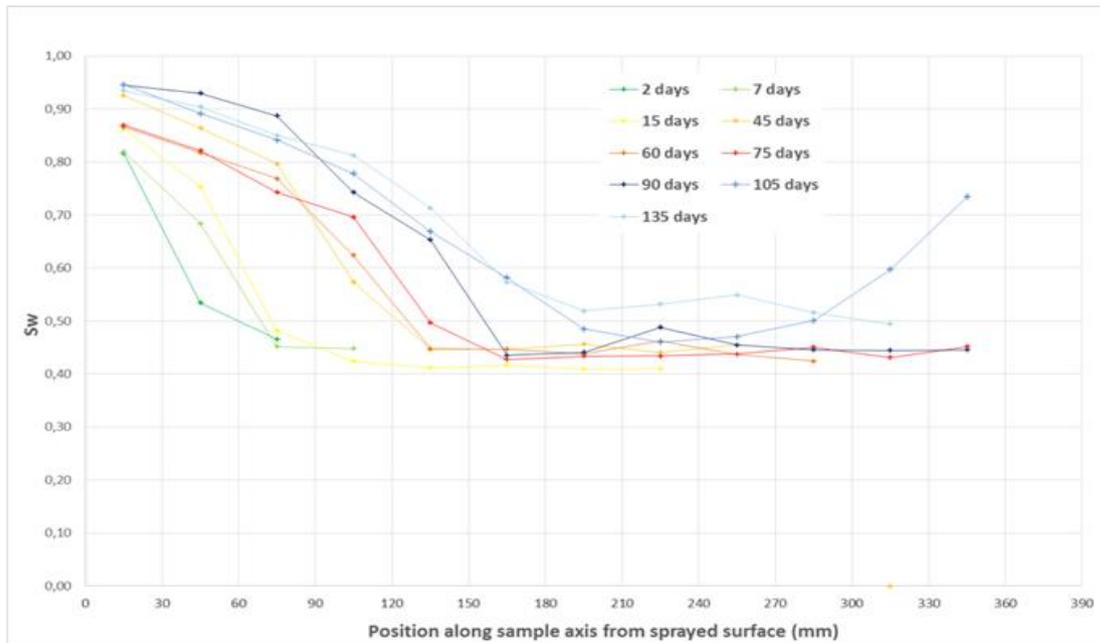


Figure IV-14 : Progression de la saturation dans des cylindres du même béton qui a servi pour la construction du mur, soumis à pulvérisation d'eau (comme pour le mur)

IV.3.2 Mesures acoustiques

Le mur a été soumis à 5 cycles d'arrosages, pendant une durée de 1 minute par heure, et espacés selon le tableau IV-3. Cela doit permettre d'après les essais sur cylindres (figure IV-14) de regagner une grande part de la saturation. Les mesures de courbes de dispersion ont été effectuées avec le scanner HF après chaque étape d'arrosage selon la même procédure que celle utilisée sur le bloc de calcaire. La figure IV-15 montre la mise en place du scanner. La zone auscultée avait une forme rectangulaire de 2,4 x 2,2 m², répartie en 9 mailles de A1 à C3, (voir figure IV-15d). Dans chaque maille, 5 profils de mesure étaient mesurés dans 3 zones fréquentielles. Toutes les courbes de dispersion obtenues ont été moyennées sur toute la surface.

Tableau IV-3 : Chronologie des mesures acoustiques sur le mur d'essai

Temps	Etat
$t = t_0$	Mesure de « Arrosage 0 »
$t_1 = t_0 + 10 \text{ jours}$	Mesure de « Arrosage 1 »
$t_2 = t_1 + 7 \text{ jours}$	Mesure de « Arrosage 2 »
$t_3 = t_2 + 12 \text{ jours}$	Mesure de « Arrosage 3 »
$t_4 = t_3 + 9 \text{ jours}$	Mesure de « Arrosage 4 »
$t_5 = t_4 + 12 \text{ jours}$	Mesure de « Arrosage 5 »

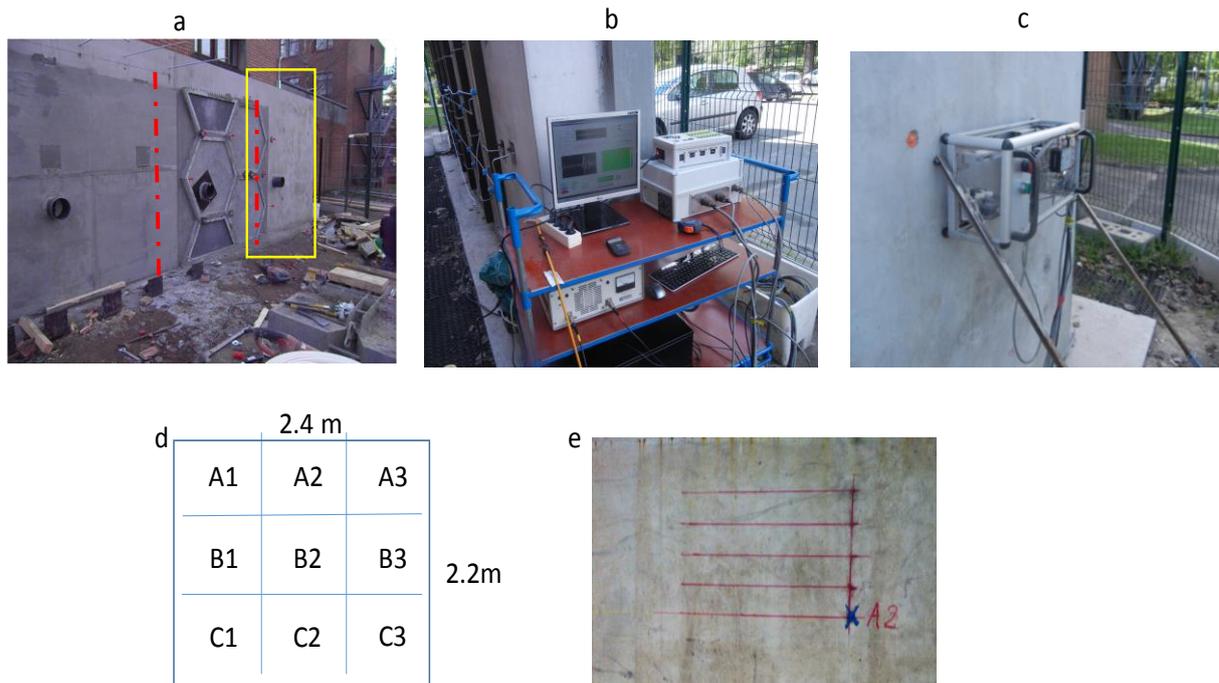


Figure IV-15 : Dispositif de mesures avec le scanner acoustique sans contact sur mur d'essai : (a) section de mur sélectionnée pour les essais acoustiques ; (b) matériel nécessaire à la mesure avec le scanner HF ; (c) scanner HF effectuant une mesure sur le mur d'essai ; (d) maillage de la section du mur pour les mesures acoustiques ; (e) maille A2 avec les 5 profils de mesure tracés

IV.3.3 Résultats

Cette procédure de mesure donne finalement 6 courbes de dispersion (moyenne pour le mur entier) : un état 0 et 5 arrosages.

La figure IV-16 donne une synthèse des vitesses de phase pour les arrosages 1 et 5 qui ont été mesurées dans l'intervalle de fréquence 35 – 250 kHz, dans toutes les mailles.

On peut y apercevoir que la vitesse diminue régulièrement avec la fréquence (donc augmente avec la profondeur). On observe également de grandes différences entre les mailles, que l'on peut expliquer par la non-homogénéité du béton, la non-régularité des arrosages, par le fait que l'eau coule sur le mur, par le changement de température et de l'humidité relative etc... Afin de donner une analyse concise, il a été décidé par la suite de n'interpréter que la caractéristique moyenne pour toutes les mailles.

La figure IV-17 est une synthèse des vitesses de phase moyennes pour toutes les mailles qui ont été mesurées dans l'intervalle de fréquence 35 kHz – 250 kHz. Elles sont également données en fonction de la longueur d'onde λ , qui est considérée comme étant la profondeur d'investigation dans le mur (10 à 60 mm, figure IV-17b).

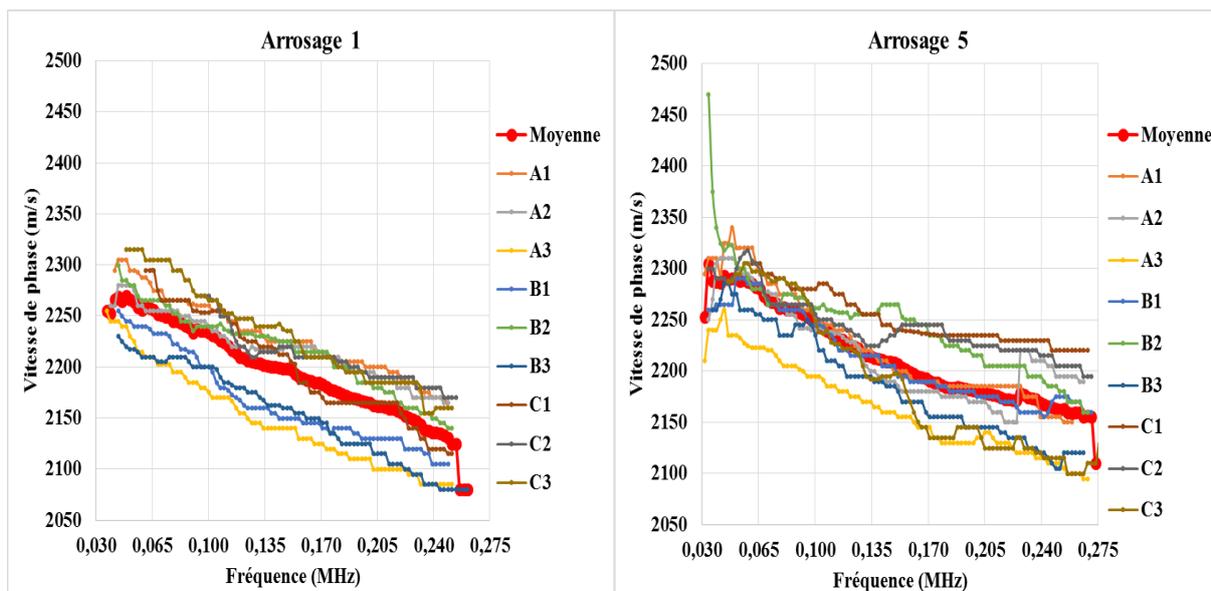


Figure IV-16 : Variation des vitesses de phase en fonction de la maille pour les arrosages 1 et 5

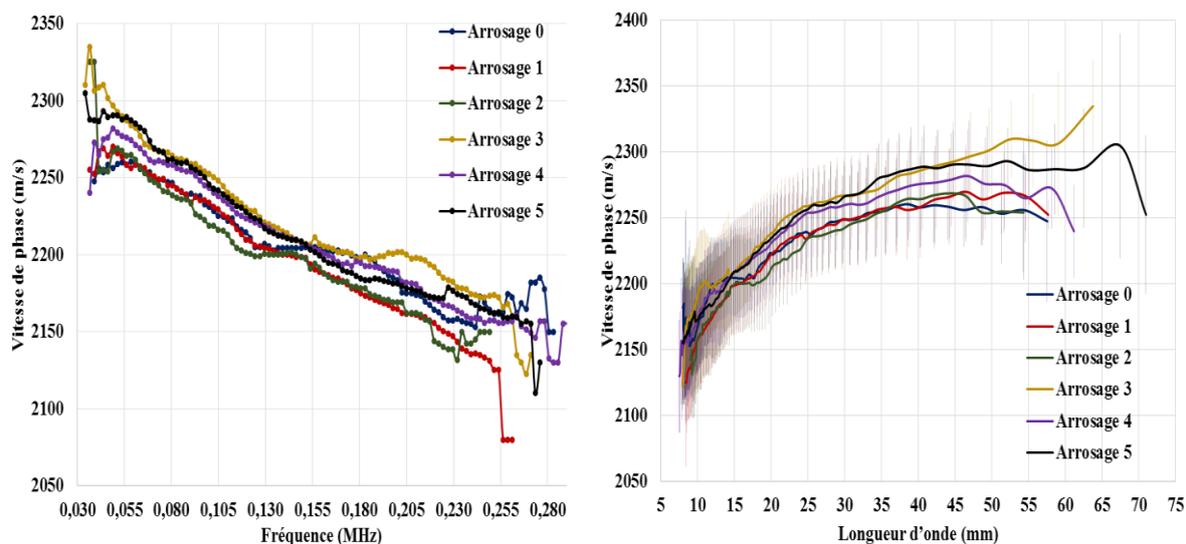


Figure IV-17 : Variation des vitesses de phase avec le nombre d'arrosages, en fonction de a) la fréquence et b) la longueur d'onde (donc la profondeur de la pénétration)

On peut remarquer qu'à l'état initial (état 0), la vitesse croît régulièrement avec la profondeur pour sembler se stabiliser au-delà de 50 mm. Ce point particulier peut être attribué à une micro (voire parfois macro) fissuration qui va nécessairement déboucher sur un module d'Young plus faible. La photo de la figure IV-19 montre clairement cette présence de fissures, qui était d'ailleurs recherchée pour augmenter la perméabilité du mur devant les diffuseurs de gaz. La profondeur de ces fissures n'est pas connue avec précision mais ce que l'on observe sur les vitesses permet de penser qu'elle est au moins de l'ordre du centimètre. L'augmentation des vitesses avec la profondeur peut être interprétée par l'influence de la fissuration qui doit s'atténuer et demeurer concentrée à la surface du mur et/ou sur une faible profondeur. De là on

peut remarquer une influence relativement faible (au vu des écart-types qui sont grands) des arrosages sur la vitesse de phase dans la profondeur de 0 à 1 cm et il est très probable que l'état de fissuration soit tel qu'il masque un potentiel effet de la teneur en eau sur les vitesses.

Effet des arrosages

L'examen de la figure IV-17 montre que les arrosages 1 et 2 n'ont en fait pas d'influence significative. Si on part du principe (optimiste) que ce type de mesure est sensible à la variation de saturation, comme on l'a vu sans ambiguïté sur le calcaire, il faut alors en déduire que ces deux premiers arrosages n'ont pas eu d'effet significatif sur cette même saturation. Cela peut s'expliquer par une imbibition en masse très rapide et donc par une saturation moyenne qui n'a pas beaucoup augmenté et/ou par un manque de sensibilité de la méthode aux faibles variations de celle-ci. Ce n'est ensuite qu'aux arrosages 3, 4 et 5 qu'il y a une tendance à l'augmentation de la vitesse moyenne (tendance claire bien que les écart-types soient élevés). Il faut cependant souligner qu'on a, avec le nombre d'arrosages, soit une augmentation aux profondeurs intermédiaires, soit une stabilisation aux plus grandes profondeurs. Si on s'en tient aux seuls effets de la saturation, ceci signifierait qu'elle continue à croître aux profondeurs intermédiaires mais qu'ensuite elle se stabilise (un état d'équilibre serait vite atteint suite à l'imbibition dans des profondeurs plus grandes). La présence d'une re-saturation significative a, en parallèle, été confirmée par une perméabilité au gaz, pour l'ensemble de la paroi, qui a fortement diminué de plus de 70 % ([Liu et al – 2013]).

De plus, il faut signaler que les variations de vitesse sont du même ordre de grandeur que l'écart-type de mesure. Cela pourrait expliquer certaines irrégularités observées sur les courbes. Autrement dit, on s'attendrait à ce que la vitesse, pour une fréquence fixée, augmente de manière monotone en fonction de nombre d'arrosage. Comme le montre la Figure IV-18, cette relation n'est pas monotone (malgré le fait qu'elle suive une tendance croissante). Cela pourrait suggérer que chaque arrosage avait une « efficacité » différente sur la saturation, comme le troisième arrosage qui avait donné plus d'effets alors que le deuxième avait donné le moins d'effets. Cela augmente l'incertitude sur les mesures.

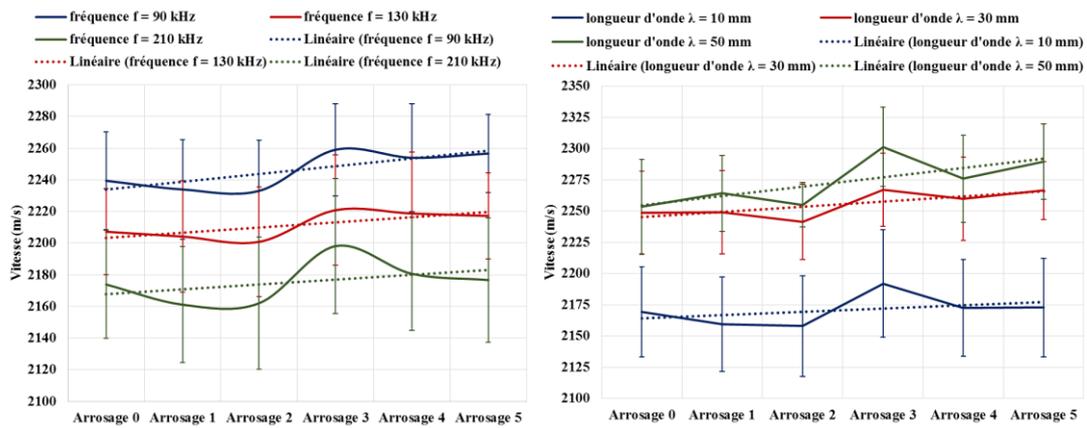


Figure IV-18 : Vitesse des ondes de surface [gauche] pour une fréquence fixée (90 kHz, 130 kHz et 210 kHz) et [droite] pour une longueur d'onde (sur une profondeur) donnée (10 mm, 30 mm et 50 mm) en fonction de nombre d'arrosages

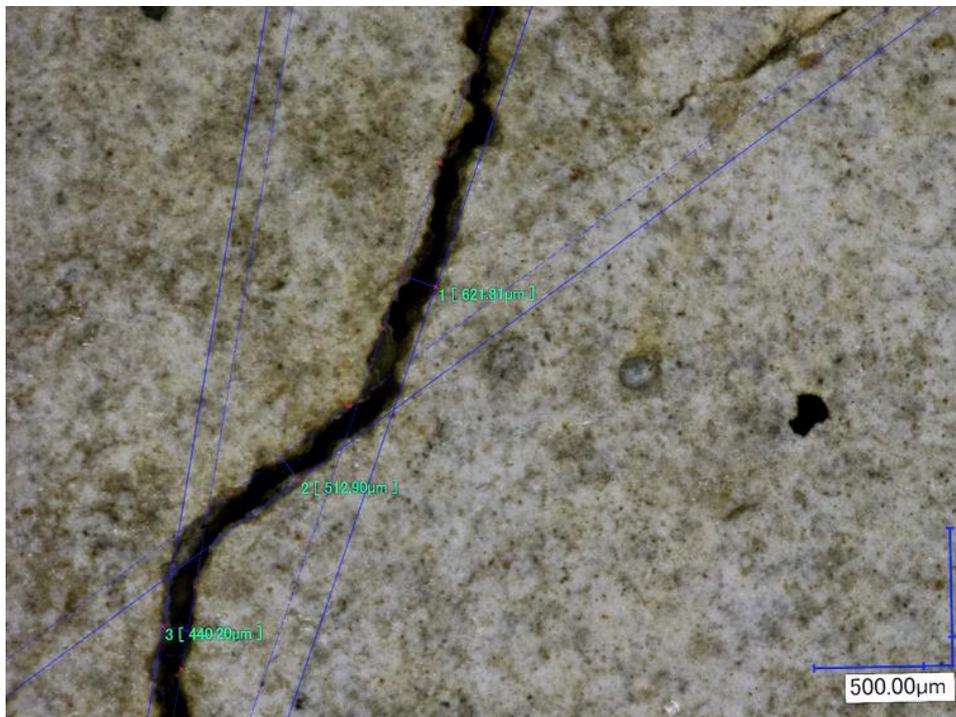


Figure IV-19 : Photographie au microscope Keyence d'une zone fissurée sur le mur ausculté

En outre, il est très intéressant de comparer ces résultats avec ceux obtenus sur le calcaire car on observe deux effets inverses de l'imbibition : la vitesse diminue pour le calcaire (16 %) et elle augmente (dans une moindre mesure, 6 %) pour le béton quand la saturation augmente. Cela est confirmé par les mesures de vitesses de phase des ondes de surface effectuées pour une fréquence proche de 100 kHz sur des dalles de béton, en fonction de la teneur en eau (en utilisant le même scanner HF) [Abraham et al – 2012] présentées sur la Figure IV.20. En effet, puisque la vitesse dans le mur arrosé augmente avec la saturation, on peut en conclure qu'on se trouve sur la partie de la caractéristique avec une teneur en eau $W > 5\%$ où la vitesse augmente avec la teneur en eau (donc avec la saturation). Ce constat est tout à fait justifié car la teneur en eau d'un mur selon les conditions atmosphériques ambiantes est toujours supérieure à 5%.

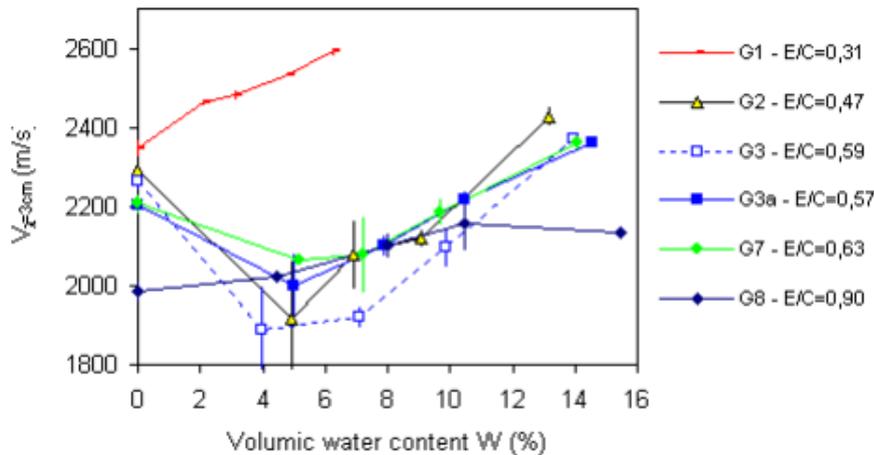


Figure IV-20 : Vitesse des ondes de surface en fonction de la teneur en eau pour différentes compositions de béton (différents rapports E/C), d'après Abraham et al [2012]

Il est à ce stade difficile de conclure mais d'un point de vue poromécanique, pour un matériau saturé, on a la possibilité d'introduire deux modules d'Young : E_b qui est le module drainé (i.e. la pression de pore est constante) et E_u qui est le module non drainé (la masse interne de fluide est constante). Il est vraisemblable que pour le calcaire ce soit E_b qui est la bonne propriété car ce matériau est très perméable. En revanche pour le béton c'est plutôt E_u qui serait pertinent car le matériau est peu perméable et il est possible qu'on ait des surpressions de fluide pendant le passage des ondes. Pour un même matériau E_u est plus grand que E_b , on pourrait donc justifier par là une certaine augmentation de vitesse mais en l'absence de mesures complémentaires, c'est difficile à étayer. Et cela n'explique en rien la baisse de vitesse pour le calcaire car son module drainé ne varie pas (ou pas significativement). Tout ceci renforce les remarques initiales sur les effets multiples engendrés par la saturation-désaturation et le caractère (manifestement) non systématique qu'aura un changement d'état hydrique du matériau sur la propagation des ondes de surface dans un milieu poreux complexe tel le béton.

L'inversion des courbes de dispersion

L'inversion des vitesses de phase, effectuée selon la même procédure que celle utilisée pour le calcaire, donne la répartition des vitesses transversales en fonction de la profondeur et de la phase d'arrosage. Le résultat est présenté sur la figure IV-21 (les résultats bruts pour la maille A1 sont présentés en Annexe figure A.IV.3.3). Comme sur la caractéristique de dispersion, la longueur d'onde maximale exploitée est de l'ordre de 6 cm, les résultats fiables sont donc dans un intervalle entre 0 et 2 cm. Notons cependant que les courbes obtenues suivent l'évolution attendue jusque 3 cm. Les parties moins fiables sont indiquées sur les figures par une surface grisée. On a un accroissement de la vitesse transversale dans les 10 premiers millimètres. On peut ensuite considérer que l'on se situe sur un plateau sur lequel il n'est pas possible de

distinguer un effet net du nombre d'arrosage (donc de la saturation). Contrairement au calcaire, il n'existe à priori aucun moyen d'extraire de ces résultats une information fiable sur la saturation du matériau. Cependant, l'inversion des résultats peut être convertie en saturation en utilisant la courbe de la figure IV-20 pour laquelle le rapport E/C vaut 0,6, (donc le béton du mur examiné) et en se servant de la relation $V_s = 1,1 \times V_{os}$ (voir équation (I-12)). Cela permet d'affiner l'interprétation. Les résultats de la saturation en fonction de la profondeur sont présentés sur la figure IV-21b.

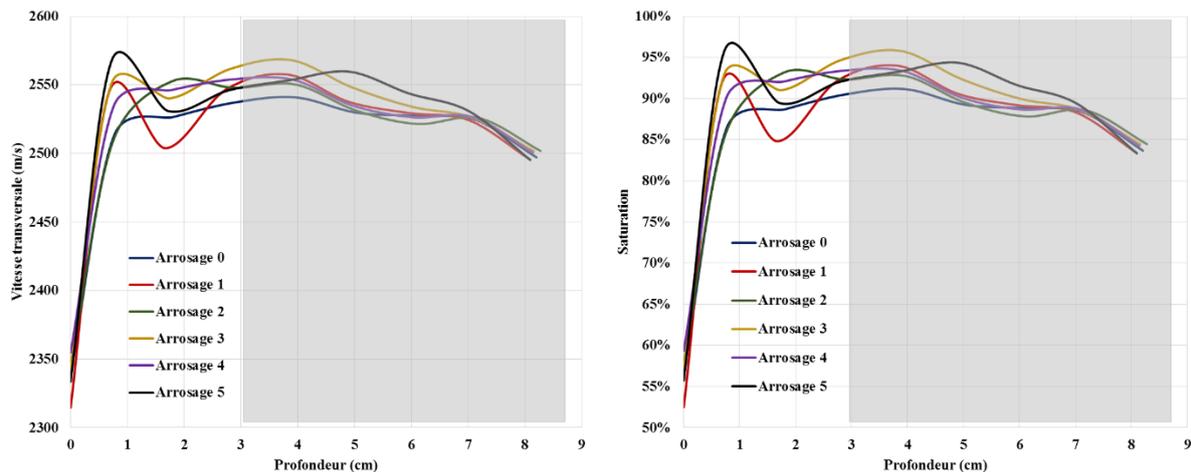


Figure IV-21 : Résultats obtenus a) après inversion sur les vitesses et b) après conversion de la vitesse transversale en saturation

Conclusions concernant le béton

A partir des comparaisons de $V_{ph}(\lambda)$ en fonction du nombre d'arrosage (Fig. IV-17), on pourrait en déduire que le front de saturation s'arrête à 5 cm de profondeur (la courbe atteint un plateau).

Pourtant par inversion le résultat est différent et indique un front de saturation sur 1 cm. Cette différence est difficile à expliquer car le programme d'inversion a prouvé sa précision dans le cas du calcaire, et a été de plus intensivement validé sur les bétons multicouches [Drelich et al – 2018]. On pourrait supposer que l'écart-type relativement grand de $V_{ph}(f)$ gêne l'inversion mais toutes les courbes obtenues suivent l'évolution attendue.

Il est possible aussi que la présence de fissuration diminue la vitesse et masque ainsi en grande partie les effets de la re-saturation (qui devrait faire augmenter la vitesse). En effet l'expérimentation sur le même mur effectué à l'occasion de tests du scanner BF (Chapitre V) nous a permis de supposer que sur de plus grandes profondeurs, le même mur affiche une saturation qui diminue avec la profondeur. Il est donc possible que les résultats d'inversion pour $d > 3$ cm sont corrects et témoignent d'une diminution progressive de la saturation à partir 3 cm.

IV.4 Conclusions

Cette campagne d'essais sur deux matériaux, un calcaire perméable, poreux et homogène et un béton de structure, fissuré, hétérogène par constitution, a donné des résultats contradictoires sur les effets de la saturation. Il paraît avéré que pour le calcaire, l'augmentation de saturation en eau déclenche une diminution de la vitesse des ondes de surface et qu'on observe un effet contraire sur le béton. Les effets de la saturation sur le calcaire sont bien marqués et moyennant quelques essais de calibration supplémentaires, il est vraisemblable que la méthode acoustique permettrait, via la dispersion de vitesse des ondes de surface, d'obtenir une répartition de la saturation avec la profondeur – si la relation $V_s = f(\text{saturation})$ est connue.

Le problème paraît beaucoup plus complexe sur le béton pour lequel la présence de fissuration masque en grande partie les effets de la re-saturation. C'est du moins notre hypothèse. Au premier ordre et malgré une grande dispersion des résultats, l'augmentation de la teneur en eau induit une augmentation de la vitesse.

De plus pour le béton, les variations de vitesse en fonction de l'étape d'arrosage sont de l'ordre de 6 %. Elles sont donc plus faibles que pour le calcaire (16 %). Finalement, on se trouve dans la situation où les variations de vitesse sont du même ordre de grandeur que l'écart-type des mesures. Cela pourrait expliquer la non-régularité des courbes et aussi les difficultés d'obtenir une inversion précise, car cette opération nécessite des données de hautes qualités. C'est pour cela que les techniques d'inversion ne permettent pas pour l'instant de déboucher sur une possibilité d'évaluation précise de la saturation de béton. Des conclusions similaires ont été déduites de la thèse de Vincent Métais [2016]. On peut supposer que l'on pourrait affiner un peu la méthode par un important travail en amont de calibration en laboratoire, ce qui permettra de passer de l'éprouvette à la structure.

En perspective, étant donné qu'à partir de la troisième imbibition du mur en béton, le front de saturation a dépassé la profondeur maximale atteinte par les ondes de surface, il serait intéressant de refaire les mesures à l'aide du scanner BF afin de pouvoir suivre ce front sur une plus grande profondeur, donc pendant une plus grande partie de sa progression.

Annexes Chapitre IV

Nature des terrains	Vitesse P (m/s)	Vitesse S (m/s)	Masse volumique (g/cm ³)	Masse volumique du cristal constitutif (g/cm ³)
Éboulis, terre végétale	300-700	100-300	1,7-2,4	—
Sables secs	400-1 200	100-500	1,5-1,7	Quartz 2,65
Sables humides	1 500-2 000	400-600	1,9-2,1	Quartz 2,65
Argiles saturées	1 100-2 500	200-800	2,0-2,4	—
Marnes	2 000-3 000	750-1 500	2,1-2,6	—
Série argilo-gréseuse saturée	1 500-2 200	500-750	2,1-2,4	—
Grès poreux et saturés	2 000-3 500	800-1 800	2,1-2,4	Quartz 2,65
Calcaires	3 500-6 000	2 000-3 300	2,4-2,7	Calcite 2,71
Craie	2 300-2 600	1 100-1 300	1,8-2,3	Calcite 2,71
Sel	4 500-5 500	2 500-3 100	2,1-2,3	Halite 2,1
Anhydrite	4 000-5 500	2 200-3 100	2,9-3	—
Dolomie	3 500-6 500	1 900-3 600	2,5-2,9	(Ca, Mg)CO ₃ 2,8-2,99
Granite	4 500-6 000	2 500-3 300	2,5-2,7	—
Basalte	5 000-6 000	2 800-3 400	2,7-3,1	—
Gneiss	4 400-5 200	2 700-3 200	2,5-2,7	—
Charbon	2 200-2 700	1 000-1 400	1,3-1,8	—
Eau	1 450-1 500	—	1	—
Glace	3 400-3 800	1 700-1 900	0,9	—
Huile	1 200-1 250	—	0,6-0,9	—

Figure A.IV.2.4.2a : Exemples de vitesse et densité pour différentes roches [Mari et al – 1998]

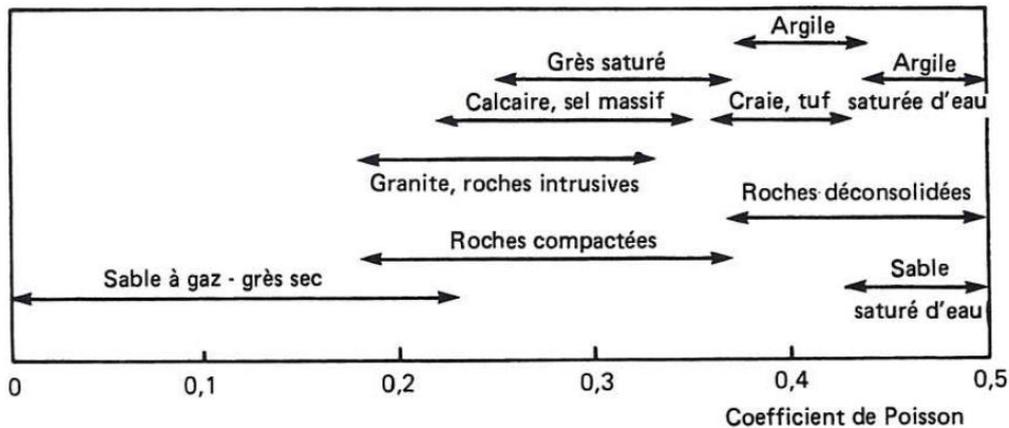


Figure A.IV.2.4.2b : Ordre de grandeur du coefficient de Poisson pour différents types de roche (d'après Lavergne, 1986) [Mari et al – 1998]

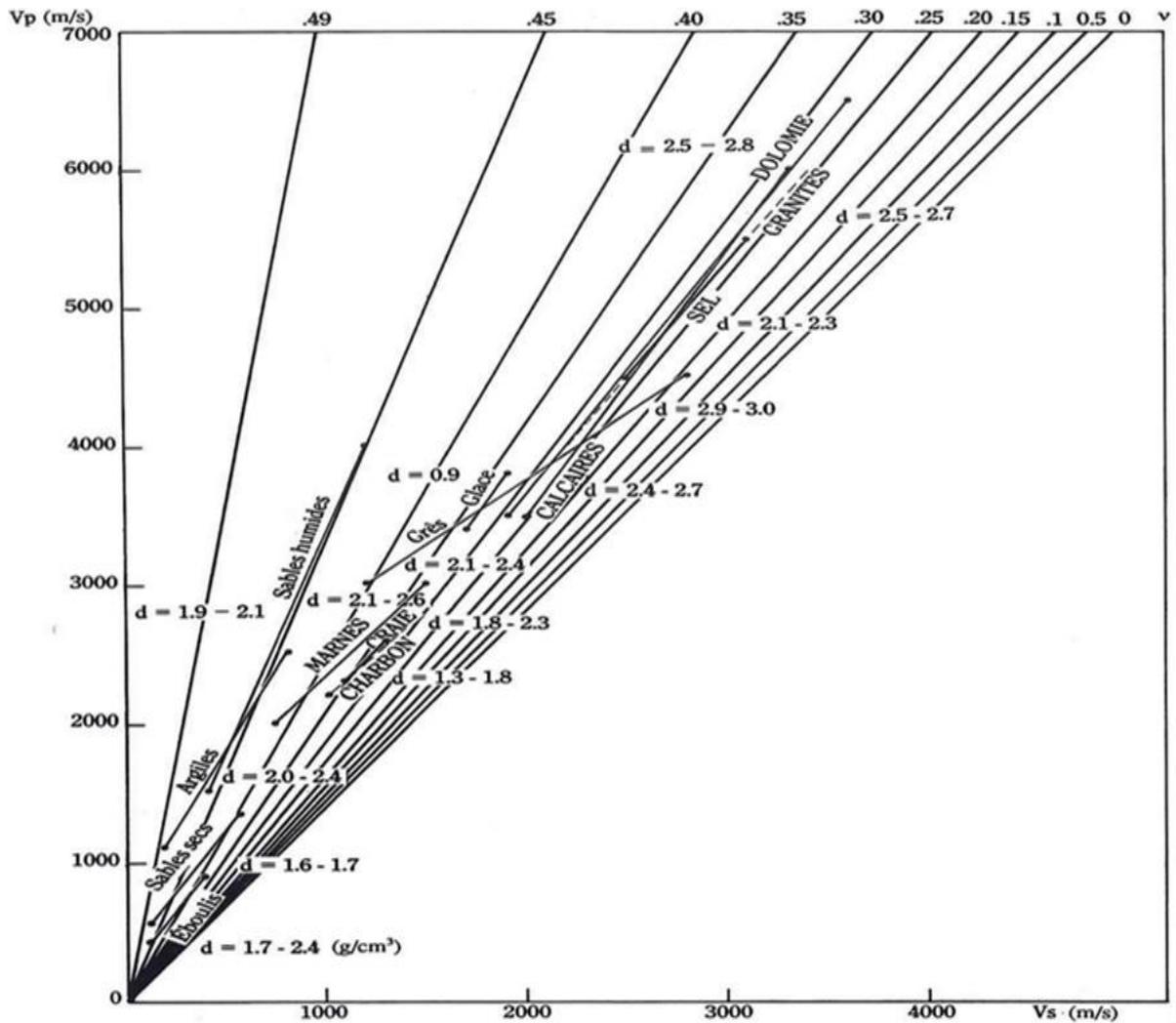


Figure A.IV.2.4.2c : Ordres de grandeur du coefficient de Poisson en fonction de V_P et V_S exprimées en m/s. La densité est notée d. [Mari et al – 1998]

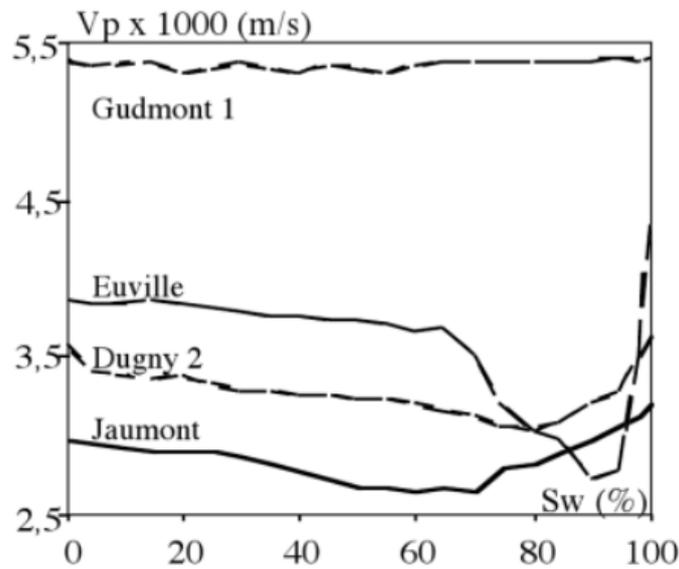


Figure A.IV.2.4.2d : Évolution de la vitesse des ondes P avec le degré de saturation dans différents calcaires [Berest et al – 2000]

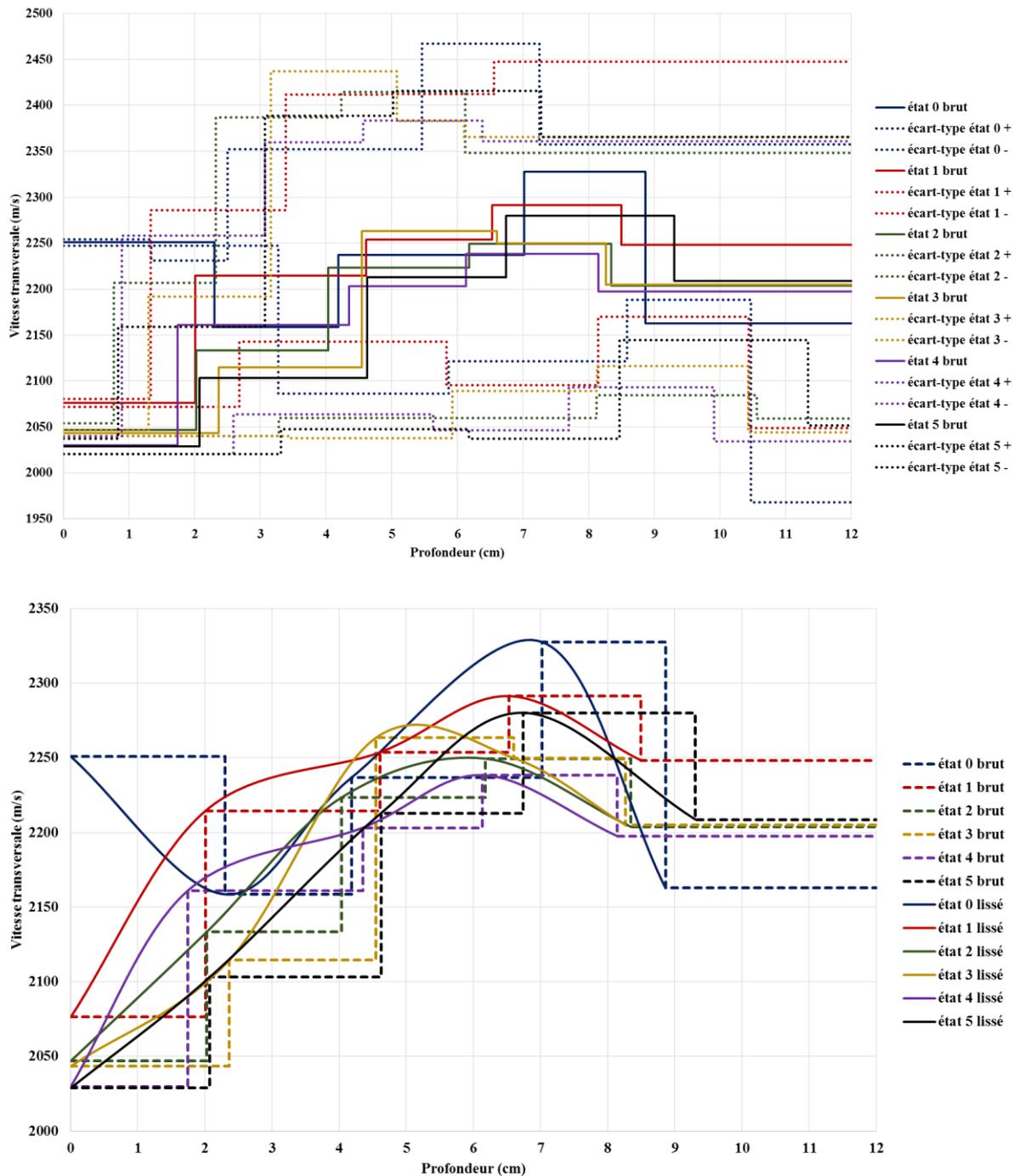


Figure A.IV.2.4.2e : Résultats de l'inversion des courbes de dispersion de vitesse pour chaque étape d'imbibition du bloc calcaire : [haut] chaque courbe brute avec ses écart-types ; [bas] chaque courbe brute avec la courbe lissée associée

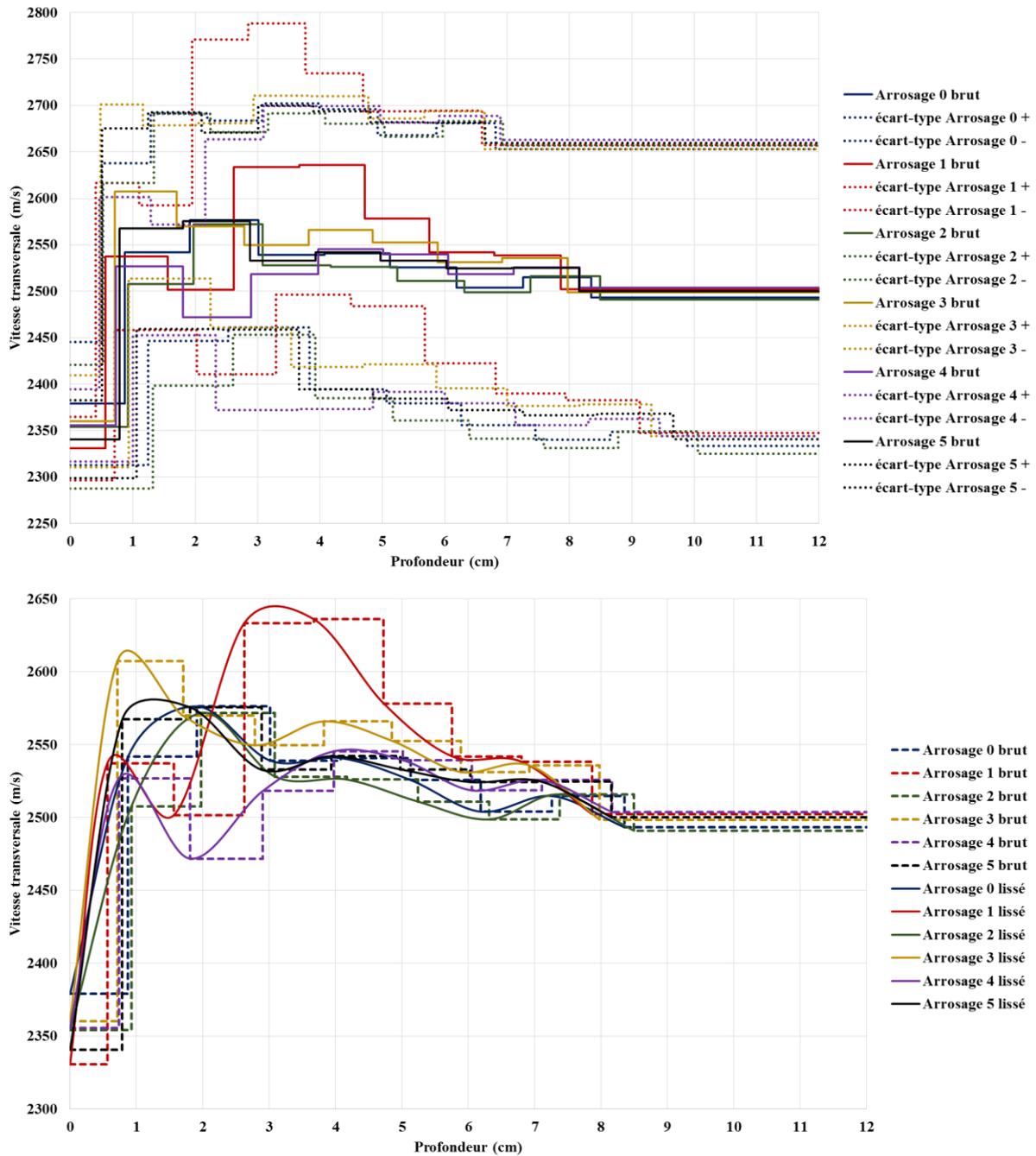


Figure A.IV.3.3 : Résultats de l'inversion des courbes de dispersion de vitesse pour chaque étape d'arrosage du mur d'essai : [haut] chaque courbe brute avec ses écart-types ; [bas] chaque courbe brute avec la courbe lissée associée

Références bibliographiques Chapitre IV

[Abraham et al – 2012] O. ABRAHAM, B. PIWAKOWSKI, G. VILLAIN, Non-contact, automated surface wave measurements for the mechanical characterisation of concrete, *Construction and Building Materials*, 2012.

[Berest et al – 2000] P. BEREST, P. HABIB, J.-P. SARDA et G. VOUILLE, Manuel de mécanique des roches. Volume 1, Comité français de mécanique des roches, Presse des Mines, juin 2000.

[Brue – 2009] F. BRUE, Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydro-mécanique des bétons, Ecole Centrale de Lille, Octobre 2009.

[Drelich et al – 2018] R. DRELICH, M. KACZMAREK et B. PIWAKOWSKI, Accuracy of parameter identification using the dispersion of surface waves and the role of data quality for inhomogeneous concrete, *NDT and E International* (2018), doi:10.1016/j.ndteint.2018.05.002.

[Lion – 2008] M. LION, Influence de la température sur le comportement poromécanique ou hydraulique d'une roche carbonatée et d'un mortier ; Etudes expérimentales, Université de Lille, mai 2008.

[Liu et al – 2013] J. LIU, F. AGOSTINI et F. SKOCZYLAS, From relative gas permeability to in situ saturation measurements, *Construction and Building Materials*, Volume 13, Pages 882 – 890, 2013.

[Mari et al – 1998] J.-L. MARI, G. ARENS, D. CHAPPELLIER et P. GAUDIANI, Géophysique de gisement et de génie civil, Editions Technip, 1998, ISBN : 978271087278.

[Métais – 2016] V. METAIS, Auscultation avec les ondes de surface de matériaux très hétérogènes, IFSTTAR Nantes, mars 2016.

[Yurtdas – 2003] I. YURTDAS, Couplage entre le comportement mécanique et la dessiccation des matériaux à matrice cimentaire : étude expérimentale sur mortier, Université de Lille, 2003.

Chapitre V

Détection d'une fissure ou une zone microfissurée

V.1 Introduction

V.1.1 Prise du béton et causes de fissures

Le béton possède une résistance à la compression nettement supérieure à sa résistance à la traction (elle est au minimum 10 fois supérieure). Cela justifie l'association du béton avec un matériau qui possède une très grande résistance en traction (comparativement à celle du béton) : l'acier. Le béton armé supporte alors aussi bien les charges de compression que les charges de traction. Cependant, de nombreux phénomènes physicochimiques induisent le retrait du béton au cours de sa prise. Si le retrait n'est pas empêché, sa valeur générique est de $600 \mu\text{m/m}$ [Parmentier et al – 2009]. Or, ce retrait étant empêché par les armatures d'acier, des efforts de traction peuvent apparaître à la surface du béton, ce qui crée des fissures et des microfissures (fissures dont la largeur est inférieure à $200 \mu\text{m}$).

Lorsque le béton est coulé, une sédimentation de ses constituants va se produire. Les éléments les plus lourds comme les gros granulats vont lentement descendre par gravité, et de l'eau va remonter en surface et former une pellicule. Cette sédimentation et ce ressuage d'eau constitue l'une des différentes causes du retrait du béton. Lors de la prise du béton, si celui-ci ne bénéficie pas d'une cure humide, un séchage par évaporation de son eau peut se manifester, provoquant des dépressions capillaires dans les pores du béton, et conduisant à son retrait.

Comme la prise du béton est une réaction exothermique, le béton va également subir un retrait dit thermique lors de son refroidissement. Ce phénomène est d'autant plus impactant lorsque les volumes de béton considérés sont importants, car l'élévation de température dans la masse peut être bien plus grande qu'en surface, ce qui crée un gradient thermique entre le cœur et la peau du béton, entraînant des contraintes de traction en surface [Klemczak – 2014].

Il existe également un retrait chimique dû à la contraction Le Chatelier lors de la prise du béton : le volume des produits de la réaction (les hydrates) est inférieur au volume des réactifs (l'eau et le ciment anhydre).

Sur une structure de béton en service, ces défauts dus au retrait peuvent être visibles à l'œil nu (fissures) ou invisibles (microfissures). Quoi qu'il en soit, les surfaces sollicitées font régulièrement l'objet de contrôle afin de prévenir leur dégradation. Comme indiqué au chapitre I, il existe peu de techniques permettant de caractériser les fissures. La plupart consistent à effectuer des mesures optiques en plaçant un microscope sur la zone la plus ouverte de la fissure (voir figure V-1[gauche]), mesurer son ouverture et suivre son évolution, ou à placer des capteurs de déplacement potentiométriques (voir figure V-1[droite]).



Figure V-1 : [gauche] Exemple de mesure optique de l'ouverture d'une fissure ; [droite] exemple de suivi de l'évolution d'une fissure grâce à un capteur potentiométrique

Les problèmes concernant la dégradation successive du béton sont également observés au niveau des murs d'enceintes nucléaires. La recherche présentée dans ce chapitre se focalise précisément sur cette problématique et a été réalisée et financée dans la cadre du projet ANR (2015-2020) « **Evaluation Non Destructive des Enceintes de confinement des centrales nucléaires** » (ENDE) qui visait le développement de méthodes de diagnostic du béton des murs d'enceintes nucléaires.

V.1.2 Projet ENDE : présentation et objectifs

La principale fonction d'un mur d'enceinte de confinement est de contenir une augmentation brutale de la pression et température interne au cours d'un accident ou lors d'une agression externe, pouvant être environnementale (inondations, raz-de-marée, séismes, etc.) ou même terroriste. L'un des objectifs du projet ENDE est d'évaluer les caractéristiques du béton qui permettent d'évaluer au mieux les risques encourus par la structure en cas de contraintes extrêmes [Abraham et al – 2018 ; Garnier et al – 2016a ; Garnier et al – 2018a].

La seconde principale fonction assurée par le mur d'enceinte de confinement est de rendre étanche la structure face aux possibles fuites pouvant causer la dissémination d'éléments radioactifs dans l'espace environnant. Les phénomènes de transfert de gaz à travers le réseau poreux, les microfissures et macrofissures qui peuvent exister y compris dans les conditions normales de fonctionnement ne sont pas encore complètement identifiés. Afin de mieux les appréhender et ainsi de mieux évaluer les risques encourus, le projet ENDE a pour objectif d'évaluer, par l'utilisation de méthodes non destructives, la porosité du matériau, sa teneur en eau, sa perméabilité et le comportement des fissures sous des conditions normales (c'est-à-dire lorsque le béton est soumis à une contrainte de compression due aux gaines de post-tension), et au cours d'un test décennal (durant lequel la contrainte de compression interne est réduite à cause de la pression d'air à l'intérieur de l'enceinte augmentée à 5 bars), ainsi que d'observer les effets d'un endommagement thermique normalisé au cours duquel la température maximale atteinte est de 200 °C dans le cas d'un accident.

Le travail dans le cadre de ce projet a été réparti en deux phases : des essais en laboratoire et des essais in situ sur une maquette instrumentée d'une enceinte de confinement à l'échelle 1/3. Les essais en laboratoire simuleront les conditions vécues par le matériau in situ durant des épreuves de contrainte auxquelles la structure sera soumise (ces épreuves sont présentées plus loin).

Les détails du Projet ENDE ainsi que les résultats obtenus sont décrits dans [Garnier et al - 2018a ; Garnier et al 2018b ; Garnier et al – 2016a ; Garnier et al – 2016b ; Abraham et al – 2019].

Première étape : Essais au laboratoire

Les mesures CND en laboratoire ainsi que la réalisation des éprouvettes ont été effectuées au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions à Toulouse (LMDC).

Les tests sur ces éprouvettes avaient pour objectif de simuler des conditions d'accident pour le béton d'une enceinte de confinement. Pour cette raison, les états des matériaux à évaluer ont été classés en 4 groupes afin de décorrélérer les effets de chaque phénomène (mécanique ou thermique).

- état 0 : matériau sain, non contraint
- état 1 : matériau représentatif du béton sur site (c'est-à-dire sous compression due à la post-tension des câbles, de 0 à 12 MPa selon la résistance du béton) (voir figure V-2)
- état 2 : matériau endommagé thermiquement (mis à l'étuve à 20 °C, 80 °C, 150 °C et 200 °C)
- état 3 : matériau endommagé thermiquement et contraint, matériau fissuré

Les photos V-2 et V-3 illustrent différentes expérimentations effectuées au laboratoire.



Figure V-2: Photo de la presse utilisée, avec une éprouvette instrumentée

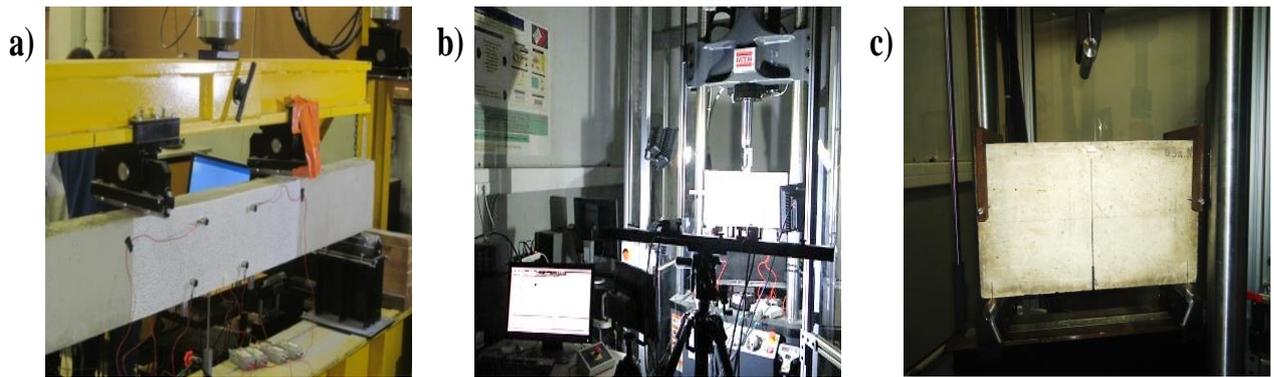


Figure V-3: a) Test de suivi de l'endommagement diffuse et de la transition à l'endommagement homogène; b) Test d'ouverture et fermeture de fissure d'une éprouvette de dimension 250 x 25 x 12 cm³ chargée en flexion 3 points ; c) Essai de fissuration sur une dalle de béton mise en flexion 3 points [Garnier et al – 2016]

Deuxième étape : Essais in situ

Les essais in situ ont été effectués sur une maquette développée par EDF (Electricité De France) dans le cadre du programme VeRCoRs (Vérification Réaliste du Confinement des Réacteurs). Il s'agit de la structure d'une enceinte de confinement construite à l'échelle 1/3 (voir figure V-4b). Elle a été dimensionnée de telle sorte que le comportement mécanique et poromécaniques sont représentatifs d'une enceinte de confinement réelle. Le béton et les défauts en son sein sont proches de ceux de la structure réelle, et ainsi les essais faits en amont peuvent être implémentés tels quels sur la structure VeRCoRs.



Figure V-4 : Maquette d'une enceinte de confinement développée par EDF: VeRCoRs

La structure fait 30 m de hauteur, le diamètre de l'intrados de la paroi interne est de 15 m, et la paroi fait 40 cm d'épaisseur. Une importante quantité de capteurs de toutes sortes a été installée au moment de la construction, qui s'est terminée en 2016.

Cette structure a également pour but de simuler les conditions de température et de pression en cas d'incident au niveau du cœur du réacteur. Pour cela, un système de chauffage a été installé dans l'enceinte interne, ainsi qu'un système d'injection d'air. Le béton utilisé pour les tests en laboratoire est le même que celui utilisé pour la construction de la maquette. Ses caractéristiques sont : une résistance de 50 MPa, un

module élastique de 36 GPa et une porosité de 15 %. La structure est précontrainte à 8 MPa en moyenne, et lors d'épreuves simulant un incident, jusque 4 bars (pression relative) d'air sont injectés dans l'enceinte interne. La pression interne entraîne une expansion du cylindre constituant l'enceinte interne, ce qui cause une décompression des fissures. Ces 4 bars de pression ont été choisis de telle sorte que la contrainte interne compense la précontrainte initiale. Comme au laboratoire, les mesures à VeRCoRs visaient deux objectifs : la caractérisation du béton et la détection de défauts.

Le travail de ce chapitre s'inscrit dans les objectifs du projet ENDE dans le cadre de l'utilisation des méthodes ultrasonores et vise la caractérisation du béton dans son volume et la détection de micro-fissuration et de (macro)fissures à l'aide des scanners à ondes de surface.

Les deux scanners décrits dans le Chapitre I seront utilisés et le choix de l'un ou l'autre dépendra de la profondeur de volume à inspecter. C'est dans le cadre de ces travaux que le scanner basse fréquence (avec une profondeur de pénétration plus importante) a été développé et la recherche présentée constitue ses premières utilisations pratiques.

V.2 Tests au laboratoire

V.2.1 Caractérisation du béton dans son volume

L'objectif de cette étape était de caractériser les éprouvettes à différents états (matériau sain, matériau sous compression, matériau endommagé thermiquement). En prenant en compte les dimensions des dalles, les mesures ont été effectuées avec le scanner HF. En se référant aux paramètres et réglages détaillés dans le paragraphe I.4, les mesures ont été réalisées en respectant le protocole indiqué dans le tableau V-1. La figure V-5 donne la photo du scanner en cours de mesure sur une dalle sous la presse.

Tableau V-1 : Paramètres et réglages du scanner

Nombre de profils par dalle	transducteurs utilisés (bandes fréquentielles associées)	Longueur d'un profil L (cm)	Ecart entre les points de mesure (cm)	Nombre de points de mesure par profil N	Angle d'attaque β (°)	Forme d'impulsion W(t)	« Averaging » ou moyennage
3	T50 : 15 kHz – 130 kHz	10	0,25	40	8,5	Chirp rectangulaire	16
	T75 : 30 kHz – 200 kHz						8
	T150 : 70 kHz – 400 kHz						4

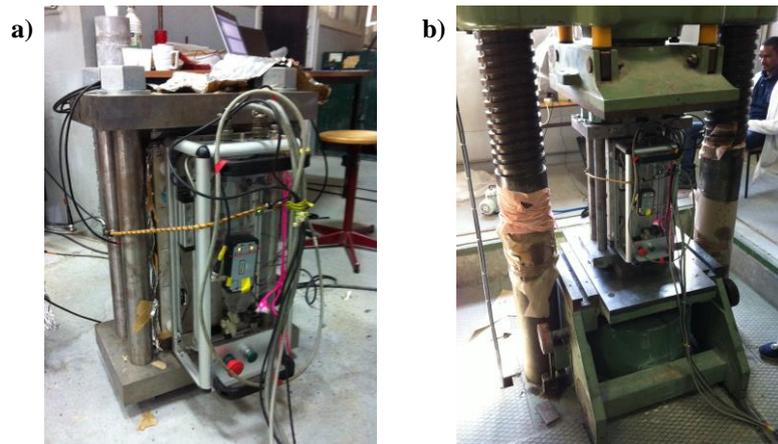


Figure V-5 : Photos de l'éprouvette de béton (formulation VerCoRs) avec le scanner HF installé sur l'une de ses plus grandes surfaces a) mise sous bâti ; b) installée sous presse

Afin de couvrir une bande fréquentielle aussi large que possible, les mesures ont été effectuées pour trois transducteurs différents dans les bandes [30 kHz – 200 kHz] et [70 kHz – 400 kHz]. Les mesures ont été réalisées sur 3 profils parallèles différents espacés de 5 cm environ et les résultats ont été moyennés. La diminution du nombre de profils de 5 (travaux précédents, chapitres II-IV) à 3 était dû à la cadence imposée par l'organisation des mesures : plusieurs équipes se relayaient sur la même dalle, afin de pouvoir croiser les résultats.

La figure V-6 donne un exemple de résultats obtenus. Les courbes de dispersion de vitesse et d'atténuation obtenues dans les trois différentes bandes ont été combinées.

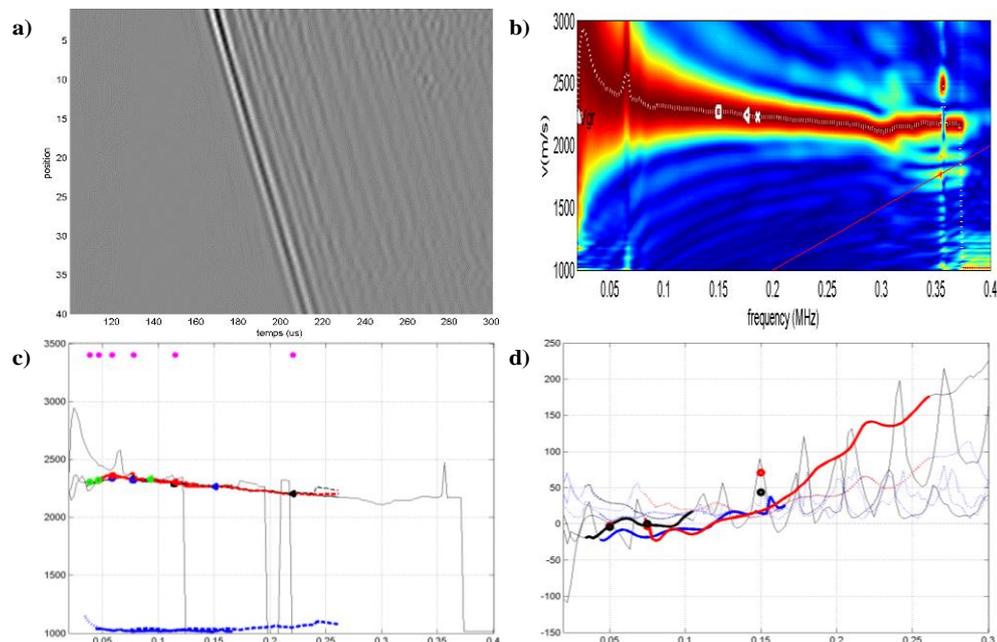


Figure V-6 : a) Exemple de B-scan en échelle de gris pour une mesure avec le transducteur 50 kHz ; b) transformation Slant Stack de la courbe de dispersion de vitesse ; c) courbe de dispersion résultant de la combinaison des 3 courbes dans les bandes 50, 75 et 200 kHz ; d) courbe d'atténuation résultant de la combinaison des 3 courbes dans les bandes 50, 75 et 200 kHz

Dans le projet ENDE, chaque technique CND utilisée fournit un certain nombre d'observables. Chaque observable a été codée. À la fin de la campagne, toutes les observables ont été classées, comparées, évaluées et les meilleures ont été fusionnées. Le tableau V-2 montre les différentes observables fournies par le scanner, obtenues à partir des deux caractéristiques de dispersion. On peut y observer que ces mesures fournissent deux vitesses de groupe et deux valeurs d'atténuation respectivement pour les fréquences 50 kHz et 150 kHz, ainsi que quatre valeurs de vitesse en fonction de la longueur d'onde pour $\lambda = \{1 ; 2 ; 3 ; 5\}$ cm.

Tableau V-2 : Observables ENDE associées aux les mesures

N° ENDE	Code ENDE	Technique	Labo	Observable	Unité
101	US-VG1	Ultrason	EC Lille	Ultrasons Surface - vitesse de groupe fréquence $f_1 = 50$ kHz (m/s)	m/s
102	US-VG2	Ultrason	EC Lille	Ultrasons Surface - vitesse de groupe fréquence $f_2 = 150$ kHz	m/s
103	US-1cm-ECL	Ultrason	EC Lille	Ultrasons Surface - vitesse 1 cm	m/s
104	US-2cm-ECL	Ultrason	EC Lille	Ultrasons Surface - vitesse 2 cm	m/s
105	US-3cm-ECL	Ultrason	EC Lille	Ultrasons Surface - vitesse 3 cm	m/s
106	US-5cm-ECL	Ultrason	EC Lille	Ultrasons Surface - vitesse 5 cm	m/s
107	US-AT1	Ultrason	EC Lille	Ultrasons Surface - atténuation moyenne $f = f_2 = 50$ kHz	dB/m
108	US-AT2	Ultrason	EC Lille	Ultrasons Surface - atténuation moyenne $f = f_2 = 150$ kHz	dB/m

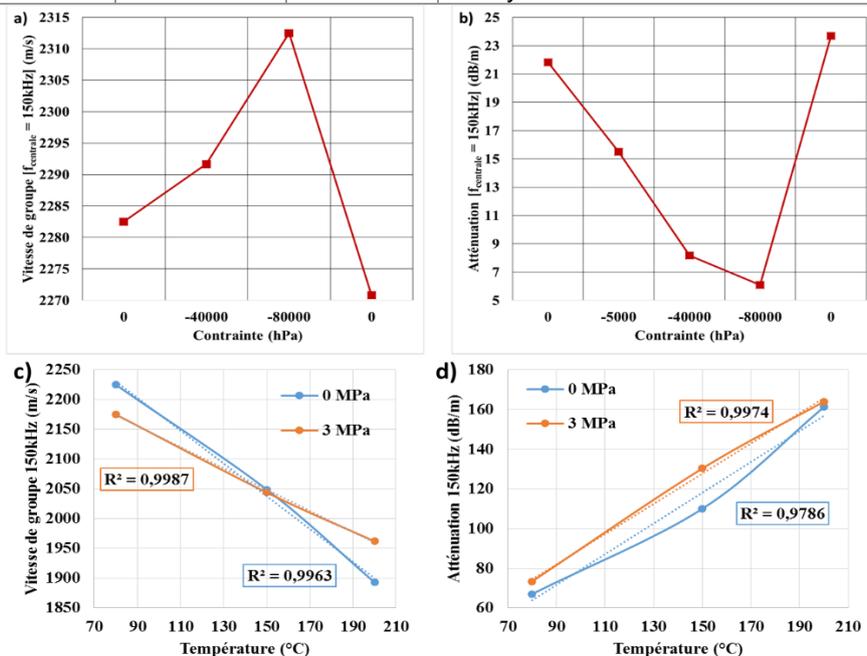


Figure V-7 : Évolution de a) la vitesse de groupe et de b) l'atténuation des ondes de surface sur une dalle de béton soumise à une compression simple ; c) évolution de la vitesse de groupe du transducteur 150 kHz en fonction de la température d'étuve (lorsque les dalles ont été dégradées thermiquement) ; d) évolution de l'atténuation avec le transducteur 150 kHz en fonction de la température d'étuve (lorsque les dalles ont été dégradées thermiquement)

Les résultats obtenus prennent donc en compte les variations de vitesse et d'atténuation en fonction de la contrainte, de la teneur en eau et de la température de dégradation thermique des dalles. Les résultats des tests sous contrainte sont présentés sur la figure V-7.

L'exemple des résultats de la mesure de vitesse de groupe et d'atténuation de l'onde en fonction de la contrainte et de la température sont présentés sur la figure V-7. Le test de compression simple a commencé à 0,5 MPa (légère compression due à la mise sous bâti), puis 2 paliers de 4 MPa et 8 MPa ont été atteints, puis le retour à 0 MPa.

Les effets de la contrainte appliquée sur la vitesse de groupe et sur l'atténuation pour le transducteur T75 sont très clairs. Les seuls effets de la déformation du béton (et donc de la modification de la masse volumique) ne peuvent pas justifier les variations des paramètres étudiés. Il est donc bien plus probable que la cause de ces variations soit le compactage du matériau par fermeture des fissures et microfissures (puis leur réouverture lors de la décharge). On observe d'ailleurs, particulièrement pour la vitesse de groupe, un écart à la valeur initiale après la décharge (la vitesse après décharge est plus faible qu'avant la mise sous presse, et le contraire pour l'atténuation). Cela peut être dû au fait que ce cycle de chargement a créé de nouvelles microfissures et a sollicité les fissures présentes, qui ont pu s'ouvrir de manière plus prononcée lors de la décharge. La vitesse varie de 1,3 % et l'atténuation varie de 500 % lorsque la contrainte varie entre 0 MPa et 8 MPa. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans le chapitre II, où l'atténuation était beaucoup plus sensible à la dégradation du matériau.

En conclusion de cette étape du projet ENDE, on a pu conclure que dans l'intervalle de variations prévues pour un accident de l'enceinte de confinement, la vitesse des ondes de surface est peu sensible à la contrainte et est très peu sensible à l'association de la contrainte avec l'endommagement thermique. Elle est au contraire très sensible à l'endommagement thermique (variation de 20 %). L'atténuation est à priori très sensible à l'endommagement thermique.

V.2.2 Détection de la micro fissuration et des macro-fissures

Des mesures préalables en laboratoire ont permis de définir quelles techniques étaient efficaces dans la détection de fissures, dont celle utilisant un scanner à ondes de surface. Les informations sur la microfissuration et macrofissuration sont généralement identifiables sur l'évolution de l'amplitude du signal de l'onde de surface que nous définirons comme la fonction $A(x_i)$ (définie dans le Chapitre I, paragraphe I.3.1).

On peut rappeler que dans un milieu homogène, l'amplitude de l'onde de surface évolue avec la distance x comme :

$$A(x) = A_{x_0} \frac{e^{-\alpha(f).x}}{\sqrt{x}} \quad (V-1)$$

où A_{x_0} représente l'amplitude nominale de la source et $\alpha(f)$ le coefficient d'atténuation. L'amplitude attendue dans un milieu homogène suit une exponentielle décroissante avec la distance.

Lorsqu'une onde de surface traverse un obstacle tel qu'une fissure, une poche vide, etc., seule une partie de l'énergie est transmise, et quand on suit l'évolution de l'amplitude, on observe une chute et/ou une amplification soudaine. Cette observation peut être utilisée pour faire de l'imagerie de fissures et est illustrée sur la figure V-8. La ligne pointillée noire sur les figures indique l'amplitude de l'onde en fonction de la distance dans le milieu sans obstacle (Eq.V-1).

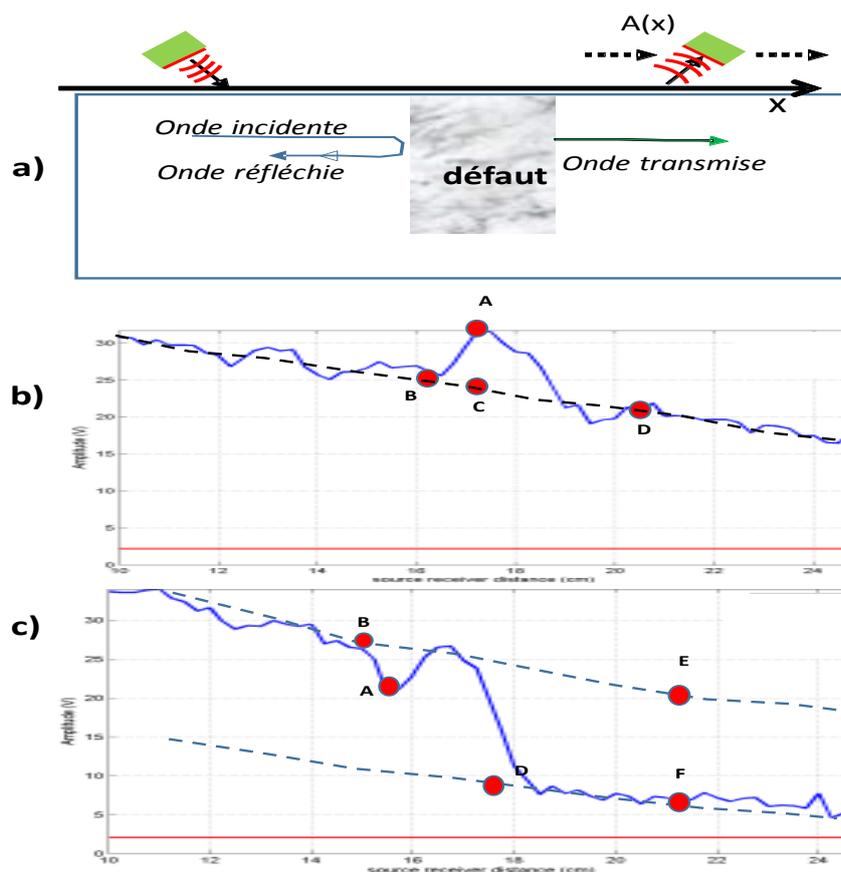


Figure V-8: a) Schéma d'une onde de surface atteignant un obstacle acoustique ; b) réflexion d'onde et c) perte d'énergie (affaiblissement d'onde) ; {A,B,C,D,E} = points choisis pour paramétrer les observables définies

Deux phénomènes spécifiques ont été observés quand une onde de surface rencontre un obstacle (un obstacle acoustique apparaît entre 2 milieux quand il y a un contraste d'impédance acoustique significatif entre les 2 milieux, par exemple entre un solide et l'air) :

- Une réflexion à partir de l'obstacle, ce qui cause une augmentation soudaine d'amplitude du signal (interférence entre l'onde incidente et l'onde réfléchie) avec un retour à la décroissance théorique, comme illustré sur la figure V-8b ; ce phénomène peut être modélisé par un coefficient de réflexion défini par :

$$R = \frac{A-C}{C} \quad (V-2)$$

- Une perte d'énergie de l'onde, qui se traduit par une chute complète de la courbe exponentielle, comme illustré sur la figure V-8c ; on peut modéliser cette perte d'énergie de l'onde par un coefficient appelé Affaiblissement de l'onde W (dB), défini par :

$$W_{dB} = 20. \log\left(\frac{E}{F}\right) \quad (V-3)$$

Test de flexion 3 points

Ce test est illustré sur la figure V-9. Pendant ces tests, une force croissante F était exercée sur une dalle placée dans un dispositif de flexion 3 points. Une encoche a été positionnée au moment du coulage de la dalle, de telle sorte que le point de flexion soit à l'opposé de l'encoche, afin de provoquer la fissuration là où l'encoche en bois était placée (cette encoche est visible sur la figure V-9a). Le schéma sur la figure V-9c montre le déroulé de l'essai : 4 cycles de chargement-déchargement sans apparition de fissure (de P0 à P4) puis 4 cycles de chargement à partir du premier cycle où la fissure apparaît (de Fiss1 à Fiss4). Le scanner était placé sur une face latérale par rapport au plan de chargement, et effectuait la mesure le long de l'axe x comme indiqué sur la figure V-9b. Sur 60 points de mesure, la fissure est apparue au niveau du 32^{ème} point. Les figures V-9d, V-9e et V-9f montrent les B-scans pour 3 étapes de chargement, dont 2 après l'apparition de la fissure. On voit nettement l'affaiblissement du niveau de signal à partir de la position 32, indiquée en ligne discontinue.

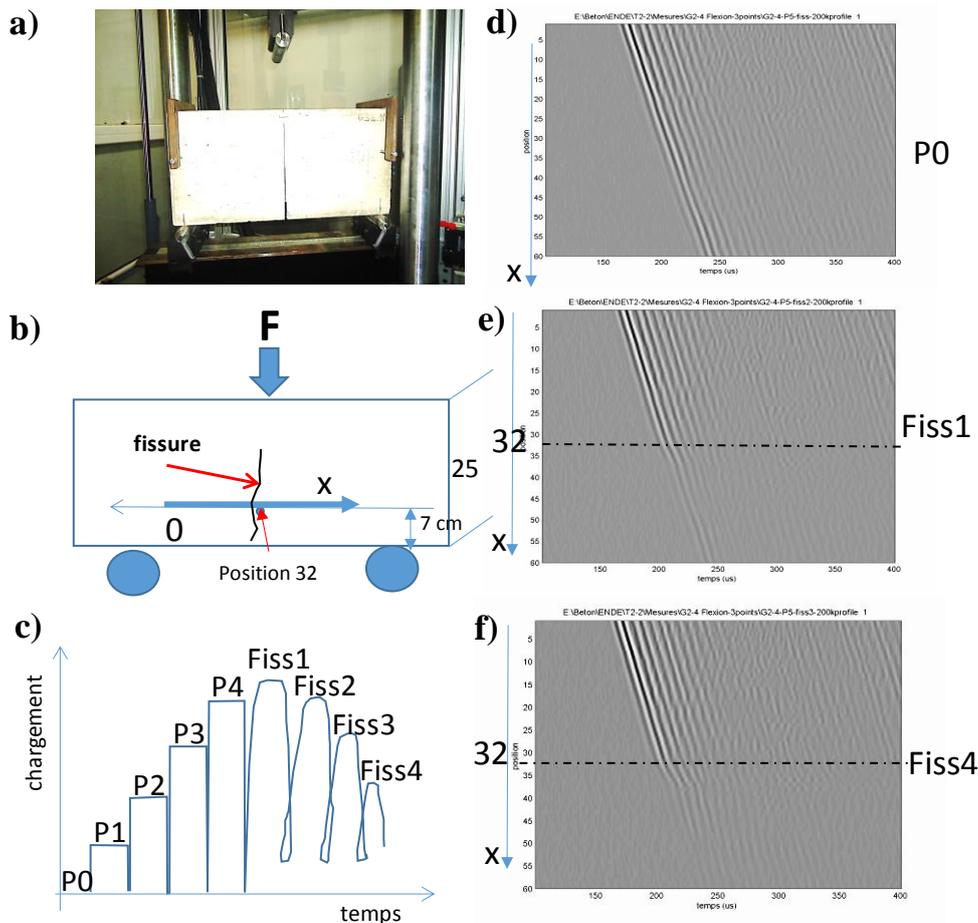


Figure V-9 : a) Photo de la dalle sur ses points d'appui ; b) schéma du positionnement du robot sur la dalle et de la position de la fissure ; c) déroulé des différentes étapes de chargement de la dalle ; d) B-scan de l'étape P0 ; e) B-scan de l'étape Fiss1 ; f) B-scan de l'étape Fiss4

Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure V-10. Le tracé de l'amplitude $A(x)$ du signal pour chaque étape de chargement (figure V-10a) montre clairement une différence entre les étapes de chargement avec et sans fissuration. Lorsque la fissure apparaît, l'amplitude du signal chute fortement. On peut observer que l'endommagement commence déjà avant 32 cm (position de la fissure), à 28 cm.

Quand on calcule le coefficient d'affaiblissement W pour chaque étape (figure V-10b), on obtient $W = 0$ dB jusqu'à l'étape Fiss1 incluse. À partir de l'étape Fiss2, W augmente jusqu'à tendre vers l'infini quand l'amplitude du signal tend vers 0. Le coefficient d'affaiblissement est donc peu sensible à l'augmentation de la contrainte, et très sensible à la présence et à l'ouverture d'une fissure.

Lorsqu'on suit l'évolution des paramètres calculés à partir de tout le profil, c'est-à-dire des paramètres globaux (vitesse de groupe et atténuation, figure V-10c et V-10d), on observe la diminution de la vitesse et l'augmentation de l'atténuation – ce qu'on peut attendre à la base des mesures sous la presse. À partir du moment où la

fissure apparaît, l'atténuation se stabilise mais la vitesse remonte (car la contrainte disparaît). La vitesse de phase et l'atténuation semblent donc sensibles à la contrainte appliquée dans le matériau

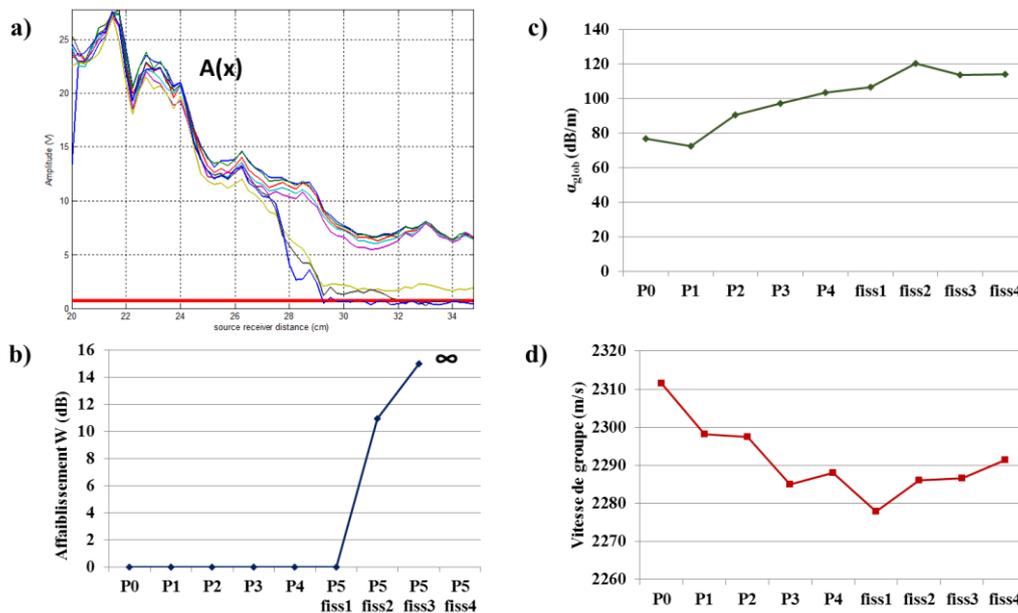


Figure V-10 : a) Variations de l'amplitude du signal en fonction de la distance à la source pour chaque étape de chargement ; Variations b) du coefficient d'affaiblissement, c) du coefficient d'atténuation et d) de la vitesse de groupe (pour le transducteur centré sur 150 kHz) pour chaque étape de chargement, au cours d'un essai de flexion 3 points

Test de flexion 3 points d'une dalle endommagée thermiquement

Cet essai est schématisé sur la figure V-11. Pendant cet essai, une force croissante F a été exercée sur une dalle endommagée thermiquement, mise en flexion 3 points. L'endommagement thermique a été effectué à l'aide d'une résistance chauffante placée dans la dalle au moment de sa coulée (Fig. V-11a). La température de la résistance était de 150 °C. Il s'agit du même essai que celui présenté précédemment, mais la dalle n'était pas saine initialement. Une perturbation de l'onde de surface est observée sur le B-scan de l'état 0 (phase P0 figure V-11b). Cela témoigne du fait que les ondes de surface « voient » la résistance chauffante, et possiblement le béton endommagé environnant la résistance. Les B-scans de toutes les étapes sont donnés dans l'annexe figure A.V.2.2.a.

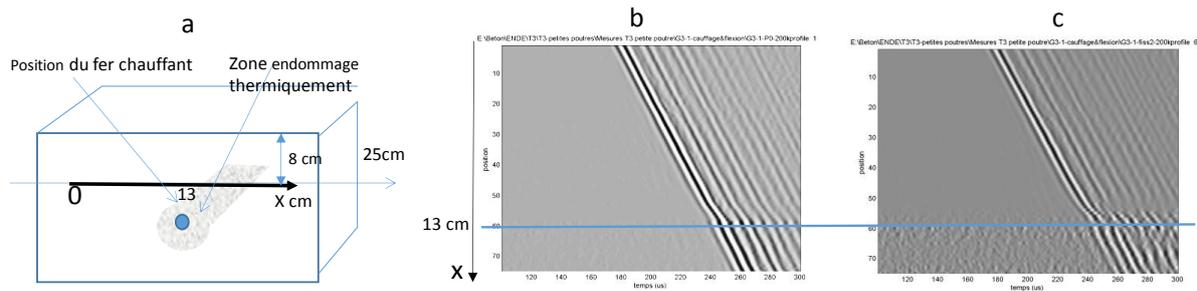


Figure V-11 : a) Schéma de la dalle dégradée thermiquement par une résistance chauffante puis soumise à une flexion 3 points ; b) B-scan de l'état 0 c) état fiss1

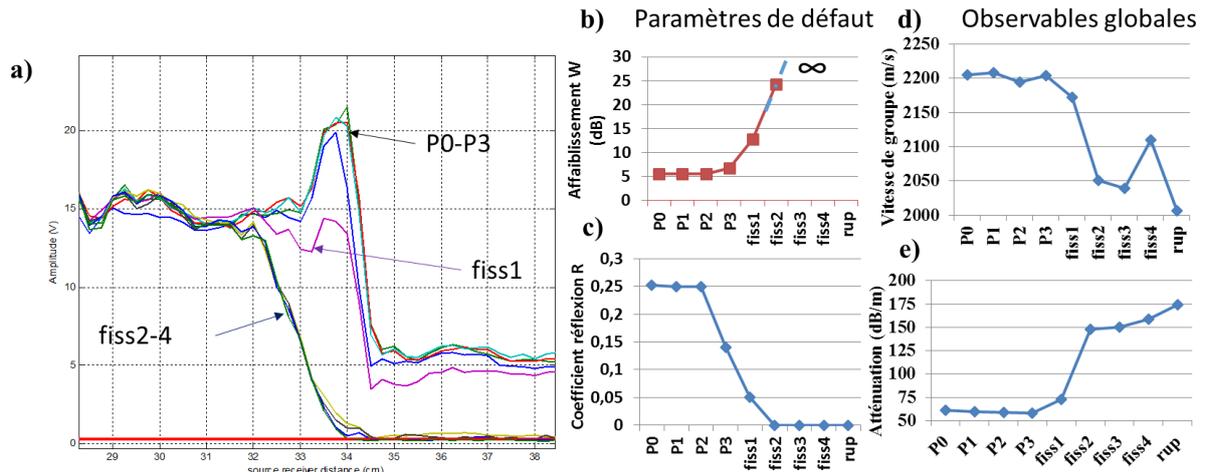


Figure V-12 : a) Variations de l'amplitude du signal en fonction de la distance à la source pour chaque étape de chargement ; Variations b) du coefficient d'affaiblissement, c) du coefficient de réflexion, d) de la vitesse de groupe et e) du coefficient d'atténuation pour chaque étape de chargement, au cours d'un essai de flexion 3 points sur dalle endommagée thermiquement

Les résultats sur l'amplitude $A(x)$ de l'onde sont très similaires à ceux obtenus sur la dalle n'ayant pas été endommagée thermiquement, mis à part le fait que l'on peut observer cette fois-ci la réflexion de l'onde (augmentation brutale de l'amplitude). L'affaiblissement W est quasi nul tant que la fissure n'est pas apparue, et augmente fortement une fois que la fissure est créée. Le coefficient de réflexion R existe uniquement (est non nul) quand la dalle n'est pas encore fissurée, et il devient nul ensuite. Ce comportement est surprenant, on aurait attendu la situation inverse, où la fissure causerait une réflexion. Il semble donc que ce soit la résistance chauffante (et la zone de béton dégradé l'environnant) qui crée une réflexion de l'onde de surface, et la fissure absorbe complètement l'énergie de l'onde réfléchie.

La vitesse globale (mesurée sur le profil entier) diminue de 10 % au moment de l'apparition de la fissure, et était constante avant. Le comportement est donc différent lorsque la dalle fissurée est saine initialement ou endommagée thermiquement par une résistance chauffante. L'atténuation augmente de 250 % à partir de la fissuration. On peut cependant remarquer que pour la vitesse et l'atténuation, le comportement attendu correspond à celui obtenu pour la dalle avec la résistance chauffante (et pour les tests de compression).

Ainsi, l'onde de surface détecte bien la fissure, et permet de suivre son évolution grâce aux paramètres locaux tels que l'affaiblissement et le coefficient de réflexion, et grâce aux paramètres globaux : la vitesse et l'atténuation de l'onde.

Test de flexion en 4 points sur une poutre

Un test de flexion en 4 points sur une poutre fabriquée à partir de la même formulation que le béton de la maquette VeRCoRs a été réalisé au LMDC de Toulouse, ses dimensions sont $12 \times 20 \times 240 \text{ cm}^3$. L'objectif était de créer une fissure (une encoche en bois avait été placée au centre de la surface qui subira la traction) puis de la refermer, la rouvrir et ainsi de suite grâce à des câbles de précontrainte. Le dispositif expérimental est illustré sur la figure V-13.a.

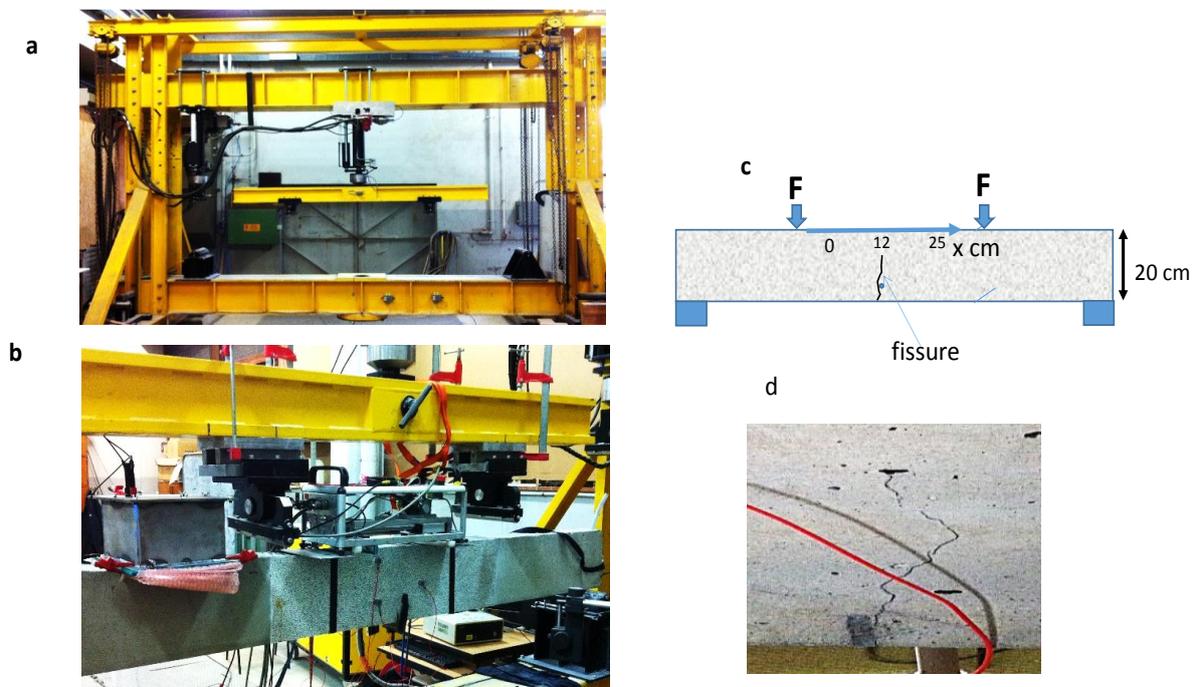


Figure V-13 : a) Presse utilisée pour la flexion 4 points ; b) photo du scanner HF et la source BF installés sur la poutre ; c) illustration schématique de la poutre et de la position de la fissure à l'issue du test ; d) photo de la fissure après la dernière étape de fissuration

Il aurait été idéal de positionner le scanner sur la surface subissant la traction, car c'est sur cette surface que les effets de la fissure sur la propagation des ondes de surface auraient été les plus évidents, mais les conditions expérimentales ne le permettaient pas. La seule possibilité était de positionner le scanner sur la surface opposée. Seul le scanner HF était fonctionnel au moment où cet essai a eu lieu, le scanner BF était encore en développement. Cependant, en plaçant le scanner HF sur la surface, mêmes les ondes ayant les plus grandes longueurs d'onde et atteignant les plus grandes profondeurs (env. 6 cm) n'auraient pas atteint le fond de la poutre dont

la profondeur est de 20 cm. Ainsi, uniquement une partie de la fissure, lorsque celle-ci serait déjà très développée, aurait pu être détectée. Il a donc été décidé d'utiliser la source d'ondes de surface basses fréquences déjà développée à ce moment-là pour équiper le scanner BF (voir chapitre I). Le système de mesure d'ondes de surface était donc composé de la source à basses fréquences et du scanner HF (mais seulement sa partie réception). Il s'agissait de la première utilisation de scanner à basses fréquences. Le dispositif expérimental est illustré sur la figure V-13.b.

En se référant aux paramètres et réglages détaillés dans le paragraphe I.4, les mesures ont été réalisées en respectant le protocole indiqué dans le tableau V-3. Les fréquences choisies étaient les plus larges possibles par rapport aux performances de la source basses fréquences à l'époque, soit entre 5 kHz et 25 kHz. Cela correspond à des longueurs d'ondes effectives (soit une pénétration dans le béton) entre 6 cm et 20 cm.

Tableau V-3 : Paramètres et réglages du scanner

Nombre de profils par dalle	transducteurs utilisés (bandes fréquentielles associées)	Longueur d'un profil L (cm)	Ecart entre les points de mesure (cm)	Nombre de points de mesure par profil N	Angle d'attaque $\beta(^{\circ})$	Forme d'impulsion W(t)	« Averaging » ou moyennage
1	RBT-20 5-25 kHz	25	0.5	50	8.5	Chirp rectangulaire	32

Le scanner ne fonctionnait pas en continu, onze étapes de fissuration ont été effectuées et à chaque fois que la presse s'arrêtait de progresser, une mesure était lancée. Le tableau V-4 décrit sept étapes de chargement et de fissuration de l'essai – les plus significatives, choisies pour être analysées.

Tableau V-4 : Description des étapes de chargement et remarques sur l'essai de fissuration 4 points

Etape	Description
3	Etat initial, pas de chargement
4	Premier palier chargement, pas d'initiation de fissure
5	Nouveau palier du chargement, pas d'initiation de fissure
6	Nouveau palier de chargement, la fissure s'initie et se développe jusque 5cm de haut
7	Déchargement, la fissure se referme
10	Nouveau palier de chargement, la fissure se développe jusque 17,5cm de haut
11	Déchargement, la fissure se referme mais reste partiellement ouverte (0,5mm au point de départ de la fissure)

Le traitement des résultats a été conduit de la même façon que pour les paragraphes précédents : à partir de l'enregistrement brut, la fonction $A(x)$ est extraite, puis les paramètres W et R sont tracés (voir équations (V-2) et (V-3)). La figure V-14 illustre le B-scan des ondes de surface pour les étapes 1 et 6 et les paramètres R et W obtenus pour toutes les étapes. Les B-scans de l'ensemble des 7 étapes sont donnés dans l'Annexe Chapitre V sur la figure A.V.2.2.b.

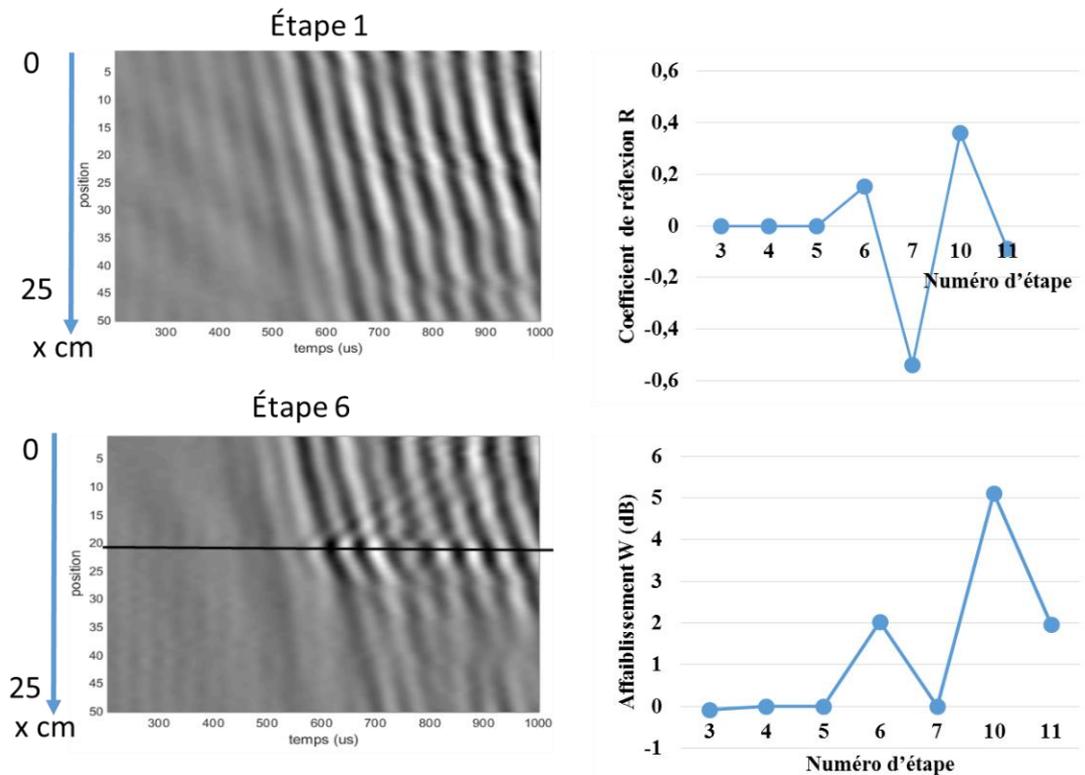


Figure V-14 : B-scans des étapes 1 et 6 de fissuration de la poutre, coefficient de réflexion de l'onde de surface et coefficient d'affaiblissement de l'énergie de l'onde de surface

On remarque sur les B-scans de la figure V-14 (voir figure A.V.2.2.b) que le chargement et le début de la fissuration n'ont presque aucun impact sur les ondes de surface sur les 3 premières étapes (3, 4, 5), ce qui est normal, puisque aucune fissure ne s'est initiée ($R = 0$ et $W = 0$ dB).

Au cours de l'étape 6, on observe la formation d'une fissure de 5 cm de longueur. Le robot ayant été positionné de telle manière que le profil de déplacement du récepteur soit centré sur le milieu de la poutre (donc également centré sur la fissure attendue), c'est à partir du milieu de la figure (position 25) que l'on voit le signal atténué par la fissure. Lorsque le chargement est retiré à l'étape 7, on observe des résultats similaires à ceux des 3 premières étapes lorsque la fissure n'est pas présente : l'affaiblissement devient alors $W = 0$ dB, mais la fissure refermée ainsi est tout de même « vue » par l'onde de surface car $R \neq 0$. Lorsque la poutre est à nouveau chargée à l'étape 10, la fissure est particulièrement visible, car celle-ci s'est développée sur 17,5 cm. Les

paramètres W et R sont maintenant maximaux et on observe que le sommet de la fissure provoque la diffraction de l'onde de surface, car cette diffraction est visible sur le B-scan sous la forme d'une hyperbole, centrée sur la position 25. Enfin, lors de l'étape 11, le chargement est relâché et la fissure s'est partiellement refermée (grâce à l'action de la gaine de précontrainte). Notons que R devient 0 mais le coefficient W reste supérieur à 0 dB – ceci indique que la fermeture n'est pas « parfaite » (complète).

On peut noter que ces deux paramètres R et W sont pertinents s'ils sont utilisés pour des comparaisons entre différents cas (comme les 7 étapes de chargement dans le cas présent), mais il faudra prendre en compte le fait que ce sont des paramètres définis de manière subjective (par l'opérateur) à partir la courbe A(x) (dans la suite de ce Chapitre, ces paramètres seront déterminés automatiquement).

V.3 Tests in situ

Conformément aux objectifs présentés au début de ce chapitre, les mesures in situ ont été réalisées sur l'enceinte VeRCoRS, qui est une maquette d'enceinte nucléaire construite à l'échelle 1/3. Cette structure est constituée de deux murs concentriques (figure V-15b) d'épaisseur 40 cm séparés par un espace dit espace entre enceintes (EEE) de largeur 2 m. L'accès au mur de l'enceinte interne, dont la hauteur est de 50 m, est assuré grâce à des échafaudages métalliques mis en place sur 11 étages.

Pendant les épreuves, la pression dans l'espace interne (EI) augmente de façon linéaire et atteint le palier de 4 bars après 24 h environs (figure V-16). La pression est ensuite maintenue pendant 12 h environs. Après ces 12 h, les pompes sont arrêtées et la pression commence à décroître suite à la non étanchéité de la structure. La cinétique de décroissance de la pression témoigne alors de l'état d'étanchéité du mur interne.

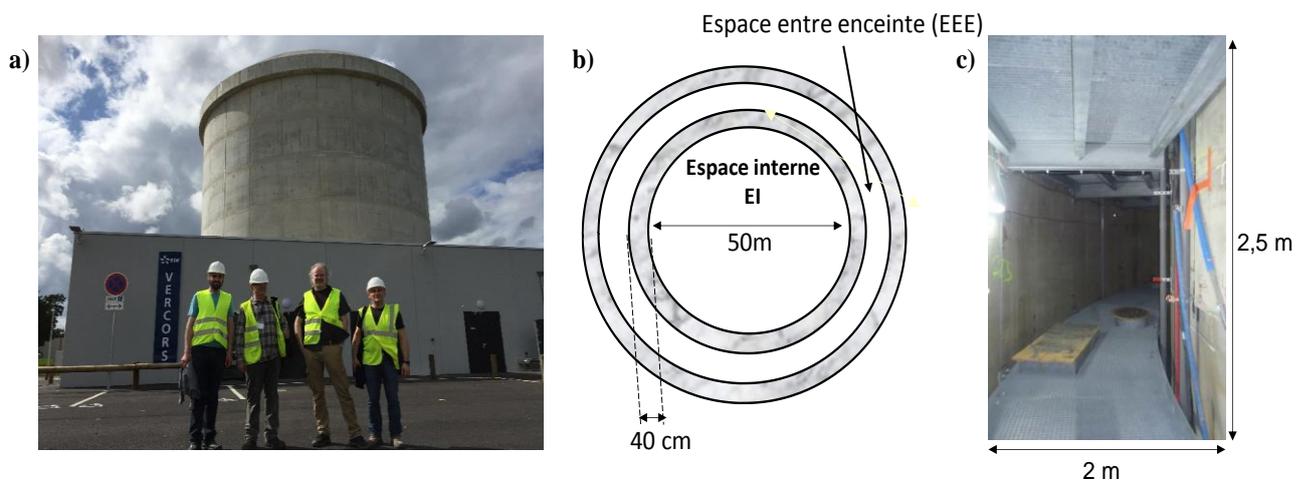


Figure V-15 : a) Photo de l'équipe présente au moment des tests sur l'enceinte VeRCoRS ; b) schéma de la structure de VeRCoRS ; c) photo de l'espace entre enceinte dans laquelle les mesures ont été effectuées

Pendant les 12 heures du palier, des tests d'aspersion sont effectués. Le mur de l'enceinte interne est aspergé d'eau savonneuse. La fuite d'air de l'EI vers l'EEE se fait par les fissures qu'on peut apercevoir grâce aux bulles d'air qui se forment sur les positions des fissures. Le débit d'air sur ces positions est ensuite évalué à l'aide d'un dispositif adapté.

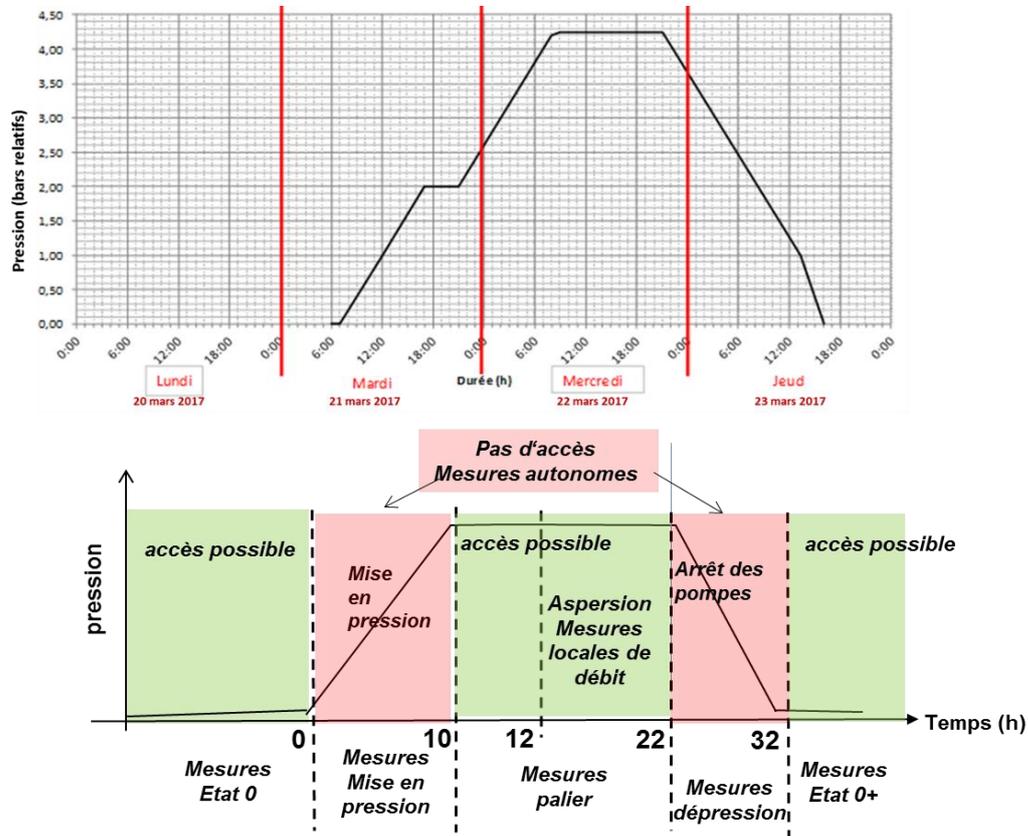


Figure V-16 : a) Suivi temporel de la pression relative dans l'enceinte interne au cours de l'épreuve de mars 2017 ; b) accès à l'EEE pendant les épreuves

V.3.1. Caractérisation de béton dans son volume

Dans la mesure où le phénomène que l'on cherche à détecter est la microfissuration causée par la pression dans l'EI, il a fallu trouver une zone sur l'extrados de l'enceinte interne de VeRCoRs sur laquelle aucune macro fissure n'était identifiée. Parmi toutes les zones sur lesquelles aucune fissure n'avait été détectée, l'une d'elle, nommée la zone T2 dans le cadre du projet ENDE, a été choisie pour l'instrumentation des techniques non destructives du projet ENDE, notamment le scanner HF.



Figure V-17 : a) Zone sans fissure T2 quadrillée choisie pour le contrôle non destructif des techniques proposées par le projet ENDE (les positions des mailles : $y = \{A,B,C\}$, $x = \{1,2,3\}$) ; b) le scanner HF en fonctionnement sur la zone choisie

Les mesures en zone T2 ont été réalisées sur une surface organisée en mailles. La dimension d'une maille ($20 \times 15 \text{ cm}^2$) correspond à la dimension d'une maille de ferrailage. Les armatures ont été positionnées au préalable et marquées à l'aide d'une craie, pour indiquer les frontières des mailles. La figure V-17a montre le repère utilisé : les positions des armatures, et les mailles correspondantes A1-C3.

V.3.1.1. Test préliminaires juin 2016

Des tests préliminaires avaient pour objectif de vérifier le fonctionnement de l'appareillage dans les conditions in situ, comparer les résultats sur les mailles A1-C3, vérifier si les différentes méthodes CND utilisées sur une même zone et en même temps ne se perturbent pas.

En prenant en compte les dimensions des mailles, les mesures ont été réalisées en utilisant le scanner HF en respectant le protocole indiqué dans le tableau V-5 – pour trois transducteurs différents dans les bandes [15 kHz – 130 kHz], [30 kHz – 200 kHz] et [70 kHz – 400 kHz], sur 5 profils parallèles différents espacés de 2 cm environ, et les résultats ont été moyennés. La figure V-17b montre le scanner en cours de mesure.

Tableau V-5 : Paramètres et réglages du scanner

Nombre de profils par maille	Transducteurs utilisés (bandes fréquentielles associées)	Longueur d'un profil L (cm)	Ecart entre les points de mesure (cm)	Nombre de points de mesure par profil N	Angle d'attaque β (°)	Forme d'impulsion $W(t)$	« Averaging » ou moyennage
5	T50 : 15 kHz – 130 kHz	15	0,25	60	8,5	Chirp rectangulaire	4
	T75 : 30 kHz – 200 kHz						8
	T150 : 70 kHz – 400 kHz						16

Les résultats obtenus sur les mailles A1, B1 et C1, conformément aux observables listées dans le tableau V-2, sont présentés sur la figure V-18. Il est visible que contrairement à ce que l'on pourrait attendre, les résultats sur trois mailles voisines ne sont pas identiques. La variation de vitesse de phase en fonction de la longueur d'onde (donc de la pénétration) montre que la peau du béton n'est pas homogène, la vitesse est plus faible à la surface et augmente de 3 % avec la profondeur. L'atténuation obtenue confirme aussi que la maille B1 est la plus hétérogène. L'analyse des résultats fournis par les autres méthodes CND a permis de définir le protocole de mesures à suivre pendant les épreuves de mise en pression.

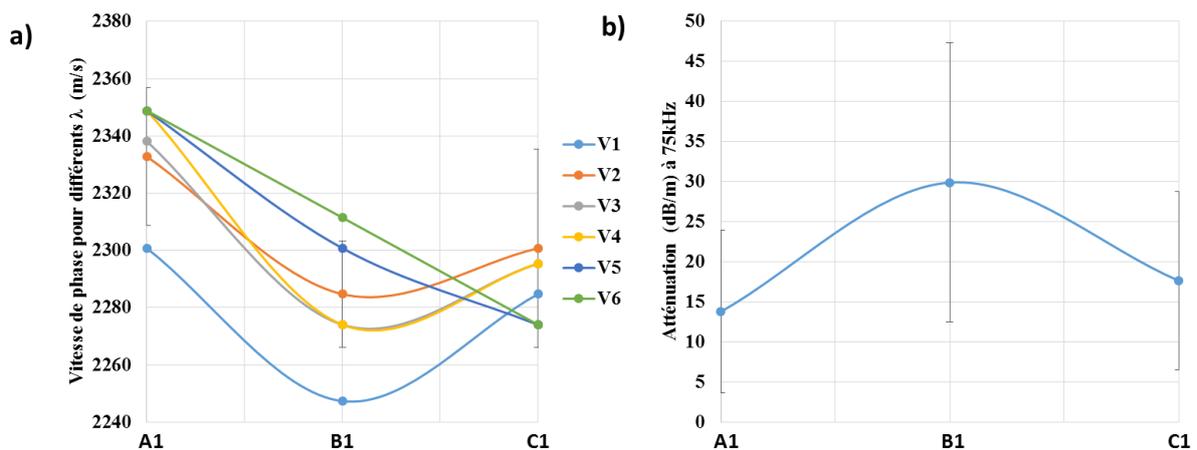


Figure V-18 : a) Vitesse en fonction de la longueur d'onde ($\lambda = 1 \dots 6$ cm) pour les mailles A1, B1 et C1 ; b) Atténuation pour les mailles A1, B1 et C1

Les signaux obtenus étaient de « bonne qualité », ils étaient similaires à ceux obtenus en laboratoire. Les vitesses pour des longueurs d'onde courtes (inférieures à 4 cm) ont un écart-type plus faible que les vitesses pour les longueurs d'onde 5 cm et 6 cm. Cela suggère que les hétérogénéités au-delà de 4 cm (comme le ferrailage présent) perturbent les signaux.

V.3.1.2 Résultats des épreuves de pression en mars 2017

Rappelons que l'accès à l'EEE était interdit pendant les phases de montée et de descente en pression. Ainsi, les techniques CND qui nécessitaient la présence d'un opérateur pouvaient être utilisées uniquement durant les trois phases « état 0 », « mesures palier » et « état 0+ » (voir figure V-16). Les mesures en continu ne pouvaient être assurées uniquement par des techniques autonomes, c'est-à-dire lorsque la mesure est effectuée automatiquement, sans présence d'un opérateur. C'est pour cela que les scanners utilisés à VeRCoRs ont été adaptés pour travailler de manière autonome et ainsi, les résultats obtenus ont permis de suivre des observables en fonction de la pression injectée dans l'enceinte interne pendant toute la durée des épreuves.

Afin de conserver les mêmes conditions de mesure, il a fallu fixer le scanner sur une position unique sur le mur et ne pas le déplacer pendant les épreuves. Cette contrainte aurait gêné les autres techniques CND, il a donc été décidé que les mesures avec le scanner HF seraient réalisées sur la maille voisine A5. De même, comme il était impossible de changer les émetteurs, il a fallu choisir une bande fréquentielle de mesures et notre choix a porté sur le transducteur à 75 kHz (la bande [30 kHz – 150 kHz]) afin que les ondes pénètrent une profondeur suffisante de béton sans être trop perturbées par le ferrailage.

Le scanner avait été programmé pour commencer la veille de l'épreuve, qui commençait le lendemain à 6 h du matin (aucun accès n'était autorisé le matin même). Ainsi, le robot a fonctionné pendant 17 h avant que l'épreuve ne commence, puis pendant toute la montée en pression de l'enceinte et une mesure était lancée toutes les heures. Au moment où le palier de 4 bars relatifs (environ) a été atteint, une aspersion d'eau savonneuse a été réalisée, et malgré les nombreuses protections installées sur le robot HF pour empêcher l'eau de le dégrader, il est tombé en panne pour le reste de l'épreuve. Nous n'avons donc aucune donnée concernant la descente en pression de l'enceinte.

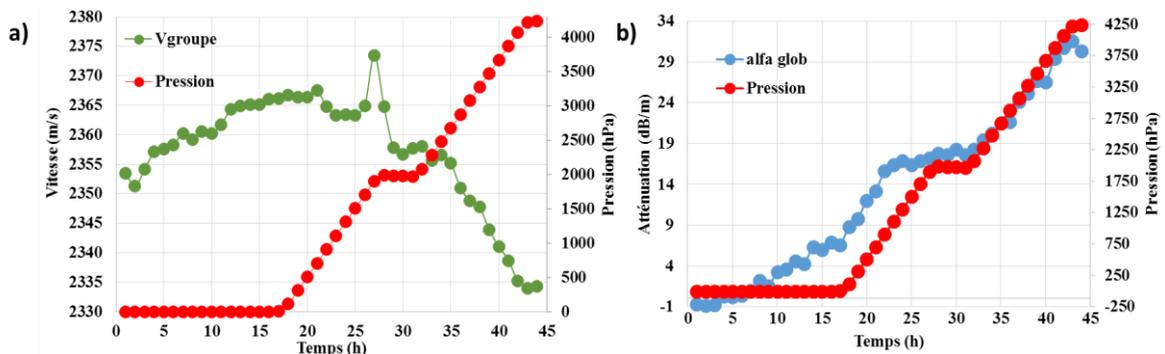


Figure V-19 : a) Vitesse de groupe des ondes de surface et la pression injectée dans l'enceinte interne en fonction du temps ; b) atténuation des ondes de surface et la pression injectée dans l'enceinte interne en fonction du temps

Les résultats pour la vitesse de groupe sont présentés sur la figure V-19. On observe une décroissance de la vitesse au fur et à mesure que la pression augmente dans l'enceinte. Dans ces résultats, on peut distinguer deux parties : l'intervalle 0 h – 17 h avant que l'épreuve commence, puis l'intervalle 18 h – 45 h correspondant à la montée en pression. Dans ce premier intervalle, on s'attendait à ce que la vitesse et l'atténuation soient constantes. Pourtant, des variations de ces observables y sont observées. L'analyse des signaux enregistrés nous a montré que pendant cette période le scanner a affiché certaines anomalies de fonctionnement qui peuvent expliquer ceci. Heureusement, le fonctionnement du scanner s'est stabilisé à partir de la 18^{ème} heure (ce qui coïncidait avec le début de l'épreuve, par chance). Dans la suite, nous allons donc analyser les résultats pour le deuxième intervalle, donc pour la phase croissante de pression.

On observe aussi, entre 27 h et 28 h de mesures, la vitesse était anormalement élevée. A l'heure actuelle, rien n'a permis d'expliquer cette anomalie. On peut remarquer que cette anomalie a eu lieu au moment où un premier palier de pression était atteint et où des personnes rentraient dans l'espace entre enceinte pour effectuer une intervention programmée. Il a été décidé de ne pas prendre ces points en considération par la suite.

La vitesse et l'atténuation de l'onde en fonction de la pression, donc pour l'intervalle 18 h – 45 h, sont présentées sur la figure V-20. Ces résultats sont confrontés aux résultats des mesures des dalles sous contrainte réalisées au laboratoire (cf. paragraphe V.2).

La variation de vitesse entre une pression injectée de 0 hPa (soit une contrainte interne au béton de 8 MPa) et une pression injectée de 4240 hPa (soit une contrainte interne au béton proche de 0 MPa) est d'environ 30 m/s. Il s'agit de la même variation de pression que celle obtenue au test de compression simple en laboratoire (figure V-20a). Cela justifie le fait que le relâchement de contrainte dû à la mise sous pression de l'enceinte est de 8 MPa environs. La relation entre la vitesse et la pression injectée semble être quasiment linéaire, avec 95 % pour le coefficient de corrélation.

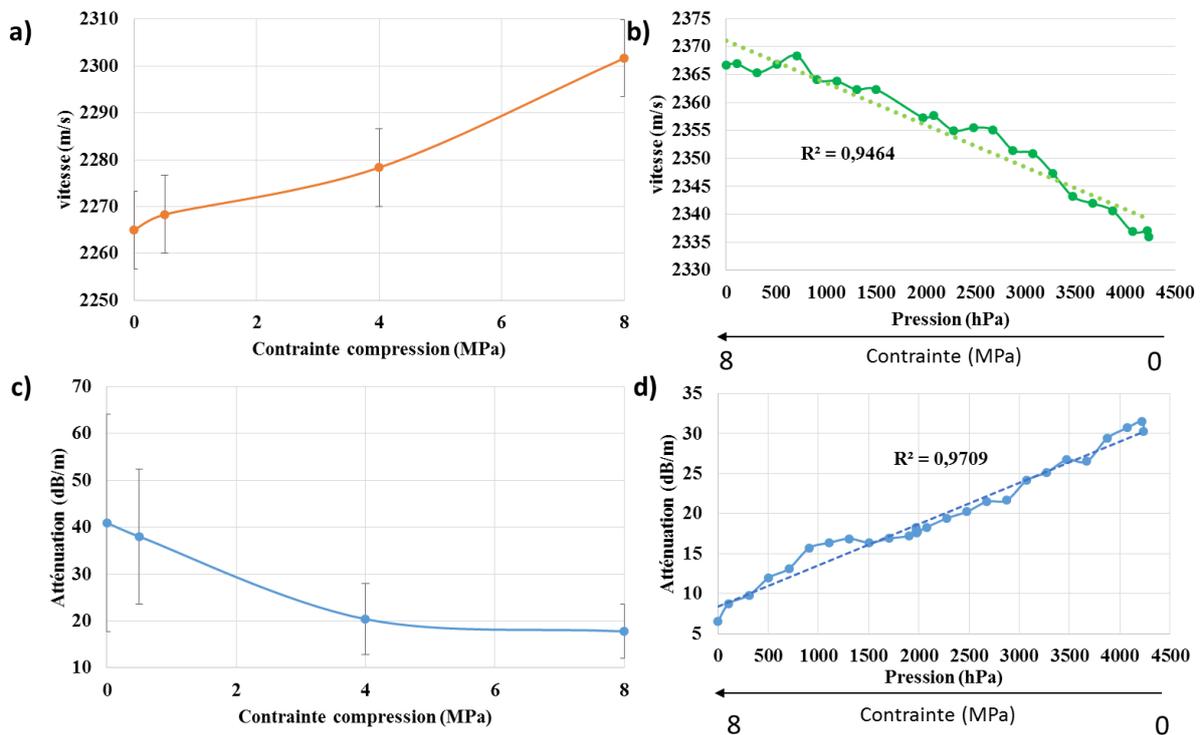


Figure V-20 : a),c) test de compression au laboratoire (cf. V.2) ; b),d) résultats à VerCoRs. a) Variation de vitesse obtenue au test de compression de la dalle. b) Vitesse de groupe des ondes de surface en fonction de la pression ; c) Variation d'atténuation obtenue au test de compression de la dalle; d) atténuation des ondes de surface en fonction de la pression

L'atténuation semble évoluer de la même façon que la pression injectée. La variation de l'atténuation est d'environ 30 dB/m. La variation est supérieure à celle obtenue au test de compression sur la dalle (figure V-20c, 20 dB/m), mais elle reste dans les mêmes ordres de grandeur. La relation entre l'atténuation et la pression injectée est ici quasi linéaire, avec 97 % pour le coefficient de corrélation.

En conclusion, les résultats obtenus permettent de supposer que lors du gonflement de l'enceinte, les microfissures présentes à la surface auscultée s'ouvrent et se développent. Ceci provoque la diminution de la vitesse et l'augmentation de l'atténuation. Notons que ces résultats corrélerent bien avec l'effet de la dégradation du béton par la lixiviation (Chapitre II). La technique des ondes de surface permet alors de suivre la variation de l'état de microfissuration du béton d'une structure (à condition que la zone auscultée ne soit pas (macro)fissurée). On peut supposer que des mesures périodiques effectuées sur une même position de l'enceinte permettraient de suivre l'état de « fatigue » de l'enceinte nucléaire. Notons aussi qu'il est encore une fois confirmé que l'atténuation est très sensible à la dégradation : la variation d'atténuation observée est de 500 % contre 1,3 % pour la vitesse.

V.3.2. Détection des macro-fissures

V.3.2.1. Zone d'expérimentation

Les expériences sur la détection des fissures ont été réalisées dans une zone nommée « T3F » ou « T3 » dans le programme du projet ENDE. Cette zone est caractérisée par la présence des deux grosses fissures visibles à l'œil nu. Les tests d'aspersion ont confirmé que ces fissures sont traversantes.

Etant donnée l'épaisseur du mur (40 cm), c'est le scanner basses fréquences (BF), dont la profondeur de pénétration peut atteindre le fond du mur, qui a été utilisé pour cette étude. Le scanner a été installé le long d'un profil dont la position au regard des fissures est illustrée sur la figure V-21. En utilisant les repères de ce profil, les deux fissures se trouvent respectivement sur les positions 39 cm et 107 cm.

Le plan détaillé de la zone d'expérimentation est donné dans l'Annexe figure A.V.3.2.1. Sur la même zone, la détection des fissures était testée par d'autres méthodes, comme la technique Locadif [Larose et al – 2015] et l'Emission Acoustique [Sbartai et al – 2015].

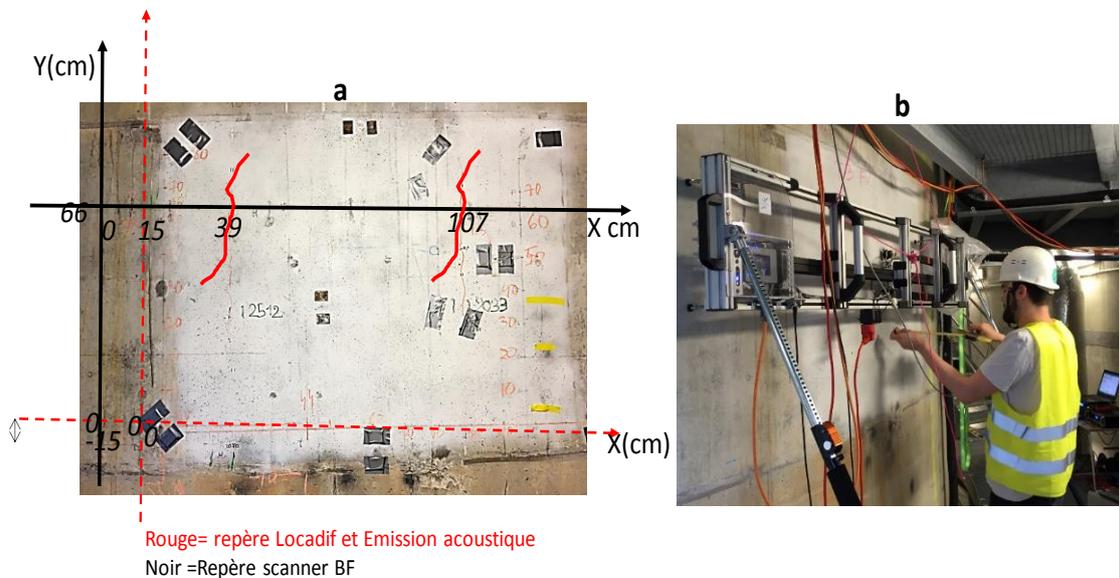


Fig.V-21 : a) Zone d'expérimentation « T3F », le repère utilisé, la position du profil inspecté ; b) le scanner basses fréquences installé sur le mur le long du profil inspecté

V.3.2.2. Test préliminaires juin 2016-mars 2019

Les tests préliminaires avaient pour objectif de tester le scanner dans les conditions de VeRCoRs, et surtout de définir les conditions optimales de son utilisation aux vues de l'imagerie et de la détection de fissures connues. Dans ce paragraphe nous nous limitons aux exemples de tests de base réalisées à VeRCoRs. Les autres tests effectués à l'Ecole Centrale de Lille sont présentés dans l'Annexe A.V. 3.2.2. Des informations complémentaires peuvent aussi être trouvées dans [Ciccarone et al – 2018] et [Piwakowski et al – 2018].

Il faut souligner que le scanner BF a été développé en 2017, et sa mise en fonctionnement nécessitait de nombreuses expériences et modifications. Au début de l'année 2019, les cartes d'émission et de réception ainsi que le PC qui contrôle le scanner ont été remplacés par des exemplaires de meilleure qualité, ce qui a permis d'obtenir les performances souhaitées. La figure V-22 donne un exemple de signal enregistré sur ce profil pour les paramètres de scanner précisés dans le tableau V-6.

Tableau V-6 : Paramètres et réglages du scanner BF pour l'expérience de la figure V-22

Nombre de profils par dalle	Transducteurs utilisés (bandes fréquentielles associées)	Longueur d'un profil L (cm)	Puissance de la source (W)	Ecart entre les points de mesure (cm)	Nombre de points de mesure par profil N	Angle d'attaque β (°)	Forme d'impulsion $W(t)$ et sa longueur en(s)	« Averaging » ou moyennage
1	4x RBT-20 [12 kHz – 45 kHz]	150	15	2	75	8	Chirp gaussien 1.5s	8

L'onde de surface constitue toujours la première onde arrivée, ce qui est indiqué par les lignes pointillées sur la section a) de la figure. Cette onde est suivie par différents signaux dont certains ont des formes hyperboliques, ce qui représente surtout des diffractions sur les gaines de précontrainte verticales. L'interprétation détaillée de ces signaux est relativement difficile et nécessite un travail de modélisation en 3D. Puisque ce n'est pas l'objectif de cette étude, nous nous focalisons sur la première arrivée seulement. Notons que l'instant d'arrivée de l'onde apparaît sur une ligne courbée, ce qui est causé par l'incurvation du mur lui-même. Le retard supplémentaire causé par cette incurvation est mesuré automatiquement (et ajusté dans le calcul) pendant l'acquisition grâce à un capteur laser qui mesure la distance entre le récepteur et la surface de béton. Finalement, le signal de l'onde de surface utilisé pour le traitement est uniquement constitué de la première arrivée, extraite du signal reçu puis « redressée » (l'incurvation est corrigée). Il est illustré sur la section (b) de la figure V-22.

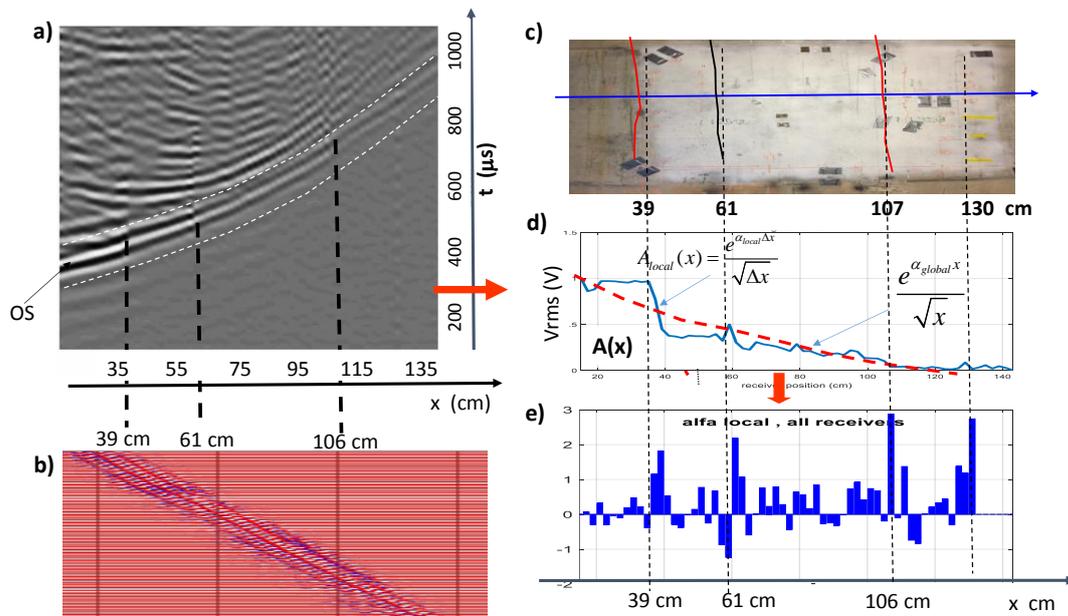


Figure V-22: a) B-scan obtenu pour le profil; b) onde de surface extraite et redressée; c) mur de béton fissure inspecté, et les coordonnées du profil et des fissures; d) évolution de l'amplitude $A(x)$; e) Paramètre alpha local obtenu en fonction de la position du récepteur

Conformément à la méthode développée dans la section V.2, la détection de la fissure peut être réalisée à partir de la fonction $A(x)$, par l'estimation des paramètres W et R (voir les équations (V-2) et (V-3)). En effet, sur la courbe $A(x)$ montrée sur la figure V-22, on peut facilement apercevoir que la première fissure à 39 cm provoque un affaiblissement du signal qu'on peut estimer à $W(x = 39 \text{ cm}) = 15 \text{ dB}$ et que le coefficient de réflexion est difficile à estimer. De plus, un « pic » visible sur la position $x = 61 \text{ cm}$ pourrait suggérer la présence d'un obstacle qui provoque la réflexion (mais sans affaiblissement du signal).

Les questions auxquelles l'opérateur est systématiquement confronté est : quelle doit être la bande fréquentielle du signal chirp émis, quelle fonction enveloppe pour ce chirp, quelle type de source (tweeter) doit être utilisée et enfin quel est l'angle optimal β . Ces paramètres correctement choisis permettront d'obtenir, pour une fissure donnée, l'affaiblissement W et les hauteurs de pic les plus prononcées. De plus, il est important d'obtenir un signal le plus fort possible (en termes de puissance émise) afin de garder un SNR acceptable. Les réponses à ces questions auront nécessité des tests qui sont illustrés sur les figures V-23, V-24 et V-25.

La figure V-23 montre les résultats de la recherche sur la forme de l'enveloppe de chirp optimale, pour une bande fréquentielle B constante [15 kHz – 45 kHz]. Les formes comparées sont un chirp avec le filtre rectangulaire, le filtre Hanning, le filtre Gaussien et finalement le code de Golay avec une fréquence centrale de 30 kHz (voir Chapitre I). A partir de la section e), on peut déduire que les anomalies les plus prononcées pour 39 cm et 61 cm sont observées pour le code de Golay et la fenêtre de Gauss pour le chirp. On peut y observer que la bande fréquentielle exploitable s'étend de 10 kHz à 50 kHz (sections b et d) ce qui donne une longueur d'onde (donc une pénétration) entre 7 cm et 32 cm (section c). La courbe de dispersion est quasi plate, ce qui témoigne d'une bonne homogénéité de béton dans son volume (jusqu'à une profondeur de 32 cm). Le signal le plus fort est assuré par le code de Golay et la fenêtre rectangulaire pour le chirp (section f).

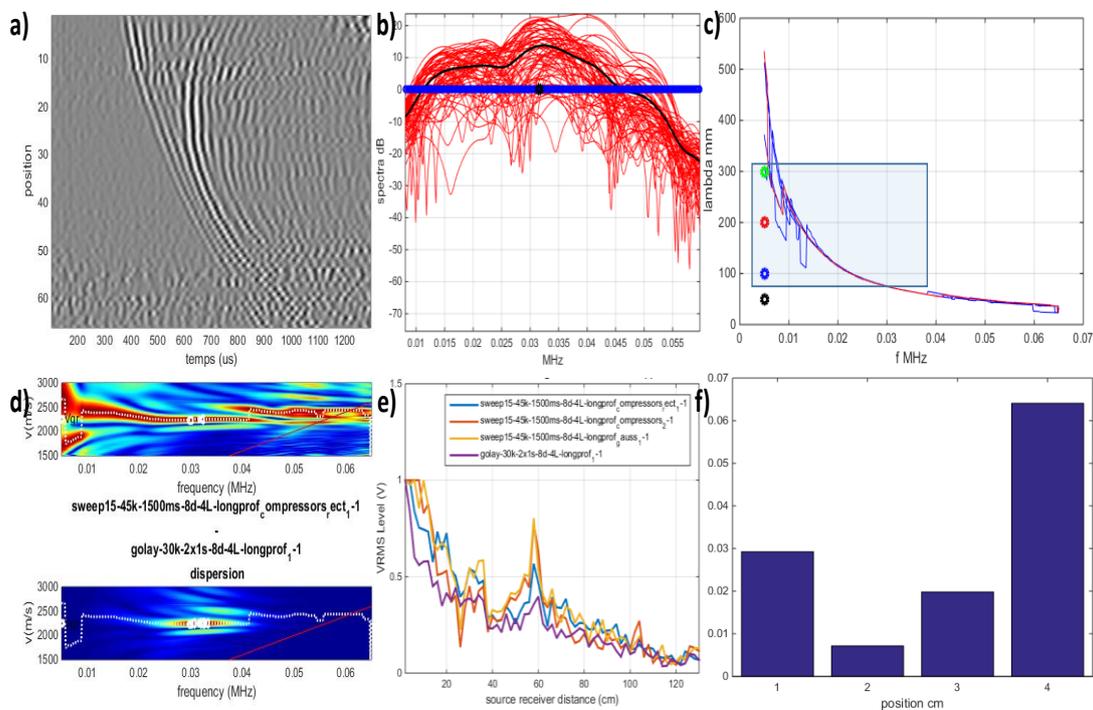


Figure V-23 : Illustration de la recherche de la forme de l'enveloppe de chirp optimale, pour une bande fréquentielle B constante [15 kHz – 45 kHz] – a) B-scan d'un chirp [15 kHz – 45 kHz] avec l'enveloppe $W(t)$ gaussienne; b) spectre associé au signal; c) zone de longueurs d'onde émises; d) Transformation Slant-Stack de la dispersion de la vitesse; e) Comparaison des amplitudes pour les différents signaux et fenêtres testés ; f) Comparaison des niveaux de signal pour les différents signaux et fenêtres testés

La figure V-24 montre l'influence du choix de la bande fréquentielle pour le signal chirp de l'enveloppe Hanning. On peut en déduire que la bande affecte effectivement la forme de la fonction $A(x)$ (section d) et affecte le niveau de signal (section c) et que les bandes $B = [12 \text{ kHz} - 40 \text{ kHz}]$ et $B = [10 \text{ kHz} - 40 \text{ kHz}]$ semblent donner les meilleurs résultats (variations de $A(x)$ les plus grandes, ainsi que les niveaux de signal les plus grands). La caractéristique de dispersion est encore une fois parfaitement plate.

La figure V-25 montre les résultats de l'influence du choix du type de tweeter (cf. Chapitre I). On peut en déduire que le tweeter MHT-12 est le plus performant.

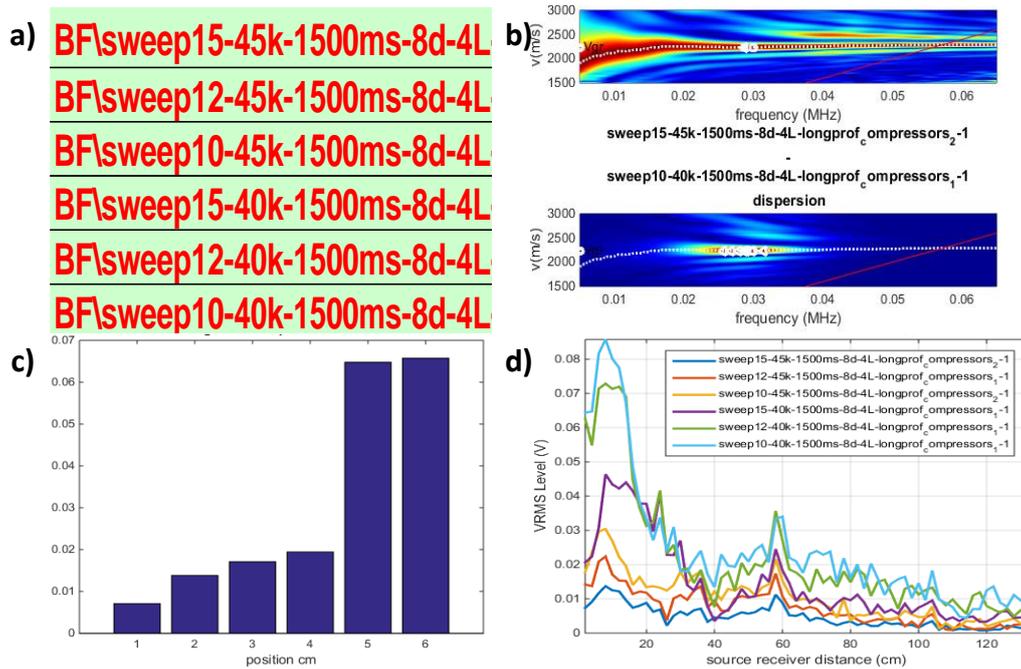


Figure V-24: Recherche de l'influence du choix de la bande fréquentielle pour le signal chirp de l'enveloppe Hanning – a) Les différentes bandes fréquentielles comparées; b) Transformation Slant Stack de la dispersion de la vitesse pour l'un des signaux ; c) Comparaison des niveaux de signal pour les différentes bandes fréquentielles testées ; d) Comparaison des amplitudes des signaux pour les différentes bandes fréquentielles testées

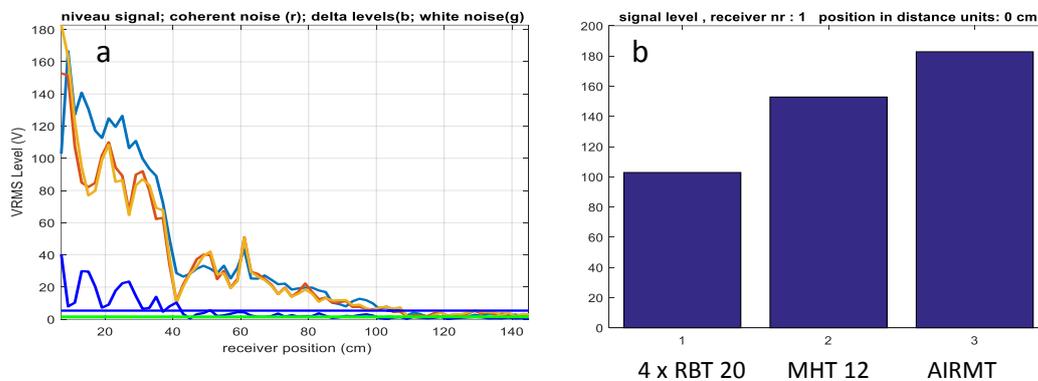


Figure V-25 : Recherche de l'influence du type de tweeter – a) Comparaison des amplitudes des signaux pour le même signal émis à partir de tweeters différents ; b) Comparaison des niveaux de signal pour le même signal émis à partir de tweeters différents

V.3.2.3. Résultats des épreuves de pression en mars 2017 et 2019

La détection visuelle et « manuelle » des paramètres W et A , qui témoignent de la présence d'une fissure, a pour défaut que leur détermination est subjective et n'est pas adaptée à la comparaison de données volumineuses comme pour les résultats de test en pression, où les mesures sont effectuées plusieurs fois. Pour corriger cela, trois nouveaux paramètres ont été introduits :

1. La variation de $A(x,i)$ au regard de la fonction $A(x, i_{ref})$ ou i indique le numéro d'enregistrement et i_{ref} est le numéro de signal de référence (à priori le signal enregistré à l'étape 0 des épreuves), corrigé par la grandeur $1/A_{ref}(x)$

$$\Delta(x, i) = \frac{A(x,i) - A(x, i_{ref})}{A_{ref}(x)} \text{ où } A_{ref}(x) = A_{x0} \frac{e^{-\alpha_{global}x}}{\sqrt{x}} \quad (V-4)$$

Notons que $A_{ref}(x)$ représente la décroissance théorique monotone moyenne du signal déterminée à partir α_{global} , ce qui veut dire que le facteur $1/A_{ref}$ compense cette décroissance. Cette fonction devrait exprimer les variations de l'amplitude de l'onde de surface dans le volume inspecté suite aux variations de pression interne.

2. « L'activité » du volume de béton inspecté, qui exprime la variation relative de $A(x,i)$ au regard de la fonction $A(x, i_{ref})$:

$$A_c(x, i) = \frac{A(x,i) - A(x, i_{ref})}{A(x, i_{ref})} \quad (V-5)$$

Cette fonction devrait exprimer la sensibilité de l'amplitude de l'onde de surface dans le volume inspecté aux variations de pression interne et la modification éventuelle des fissures (ouverture, fermeture).

3. L'atténuation locale « alpha local » α_{local} , qui caractérise la pente instantanée de la fonction $A(x)$ selon l'équation :

$$A_{local}(x) = \frac{e^{-\alpha_{local}\Delta x}}{\sqrt{\Delta x}} \quad (V-6)$$

Ainsi ce paramètre est lié directement avec l'affaiblissement W .

Un exemple de α_{local} issu de la fonction $A(x)$ de la figure V-22d est montré sur la section e) de cette figure. Effectivement on peut observer que ce paramètre affiche des maxima aux positions des fissures à 39 cm et 107 cm. Le pic observé sur 61 cm est aussi détecté et on détecte en plus une fissure à 130 cm (cette dernière fissure n'était pas connue avant cette expérience avec le scanner BF, mais sa présence a été confirmée à posteriori grâce à l'aspersion). Elle n'est pas visible directement sur la courbe $A(x)$ car la résolution dynamique du graphique du plot de $A(x)$ n'est pas suffisante.

Notons que $A(x)$ diminue toujours avec la distance et diminue là où il y a des fissures. Par conséquent, à partir d'une distance donnée, le signal peut être trop bruité : autrement dit, le niveau de signal ne sera pas suffisant pour obtenir une détermination fiable des paramètres Δ , A_c et α_{local} . C'est pour cela que le programme du traitement surveille le niveau de bruit en fonction de la distance x et élimine les résultats si le SNR n'est pas suffisant.

La figure V-26 résume les résultats obtenus pendant les campagnes de mesures en 2017 et en 2019 pour la phase montante de pression. Les mesures étaient effectuées automatiquement avec une cadence d'une heure avec un arrêt au maximum de pression. Cet arrêt était imposé par les tests d'aspersion et il fallait arrêter le scanner et le protéger contre l'eau aspergée. Notons qu'en 2017, la protection n'était pas suffisante, le système de contrôle du moteur a été endommagé et c'est pour cela que la figure présente les résultats uniquement pour la phase montante. La variation Δ , l'activité A_c et alpha-local α_{local} sont présentés en couleurs en fonction de la position x sur le profil et en fonction du temps (en heures). La pression croissante y est indiquée symboliquement sur le côté gauche.

L'analyse de cette figure permet de conclure qu'effectivement, l'augmentation de pression provoque une modification de la fonction $A(x)$, mais aucun des indicateurs définis c'est-à-dire les variations Δ , l'activité A_c et alpha local α_{local} ne donnent d'image dont l'interprétation pourrait être évidente. Par contre, on peut souligner que la majorité de ces fonctions affichent bien les fissures à 39 cm, 107 cm et 130 cm, l'anomalie à 61 cm, et certaines affichent également les gaines verticales de précontrainte (cf. figure de l'Annexe A.V.3.2.1) qui se trouvent à une profondeur de 20 cm.

L'analyse détaillée des résultats et des signaux ainsi que des nombreux tests, dont les tests de mesures automatiques simulant des épreuves à VeRCoRs sont présentés dans l'Annexe figure A.V.3.2.3, a montré que mis à part les enregistrements relativement proches de la source, les signaux étaient trop bruités et non répétitifs, et que le bruit de non-répétitivité était généré surtout par un fonctionnement instable et non répétitif des cartes électroniques utilisées pour l'émission de chirps et pour la numérisation des signaux. Cela était sans importance pour un profil seul, mais constituait un problème majeur pour le fonctionnement automatique avec arrêts consécutifs.

Grâce au financement complémentaire lié au prolongement du projet ENDE, la partie « hard » du scanner a été remplacée en 2018 par des composants de meilleure qualité et tous ces vices observés ont disparus. La qualité des signaux a également permis d'améliorer le traitement des données. Grâce à cela, la fonction « alpha local » obtenue pour 2019 donne des résultats très différents par rapport à 2017 (comparer le

paramètre alpha local, sections 2017 et 2019 sur la Figure V-26). Les anomalies susceptibles d'être interprétées comme des fissures se présentent clairement sous la forme de lignes verticales. On y aperçoit les fissures traversantes sur les positions 39 cm, 107 cm et 130 cm. Sur la position 61 cm on observe un phénomène très fort mais sur cette position, aucune fissure n'est connue. On y observe également d'autres lignes qui peuvent présenter des fissures moins prononcées et/ou la position des gaines de précontrainte. On peut aussi apercevoir l'augmentation de alpha local ($x = 39$ cm) avec la pression, ce qui traduit l'ouverture croissante de cette fissure.

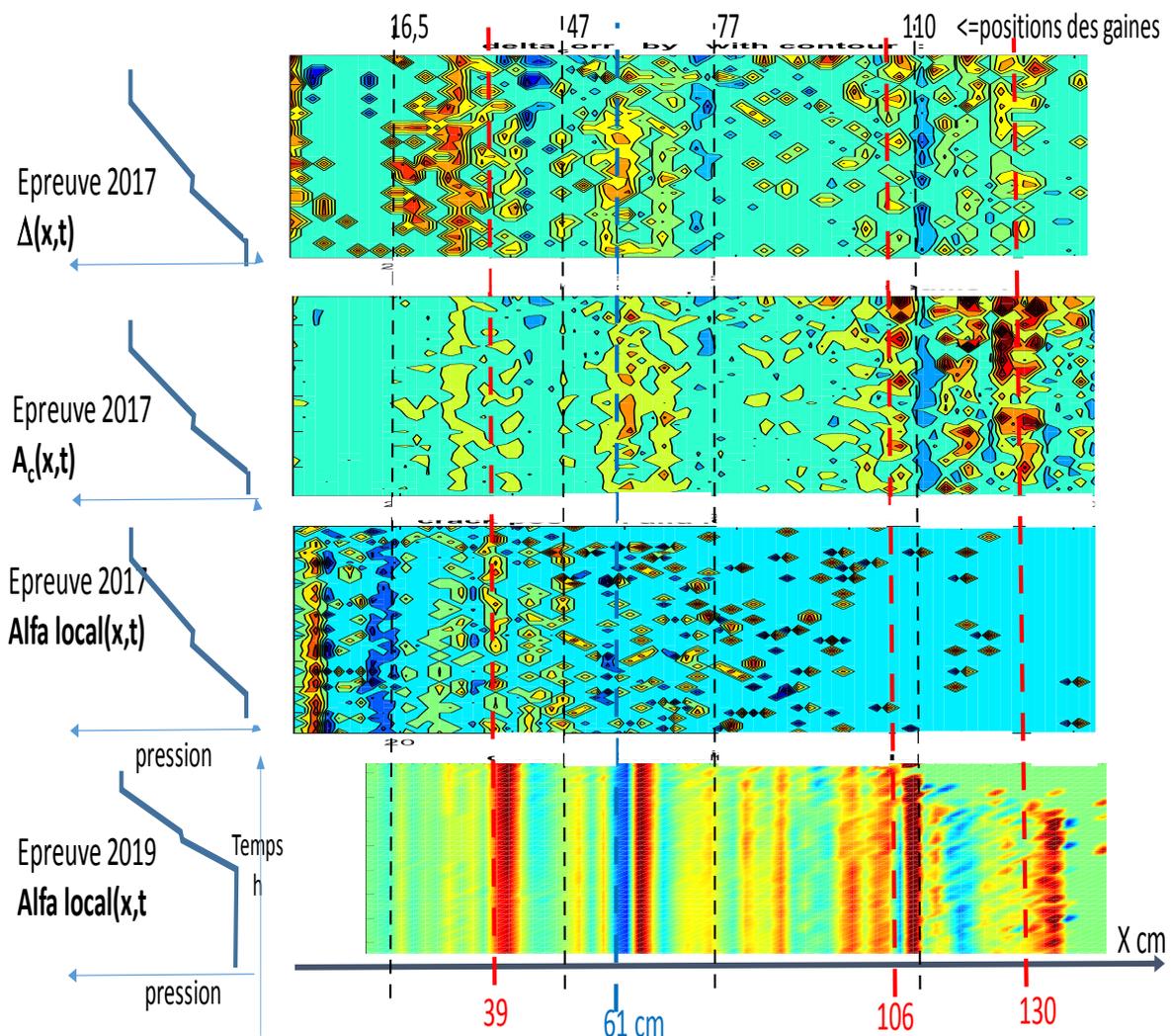


Figure V-26 : Résultats obtenus à Vercors en mars 2017 et 2019 pour la phase montante de pression

Enfin, la figure V-27 résume les résultats de la détection des fissures obtenus en 2019 avec le scanner amélioré. Avec l'échelle de couleur appliquée, il est visible que α_{local} évolue en fonction de la pression. Il est clairement visible que la fissure à $x = 39$ cm s'ouvre avec la pression et ensuite se referme lorsque la pression revient à zéro.

Avant d'analyser en détail α_{local} pour les défauts détectés, il est intéressant d'analyser le bruit de fond qui est suivi et enregistré par le scanner pendant les mesures. Figure V-28 montre que le bruit augmente lorsque la pression augmente (car il est généré surtout par les turbulences d'air passant par les fissures). On constate une dépendance quadratique du bruit en fonction de pression ceci suggère que le bruit est proportionnelle au débit d'air (ce qui pourrait être envisagé pour les mesures de débit de fuites). Le bruit est plus important durant la descente en pression (peut-on envisager de l'utiliser comme un indicateur de vitesse d'écoulement, de débit d'air ?).

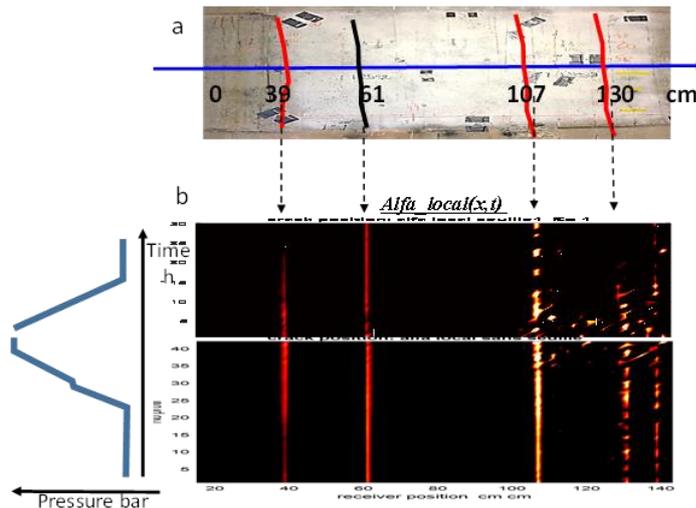


Figure V-27: Évolution du paramètre alpha local en fonction du temps pour les fissures à 39 cm, 61 cm, 107 cm et 130 cm (campagne de mesure sur VeRCoRs en mars 2019, phase montante et descendante en pression)

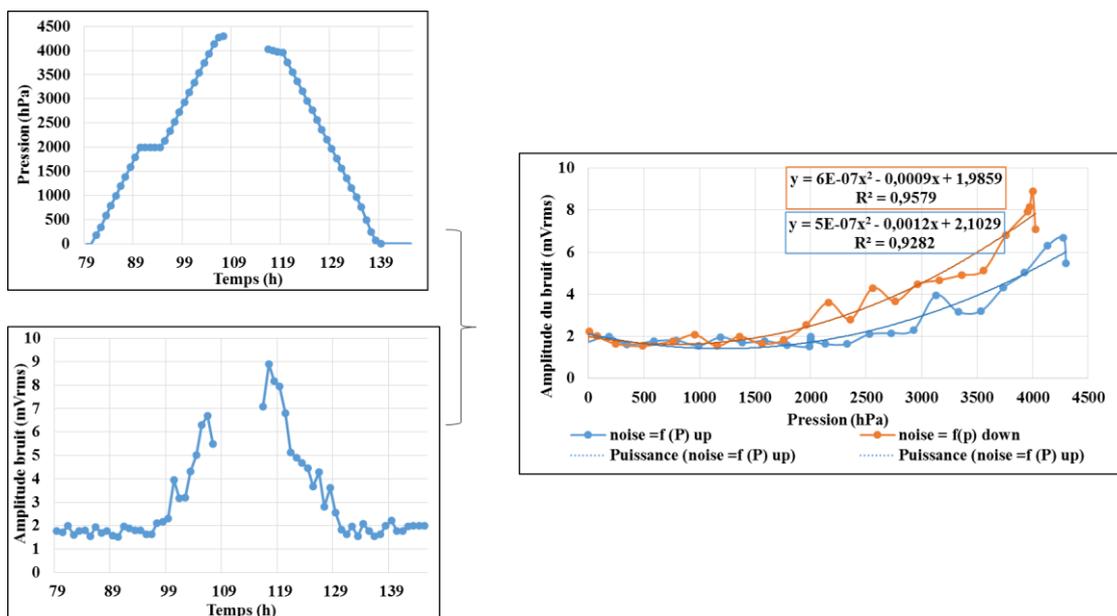


Figure V-28 : Mesure du bruit de sifflement et corrélation avec la pression injectée

Le bruit de sifflement perturbe de façon considérable les mesures (car celles-ci sont sans contact), surtout lorsque la pression atteint le sommet.

Enfin, au cours de la construction de la maquette VeRCoRs, des câbles de fibres optiques ont été placés au moment du coulage du béton. Ils sont connectés à des sondes opto-électroniques permettant de mesurer directement une ouverture de fissure (FO) exprimée en μm (voir [Henault et al – 2018]).

Afin de vérifier comment α_{local} est lié avec l'ouverture de la fissure, les ouvertures de fissure mesurées par fibres optiques (FO) à une profondeur de 30 cm sont comparées avec α_{local} , pour la fissure principale à la position de $x = 39$ cm. La comparaison est montrée sur la figure V-29, et l'analyse de cette figure montre que :

- Autant l'ouverture de fissure (FO) (figure V-29d) qu'alpha local α_{local} (figure V-29e) sont corrélés avec la pression injectée ; la corrélation de l'ouverture de fissure est excellente ($R = 0,99$, figure V-29d)
- Le paramètre α_{local} est perturbé par le bruit généré par l'air s'échappant des fissures ouvertes ; ce bruit apparaît sur les mêmes intervalles de fréquence que celles des ondes de surface, et son « sifflement » est audible par l'oreille humaine ; puisque le bruit augmente considérablement avec la pression, les perturbations de α_{local} apparaissent surtout pour les grandes pressions (figure V-29c) ; c'est pourquoi la corrélation entre α_{local} et la pression est plus faible ($R = 0,79$, figure V-29e) ; en revanche, si la corrélation est recherchée uniquement pour des pressions inférieures à 3000 hPa, le coefficient de corrélation se rapproche de 0,9.
- Enfin, la corrélation de α_{local} avec FO (figure V-29f) est plutôt bonne pour les faibles pressions ($P < 3000$ hPa, $R = 0,88$ ou $R = 0,8$ suivant que la pression croît ou décroît), et se dégrade au fur et à mesure que la pression augmente, à cause du bruit générant des perturbations pour alpha local ($R = 0,64$ ou $R = 0,68$ suivant que la pression croît ou décroît).

Globalement, la figure V-29 montre que α_{local} est proportionnel à l'ouverture de la fissure, ce qui suggère qu'il peut être utilisé pour détecter et suivre quantitativement l'ouverture d'une fissure. On peut remarquer que les 2 paramètres α_{local} et FO observent un décalage entre la fin de la croissance de la pression et le début de sa décroissance. Ce phénomène est causé par un retard dans la fermeture de la fissure, ce qui induit une sorte d'hystérésis pour l'ouverture de la fissure.

Il est également intéressant d'analyser le paramètre α_{local} pour les positions $x = 61$ cm et $x = 107$ cm (fissures connues). La figure V-30 montre que α_{local} pour $x = 61$ cm diminue légèrement, ce qui indique que le comportement de cette anomalie est différent que celui de la fissure à 39 cm. Les variations de la fissure à 107 cm sont difficiles à observer car elle se trouve à l'extrémité du profil, le signal y est faible et le SNR y est défavorable. La situation est la plus critique au maximum de la pression, c'est pour cela que plusieurs points y sont automatiquement éliminés (courbe orange).

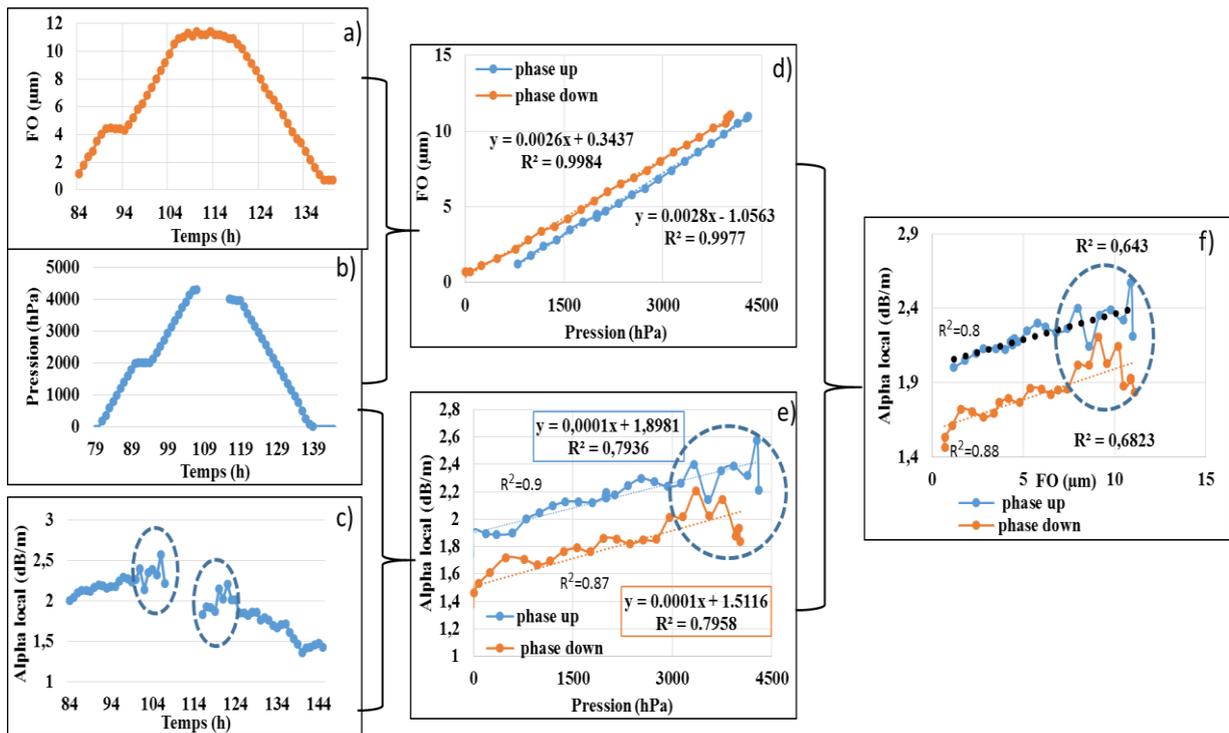


Figure V-29: Investigation d'une fissure localisée à $x = 39$ cm au cours d'un test de pression; a) FO en fonction du temps pour cette fissure; b) évolution de la pression en fonction du temps; c) alpha local en fonction du temps pour cette fissure; d) corrélation entre FO et la pression pour les phases de montée et descente en pression; e) corrélation entre alpha local et la pression pour les phases de montée et descente en pression; f) corrélation entre alpha local et FO pour cette fissure ($x = 39$ cm)

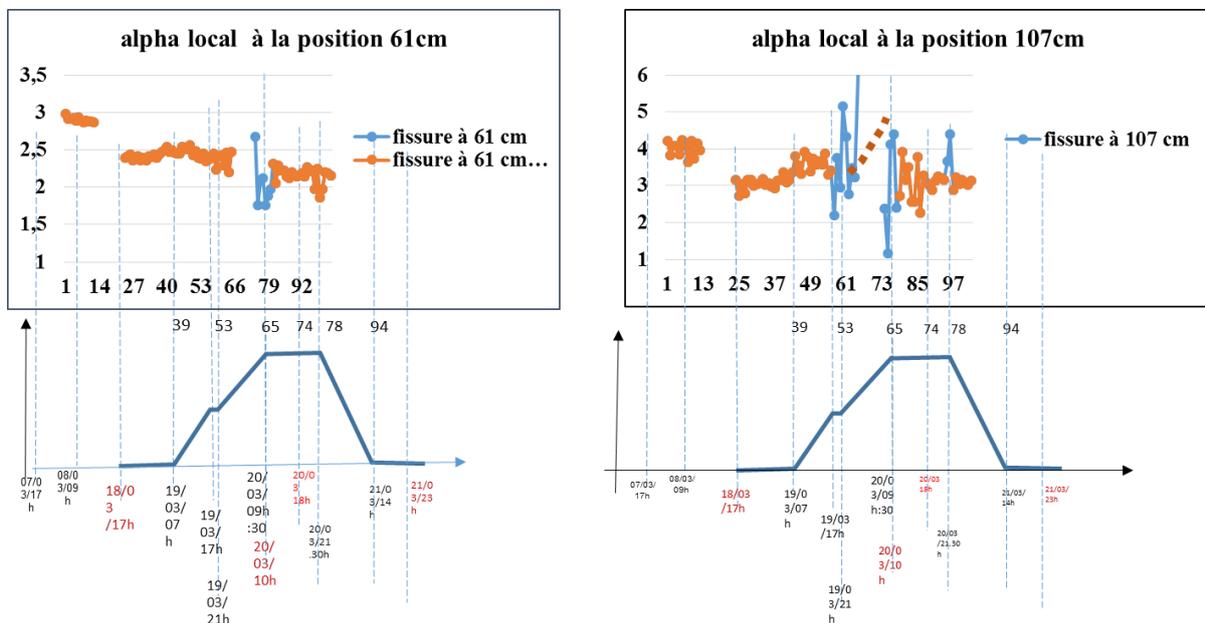


Figure V-30 : Alpha local pour les positions 61 cm et 107 cm ; les traces bleues indiquent la valeur « brute » ; les traces orange présentent alpha local après élimination des résultats pour lesquels le SNR n'était pas suffisant

L'amélioration de la qualité de la mesure suite aux modifications du scanner est également confirmée sur la figure V-31, qui montre la vitesse de l'onde de surface (vitesse globale obtenue à partir de la caractéristique de dispersion) en fonction de la pression. La courbe obtenue en 2019 est clairement plus régulière. Les perturbations de la courbe obtenue en 2019 sont plus faibles que celles en 2017 grâce à la qualité du signal. Pour 2019, les perturbations augmentent uniquement pour la pression maximale (voir figure V-28). Par ailleurs, on peut noter une diminution de la vitesse en 2019 par rapport à 2017: cela pourrait être parce que le béton s'est « fatigué » suite aux épreuves consécutives, dans la mesure où une épreuve simule un vieillissement de 10 ans du béton. Notons également que ce résultat s'accorde avec celui obtenu dans la zone T2 avec le scanner HF (la vitesse de 40 m/s diminue avec la pression). Il est intéressant de comparer ces résultats avec ceux présentés dans l'Annexe figure A.V.3.2.3.3.f, où le mur dans des conditions stables affiche une vitesse constante.

Enfin, il est intéressant de confronter la vitesse globale, analysée sur la figure V-31, avec l'ouverture de la fissure à $x = 39$ cm, donc avec $\alpha_{\text{local}} (x = 39 \text{ cm})$. Cette confrontation est montrée sur la figure V-32 et montre qu'effectivement la vitesse est bien corrélée avec la pression et l'ouverture de la fissure (FO). Ceci montre que la vitesse globale traduit non seulement l'état de microfissuration (ce qui constituait notre conclusion du paragraphe V.2) mais également la présence de macro-fissures.

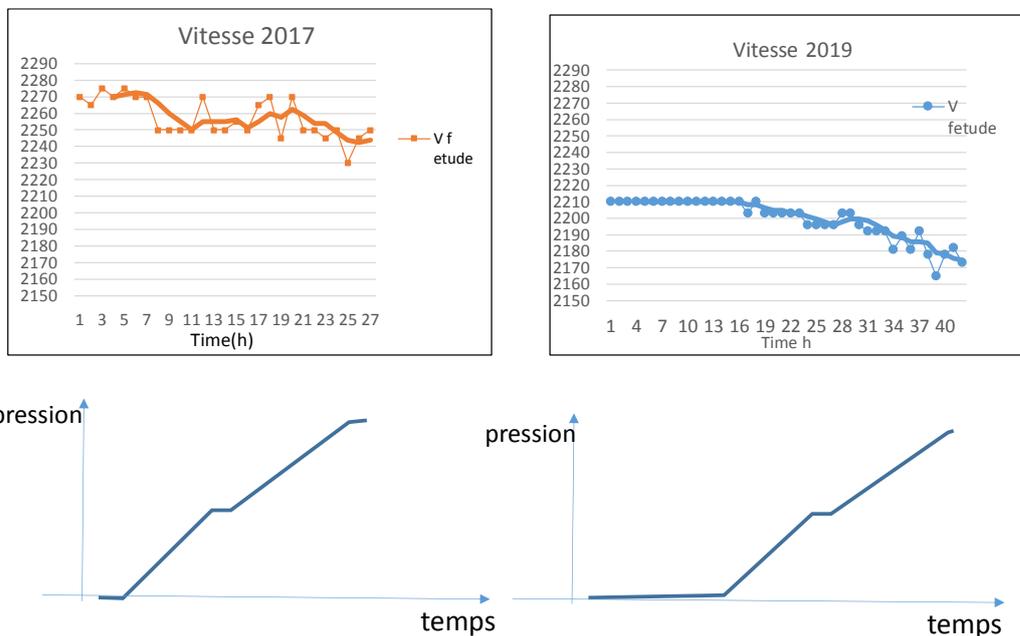


Figure V-31 : Vitesse d'onde de surface en fonction de la pression. Epreuves 2017, et 2019 ; la phase montante de pression

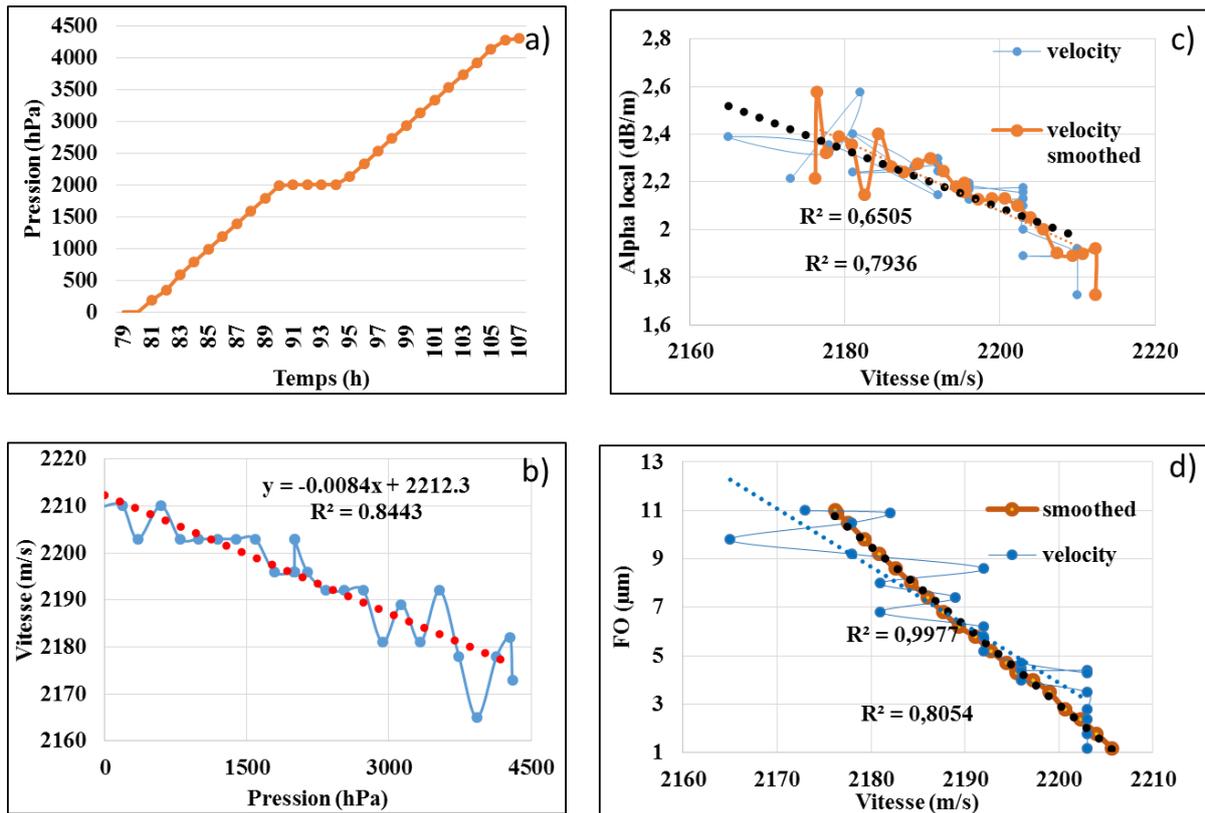


Figure V-32 : Épreuves 2019 phase de montée en pression ; Observable : la vitesse en fonction de la pression et sa corrélation avec FO et alpha local pour la fissure à 39 cm

V.4. Conclusions

Les expérimentations et le développement de matériel dans la cadre du projet ENDE nous ont permis de tester deux scanners à ondes surface dont le premier (HF) est adapté à l'auscultation de la peau du béton et le deuxième (BF) à l'auscultation du mur entier. Les tests effectués dans ce Chapitre ont mis en évidence une pénétration maximale des ondes de 60 cm. Donc la version actuelle du scanner BF peut atteindre, et donc caractériser le béton sur une profondeur de 60 cm. La caractéristique commune des deux scanners est qu'ils opèrent sans contact avec la matière auscultée, ce qui permettrait à l'avenir l'auscultation automatique de surfaces plus grandes comme les murs d'enceintes nucléaires.

Les résultats obtenus prouvent leur utilité dans le suivi du béton pendant les épreuves en pression dans l'enceinte de VeRCoRs. Ils permettent de suivre des paramètres mécaniques globaux comme la contrainte et la microfissuration (à travers la vitesse et l'atténuation d'onde dans le volume inspecté) et de détecter des anomalies locales comme les macro fissures, et même de suivre leur ouverture.

Lors du gonflement de l'enceinte, les microfissures présentes à la surface auscultée s'ouvrent et se développent. Ceci provoque la diminution de la vitesse et l'augmentation de l'atténuation. Ces résultats corréleront bien avec l'effet de la dégradation du béton par la lixiviation (Chapitre II). La technique des ondes de surface permet alors de suivre la variation de l'état de microfissuration du béton d'une structure (à condition que la zone auscultée ne soit pas (macro)fissurée). On peut supposer que des mesures périodiques effectuées sur une même position de l'enceinte permettraient de suivre l'état de « fatigue » de l'enceinte nucléaire. Il est encore une fois confirmé que l'atténuation est très sensible à la dégradation : la variation d'atténuation observée est de 500 % contre 1,3 % pour la vitesse.

Il a été montré que l'onde de surface permet de détecter une zone d'endommagement thermique et des macros fissures. Les paramètres proposés R et W puis α_{local} permettent même de quantifier le défaut détecté. Il est démontré que c'est surtout le paramètre α_{local} qui corrélerait bien avec l'ouverture de la fissure (mesurée par fibre optique) – particulièrement lorsque le bruit généré par la fuite d'air par les fissures est absent). Ainsi, le scanner BF (HF à priori aussi) pourrait avoir la même fonction que les fibres optiques dans les structures n'ayant pas été équipées de fibres optiques (l'immense majorité des structures actuelles).

Notons le scanner BF démontre sa capacité à détecter de très faibles ouvertures de fissures (quelques micromètres). Cela justifierait son utilisation sur le parc nucléaire, ainsi que sur les autres structures du génie civil, où les ouvertures sont parfois bien plus grandes (des centaines de micromètres).

Annexes Chapitre V

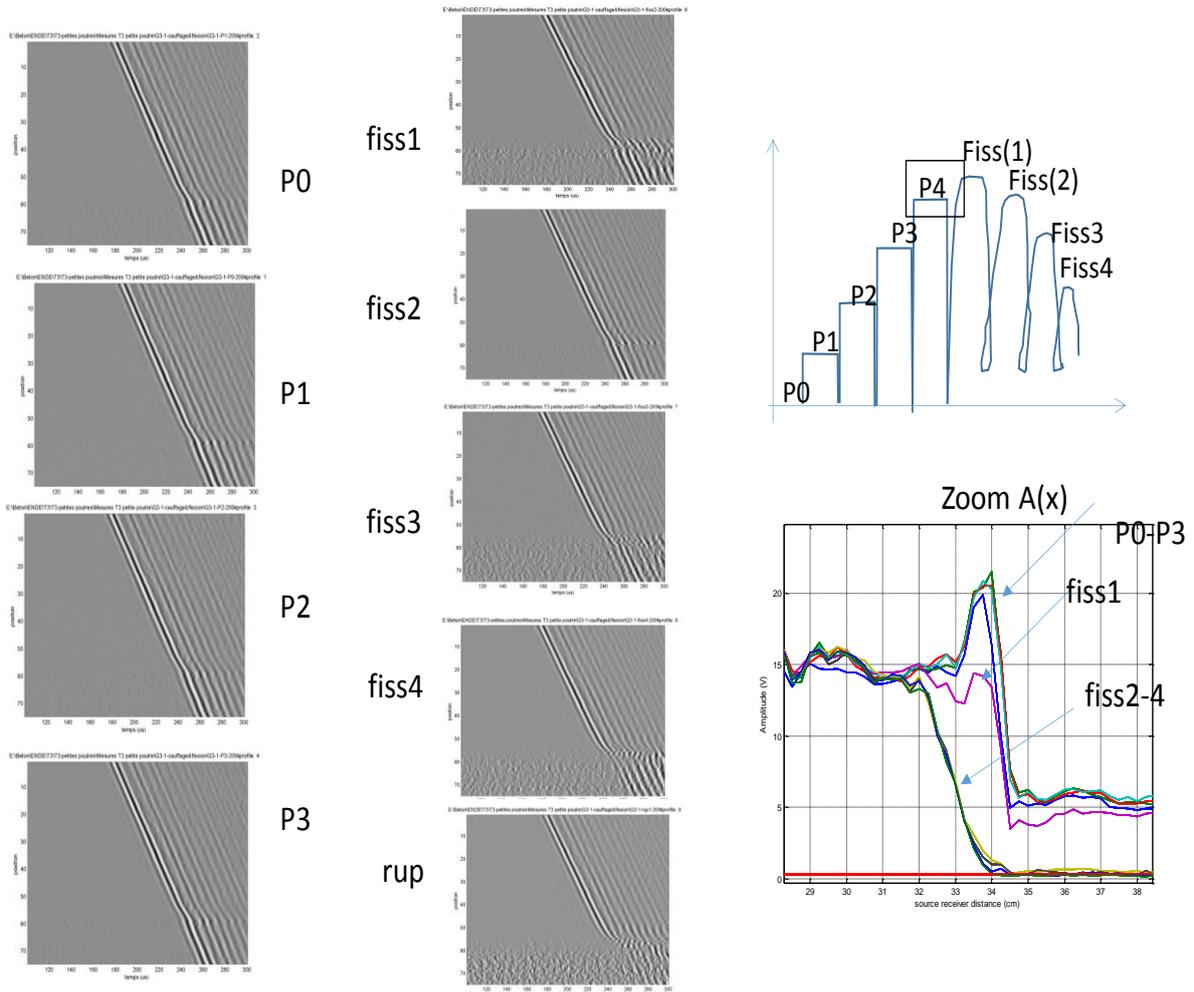


Figure A.V.2.2.1. B-scans des enregistrements correspondant aux phases P0-P4 et Fiss1 – Fiss4, étapes de fissuration et les courbes A(x)

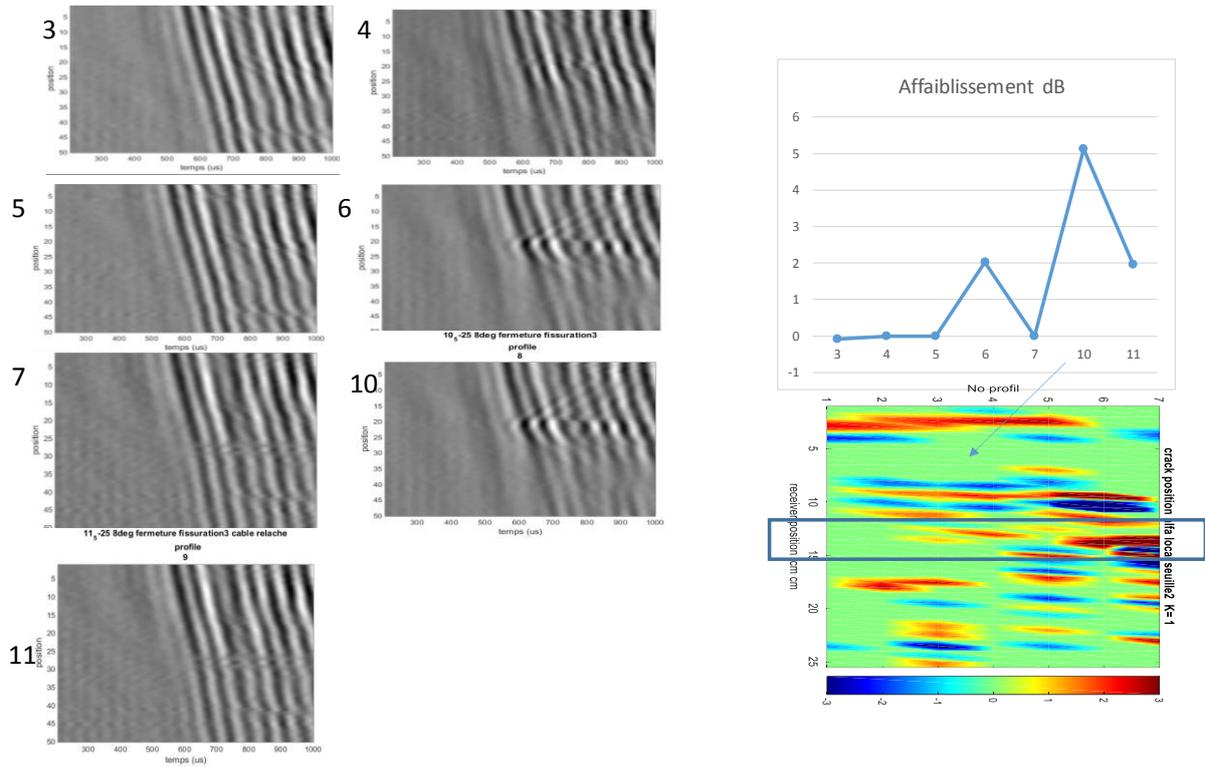


Figure A.V.2.2.2 : B-scans des enregistrements correspondant aux différents phases de fissuration E=[3, 4, 5, 6, 7, 10, 11], Affaiblissement $W(E)$ et paramètre $\alpha_{local}(x,P)$

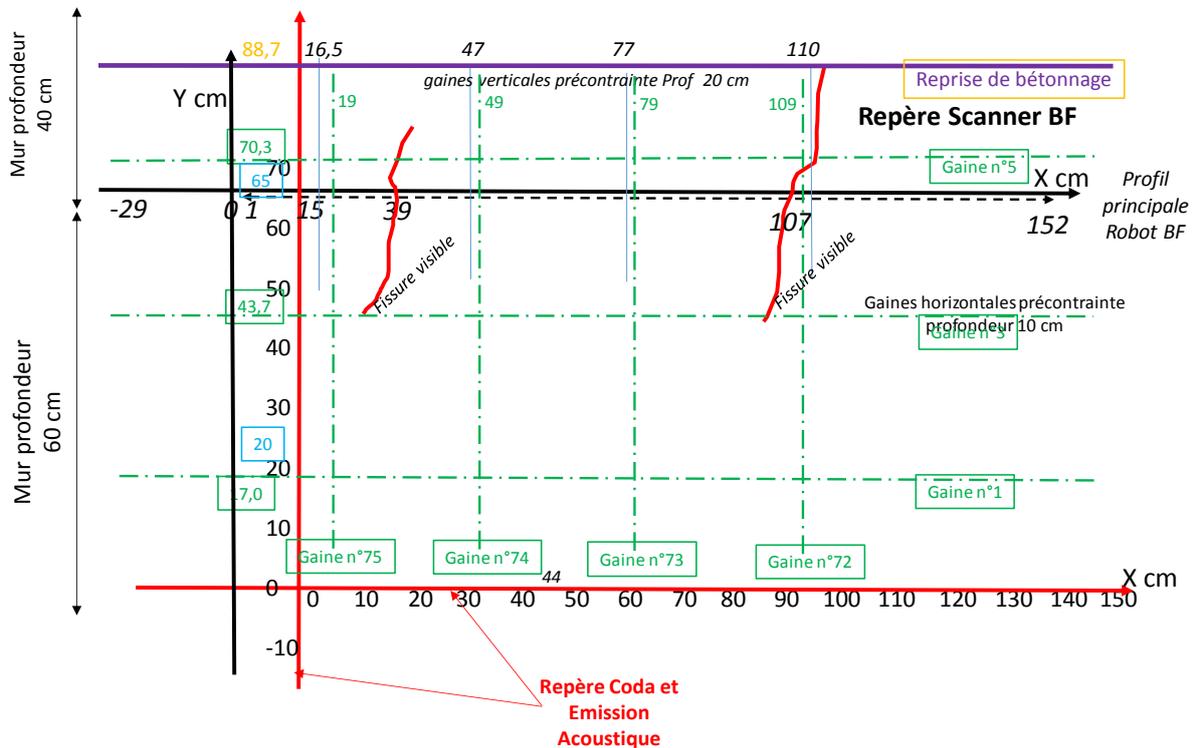


Figure A.V.3.2.1 : Zone d'expérimentation T3V, le repère utilisé, la position du profil inspecté (noir); position et profondeurs des gaines de précontrainte (vert), fissures visibles (rouge), le repère utilisé pour les mesures Coda et Emission acoustique (rouge)

A.V.3.2.2. Test préliminaires du scanner BF

Sur la dalle béton « Labo GC » (2017)

Il s'agit des premiers tests du scanner dont l'objectif était de tester et de vérifier ses fonctions, et de définir le mode opératoire pour les tests in situ. Les tests ont été effectués au laboratoire de Génie Civil de l'Ecole Centrale de Lille, avant la campagne de mesures sur VeRCoRs en 2017. La figure A.V.3.2.2.1 montre le scanner posé sur deux dalles de longueur 2,5 m, de largeur 0,4 m, de hauteur 0,12 m chacune, placées l'une contre l'autre.

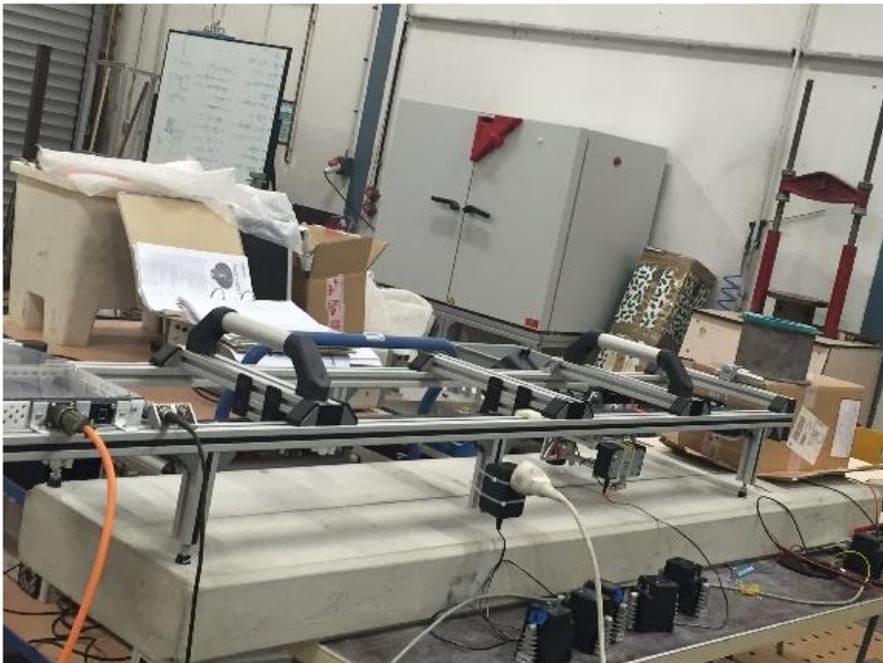


Figure A.V.3.2.2.1: Photo des 2 dalles utilisées pour les tests en laboratoire de génie civil

Choix des tweeters

L'une des questions en suspens était de savoir quelles sont les propriétés des différentes sources d'ondes de surface. Notons que, en l'absence sur le marché de transducteurs ultrasonores opérant dans la bande 2 kHz – 50 kHz (bande d'intérêt pour nos mesures) comme sources, nous avons utilisé des tweeters de hautes fréquences. Ces tweeters sont connus pour leur utilisation dans les enceintes acoustiques et non pour une utilisation dans un scanner à ondes de surface. Ils ne sont pas particulièrement adaptés pour travailler avec des signaux impulsionnels de type chirp. Au départ, une mauvaise utilisation de ces tweeters nous a causé des pannes successives. La figure A.V.3.2.1.2 montre les tweeters utilisés, ainsi qu'un tweeter dont la membrane s'est cassée en raison d'une trop forte pente du signal à ces bornes.

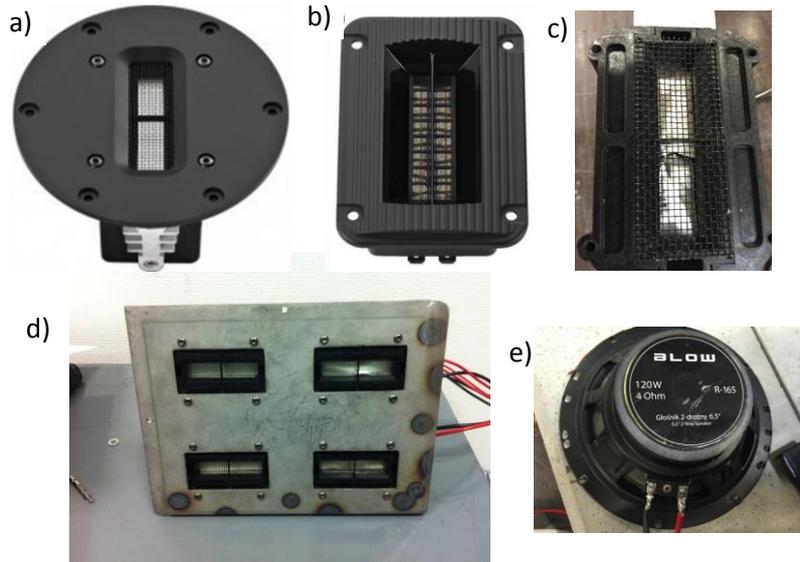


Figure A.V.3.2.2.2 : Tweeters utilisés pour le scanner BF ; a) RBT-20 ; b) RBT-95 ; c) membrane cassée sur RBT-20 ; d) 4 RBT-20 associés sur une platine pour augmenter la puissance du signal émis ; e) AIR-MT

Choix de type de récepteur

Une autre question était le choix du type de récepteur, c'est-à-dire le choix entre un récepteur type BAT utilisé dans le scanner HF et le microphone d'instrumentation large bande (20 Hz – 50 kHz). Une question subsidiaire liée à celle-ci était la façon d'orienter le tweeter qui, dans la majorité des cas, a une forme rectangulaire. L'orientation S permet d'obtenir une meilleure directivité mais l'influence de l'angle β est plus faible. Les résultats sur la figure A.V.3.2.1.3 montrent qu'effectivement le microphone assure un meilleur niveau de signal (car il a une bande fréquentielle de fonctionnement plus étroite) et que la géométrie L est plus avantageuse.

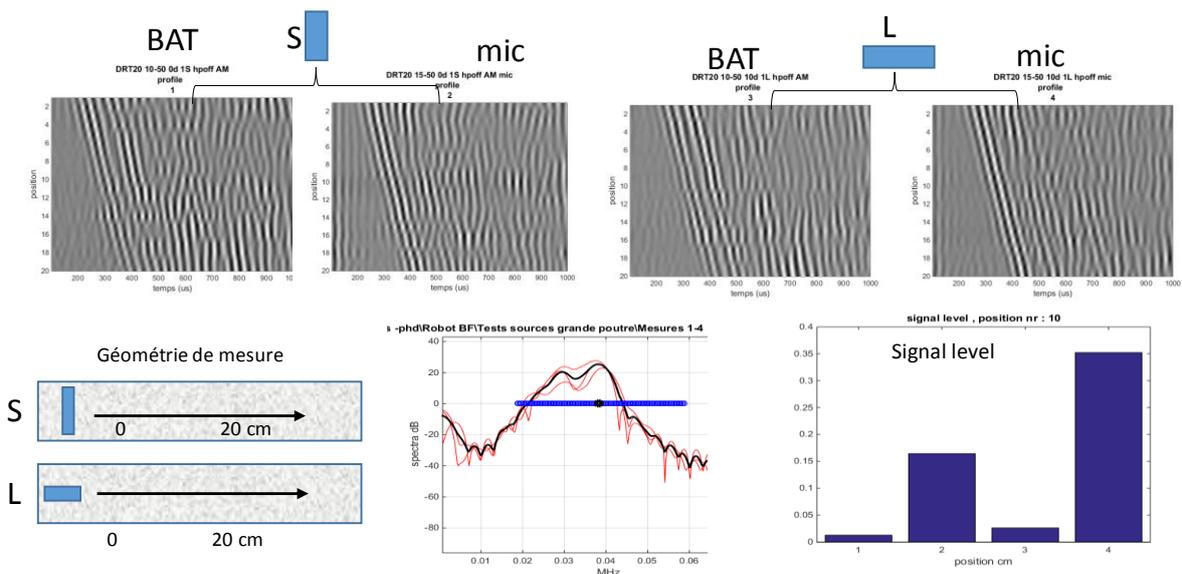


Figure A.V.3.2.2.3: Source tweeter RBT 20; Comparaison des récepteurs type BAT (celui utilisé dans le scanner HF) avec un microphone large bande (20 Hz – 50 kHz), et comparaison des géométries S et L pour l'orientation des tweeters

Profondeur de pénétration

L'objectif du projet ENDE était de réaliser un scanner dont la pénétration serait au moins égale à l'épaisseur du mur de la maquette VeRCoRs c'est-à-dire de 40 cm. La figure A.V.3.2.1.4 montre l'étude complète réalisée avec le hautparleur BLOW, avec la séquence de Golay dans la bande [2 kHz – 18 kHz]. L'atténuation pour des fréquences aussi basses est très faible et cela permet d'observer la propagation de l'onde le long de la dalle. On y aperçoit les multiples « zigzags », ce qui témoigne de plusieurs allers-retours de l'onde le long de la dalle (les réflexions multiples sur les extrémités de la dalle (dont longueur est de 2,5 m). Le traitement de l'onde directe extraite (A.V.3.2.1.4.c) nous permet d'identifier le mode A_0 de la caractéristique de dispersion de l'onde de Lamb. On peut noter une très bonne corrélation de la caractéristique calculée (A.V.3.2.1.4.e) avec celle mesurée (A.V.3.2.1.4.d). La longueur d'onde maximale atteinte (A.V.3.2.1.4.f) est de 60 cm ce qui montre qu'avec un choix adéquat de source, l'objectif de pénétration de 40 cm peut être atteint avec une marge.

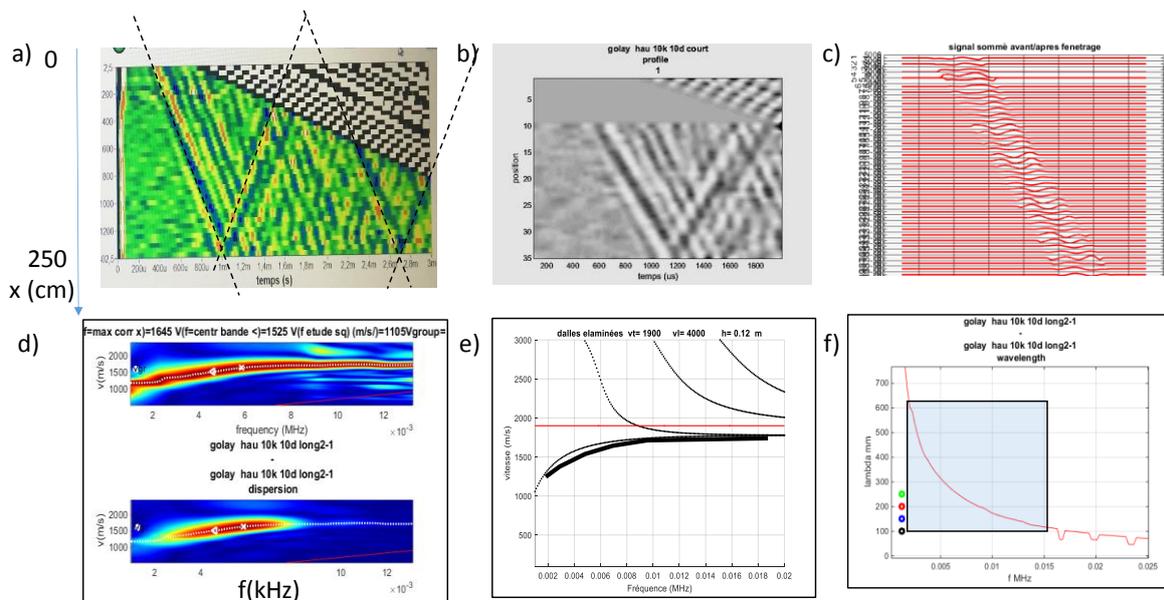


Figure A.V.3.2.2.4 : a) Enregistrement le long de la dalle entière avec signal de Golay $f_c = 10$ kHz, $M = 2$, de bande $B_G = 2$ kHz -18 kHz ; b) zoom du premier zigzag ; c) l'onde directe extraite pour le traitement ; d) caractéristique de dispersion obtenue ; e) caractéristique de dispersion théorique (le mode A_0 de l'onde de Lamb (noir trait plein) comparée à la caractéristique mesurée (noir pointillé) ; f) Longueurs d'onde obtenues

Bande fréquentielle de tweeter RBT-95

Il a été constaté que les bandes fréquentielles annoncées par le fabricant ne correspondent pas forcément à la réalité. La figure A.V.3.2.1.5 montre l'étude de ce problème. Il s'ensuit (en regardant le niveau de signal obtenu) que la fréquence maximale acceptable pour ce tweeter est de 18 kHz (le fabricant déclare une largeur de bande de 30 kHz).

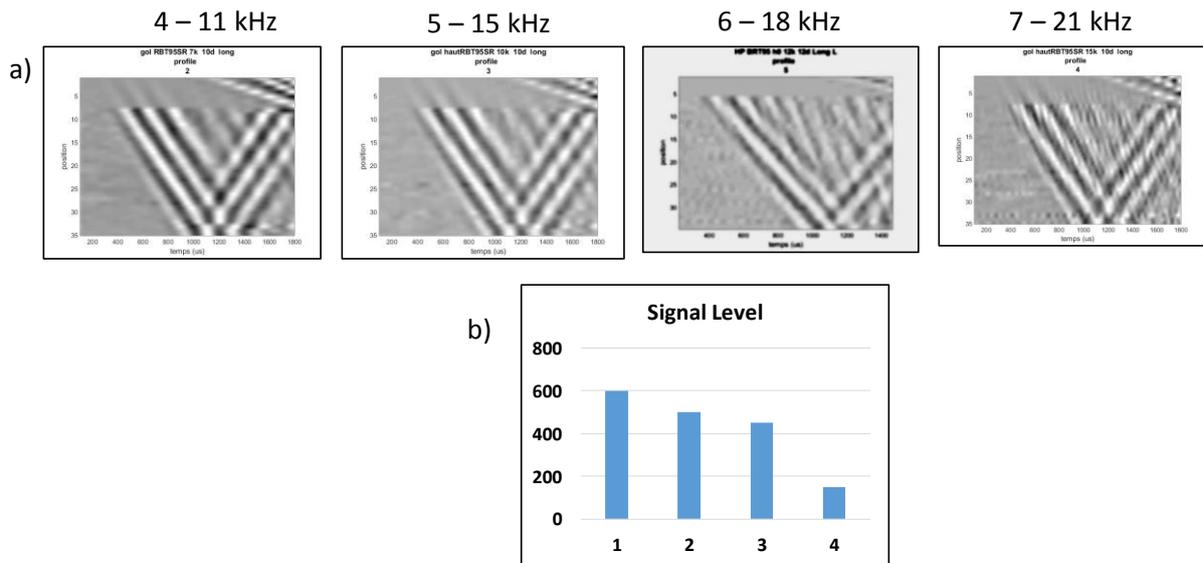


Figure A.V.3.2.2.5 : a) Enregistrement sur un profil de 20 cm avec un signal de Golay pour le tweeter RBT-95 dans différentes bandes fréquentielles ; b) Les niveaux de signal obtenus

A.V.3.2.3 Test des mesures automatiques à l'aide du scanner BF sur le mur « EDF » (2018)

Dans le cadre de tests préliminaires, le scanner BF a été utilisé sur un mur dont la composition était connue. Il s'agit du même mur utilisé pour l'étude du gradient d'humidité présentée dans le Chapitre IV. Le mur contient des diffuseurs de gaz qui avaient été coulés dans un mur de béton de 50 cm d'épaisseur, afin d'effectuer des tests de perméabilité. Ce diffuseur fait 80 cm de long et 40 cm de large, et a été placé à 10 cm de la surface (surface sur laquelle aura lieu l'auscultation acoustique). Comme illustré sur la figure AV.3.2.2.6, il y avait 6 diffuseurs répartis sur une surface de 2,2 m (hauteur) par 2,4 m (longueur).

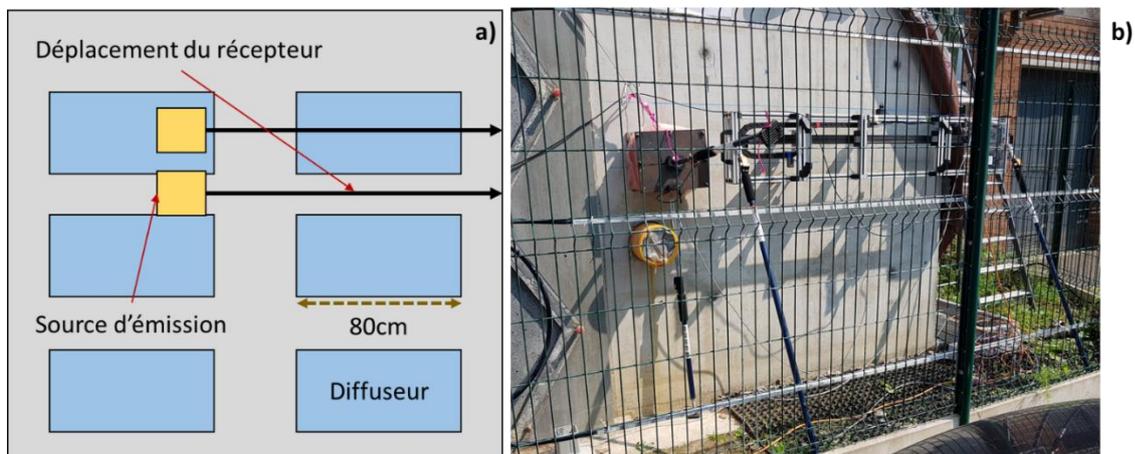


Figure A.V.3.2.2.6: a) Schéma de la section de mur auscultée ; b) photo de la source acoustique et du scanner BF au moment d'une mesure

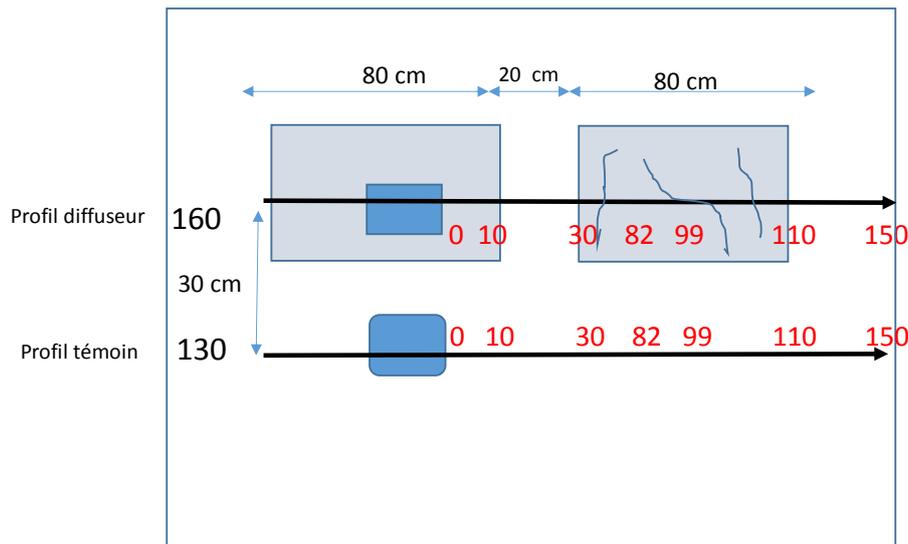


Figure A.V.3.2.2.7: Géométrie détaillée de la zone de mesures

Ce travail avait essentiellement trois objectifs :

- Vérifier si les diffuseurs (qui représentent une forte discontinuité dans le béton car leur impédance acoustique est proche de l'impédance acoustique de l'air) seront « vus » par les ondes de surface
- Vérifier si le diffuseur sera identifié – tester si et comment les paramètres A_C et α_{local} (cf. Eq. (V-6)) le détectent
- Vérifier quelle est la source des bruits et des instabilités observés pendant les épreuves à VeRCoRs en 2017 et 2018

Le scanner a d'abord été placé sur un profil témoin (= profil bas), en dessous duquel aucun diffuseur n'était présent, comme indiqué sur la figure A.V.3.2.2.7, puis sur un profil qui passe au-dessus d'un diffuseur (profil haut). La géométrie détaillée de la zone de mesures est donnée sur la figure AV.3.2.3.7.

Les mesures ont été réalisées de manière automatique avec une cadence d'une heure. La première et deuxième série de mesures sont réalisées sur le profil témoin avec un moyennage (averaging) différent – ce qui a permis de chercher l'origine du bruit qui affecte les mesures (le système fonctionnait pendant une nuit pour chaque série). La troisième série a été effectuée sur le profil qui inclut un diffuseur. Cette série est la plus longue, elle regroupe 36 mesures et a été réalisée pendant un weekend.

Comme le diffuseur se trouve à 10 cm de profondeur, il a fallu choisir les fréquences des ondes émises de telle sorte que les ondes pénètrent au-delà de 10 cm, soit une longueur d'onde maximale supérieure à 10 cm. La vitesse de groupe étant de 2350 m/s, il fallait une fréquence minimale inférieure à 23,5kHz, ce qui justifie le choix de la source 4xRBT-20 (cf. Figure A.V.3.2.2.2). La bande fréquentielle a volontairement été choisie la plus large possible [10 kHz – 50 kHz] par rapport aux capacités des tweeters. Les ondes couvrent ainsi théoriquement la pénétration de 5 cm à 23,5 cm.

Les paramètres et réglages du scanner sur chaque profil sont donnés dans le tableau A.V.1. Notons que les paramètres sont identiques sauf le nombre de moyennages. Une telle stratégie de mesures a été adoptée afin de vérifier quelle est la source des bruits et instabilités observés pendant les épreuves à VeRCoRs en 2017 et 2018.

Tableau A.V.1 : Paramètres et réglages du scanner ; caractéristiques des signaux émis

	Nombre de mesures	transducteurs utilisés (bandes fréquentielles associées)	Longueur d'un profil L (cm)	Ecart entre les points de mesure (cm)	Nombre de points de mesure par profil N	Angle d'attaque $\beta(^{\circ})$	Forme d'impulsion $W(t)$	« Averaging » ou moyennage
Profil témoin 1	21	4x RBT 20 (10-50) kHz	150	2	75	9	Hanning	8
Profil témoin 2	9	4x RBT 20 (10-50) kHz	150	2	75	9	Hanning	32
Profil diffuseur	26	4x RBT 20 (10-50kHz)	150	2	75	9	Hanning	16

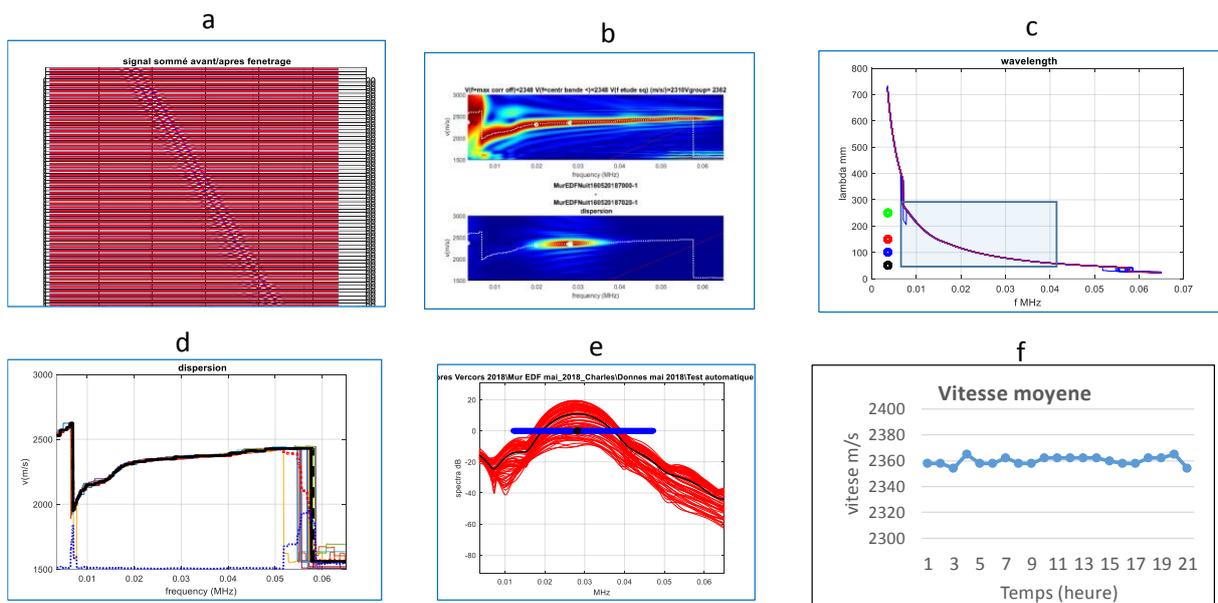


Figure A.V.3.2.3.3 : a) Onde de surface obtenue sur le profil témoin 1, séquence n°1 ; b) transformation Slant-Stack moyennée pour toutes les profils ; c) Intervalle des longueurs d'onde atteintes ; d) Caractéristique de dispersion extraite de la section b) ; e) Spectres des signaux ; f) évolution de la vitesse moyenne de l'onde de surface

La figure A.V.3.2.2.3 résume les résultats de base. On peut conclure que la dispersion de l'onde de surface affiche une pente légèrement croissante, ce qui signifie que la vitesse de l'onde est plus grande à la surface. Cela est contraire à ce que l'on pourrait attendre à la base des résultats présentés dans le Chapitre II, où la courbe de dispersion était décroissante pour le béton. Notons tout de même que la zone fréquentielle de cette étude est différente, donc la pénétration de l'onde est différente.

Une explication possible est que la teneur en eau décroît pour les plus grandes profondeurs, ce qui rejoint les conclusions du Chapitre IV. La section c) indique que l'intervalle des longueurs d'onde atteintes est de 3 cm à 20 cm, il est donc proche des objectifs fixés. La vitesse de groupe en fonction du temps est quasi constante et est égale à 2365 m/s (section f), ce qui est logique car le béton conserve ses paramètres pendant les mesures – contrairement aux résultats obtenus à VeRCoRs pendant les tests de pression (cf. Fig.V-31).

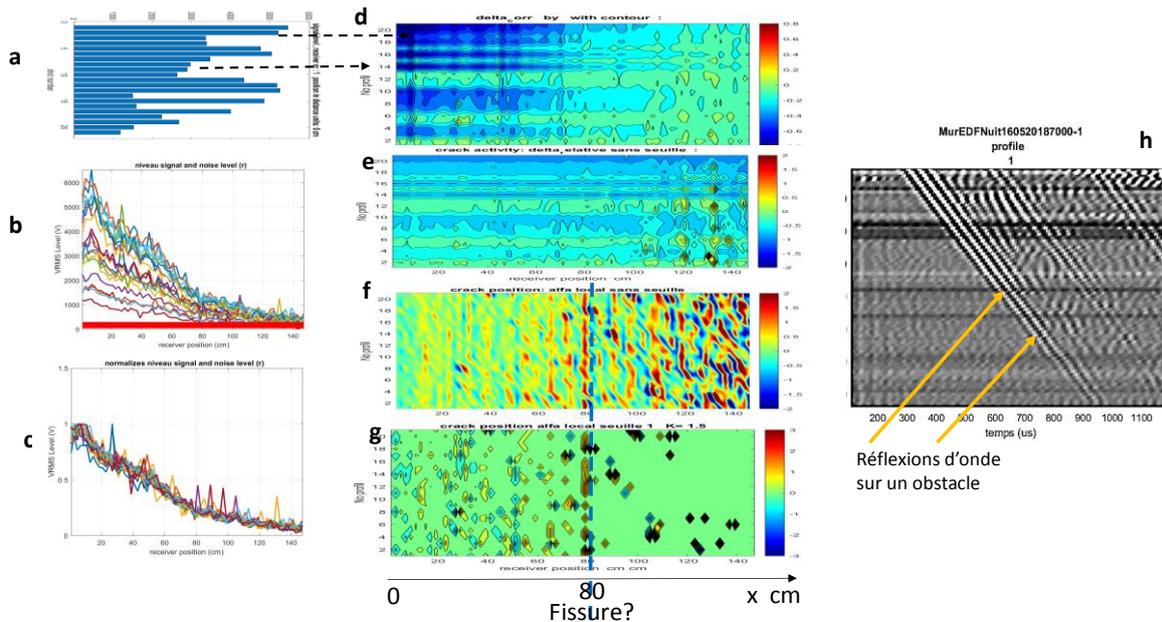


Figure AV.3.2.3.4 : a) Niveaux de signal des 21 signaux du test témoin 1 ; b) Amplitudes des 21 signaux du test témoin 1 ; c) Amplitudes normalisées des 21 signaux ; d) Fonction Δ appliquée aux signaux du test témoin 1 ; e) Activité des 21 signaux ; f) et g) alpha local pour le profil témoin 1 pour 2 seuils de niveau de bruit différents ; h) B-scan de l'un des tirs sur le profil témoin 1

La figure A.V.3.2.2.4 résume les résultats obtenus sur le profil témoin 1 par l'exploitation des informations incluses dans les courbes $A(x,i)$, c'est-à-dire la variation Δ , l'activité A_c et alfa-local α_{local} définies dans Eqs. (V-5) et (V-6). Ces fonctions sont présentées sur les sections (d-g) en couleur en fonction de la position x sur le profil et en fonction du temps (en heures).

La section (a) affiche le niveau du signal reçu sur la position la plus proche de la source, donc sur la position $x = 0$ cm. Ce graphe montre que l'onde de surface n'est pas émise avec un niveau stable et que chaque émission est générée avec un niveau de départ différent. Finalement chaque courbe $A(x, i)$ montrée sur la section (b) est différente et par conséquent les variations des fonctions Δ et A_c reflètent les variations des niveaux d'émission, et pas les variations dans la matière auscultée (qui à priori devraient être proche de zéro). Seule la fonction α_{local} est indépendante du niveau de départ de l'onde, et elle donne des résultats interprétables. Les anomalies du béton se présentent sous la forme de lignes verticales (section g). On y détecte des anomalies

sur les positions 80 cm et 110 cm mais les données sont très bruitées. Si on applique une élimination automatique des données trop bruitées (section h), il ne reste que l'anomalie à 80 cm, mais elle est encore perturbée par le bruit. La présence des anomalies à 80 cm et 110 cm est confirmée par l'observation des réflexions de l'onde de surface sur ces positions (section i). Ces réflexions sont visibles sous forme de « zigzags ».

La section (c) montre les courbes $A(x,i)$ normalisées sur $A(x=0,i)$, donc la situation où toutes les émissions seraient les mêmes. Les courbes se recouvrent mais pas parfaitement et la largeur de l'ensemble des traces reflète une partie aléatoire, donc un bruit. On peut apercevoir que les variations de $A(x)$ sur la position de l'anomalie détectée à $x = 80$ cm sont comparables aux variations causées par le bruit sur les autres positions. Cela explique pourquoi le paramètre α_{local} obtenu est aussi bruité. Cette expérience montre que le niveau de bruit et des instabilités du signal émis sont la source de perturbations et que ces perturbations peuvent masquer les vraies anomalies du béton (comme les fissures par exemple). Cela explique les problèmes de suivi de fissure pendant le test de pression à VeRCoRs en 2017 (où on cherche des variations très faibles).

La figure AV.3.2.3.5 compare le paramètre α_{local} obtenu pour les trois tests automatiques. On peut y apercevoir que :

- La série témoin 2 semble beaucoup plus homogène que la série témoin 1. Grâce au moyennage plus important, le bruit du profil témoin 2 est moins fort, et l'anomalie à 80 cm est affichée plus clairement. On peut observer aussi une anomalie à 60 cm. Cela confirme notre observation que c'est le bruit qui masque certaines anomalies du béton ausculté. En effet, plus le moyennage est élevé, plus les signaux aléatoires s'annulent (proportionnellement à la racine carrée de N , où N indique le nombre des signaux moyennés). Notons que le profil témoin affiche certaines anomalies, il n'est donc pas homogène, comme on aurait pu le croire avant ces expérimentations.
- Le profil diffuseur montre plusieurs anomalies : celles à 10 cm – 20 cm indiquent la fin d'un premier diffuseur (cf. Fig. AV.3.2.3.2) et celle à 110 cm indique la fin d'un deuxième diffuseur. On constate que l'onde ne « voit » pas le début du deuxième diffuseur à 30 cm mais on détecte des anomalies à 60 cm et 80 cm. Ces dernières correspondent à des fissures, les mêmes que celles observées sur le profil témoin, qui se propagent verticalement sur le mur. Leur présence a été confirmée à posteriori visuellement.

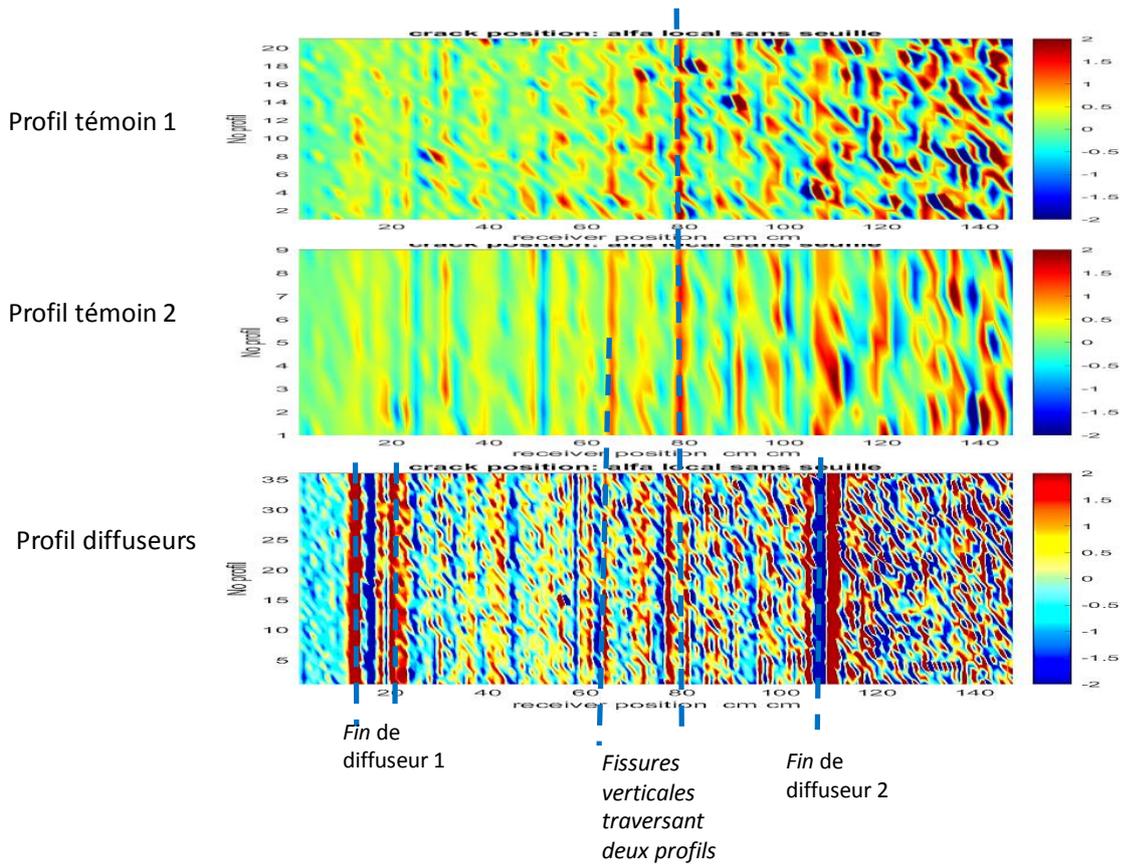


Figure A.V.3.2.3.5 : Tracés de alpha local = l'écart à la courbe théorique d'amplitude de l'onde en fonction de la distance entre la source et le récepteur, pour chaque profil de a) la série de mesures témoin 1, AV = 8, b) la série de mesures témoin 2, AV = 32 et c) la série de mesures diffuseurs

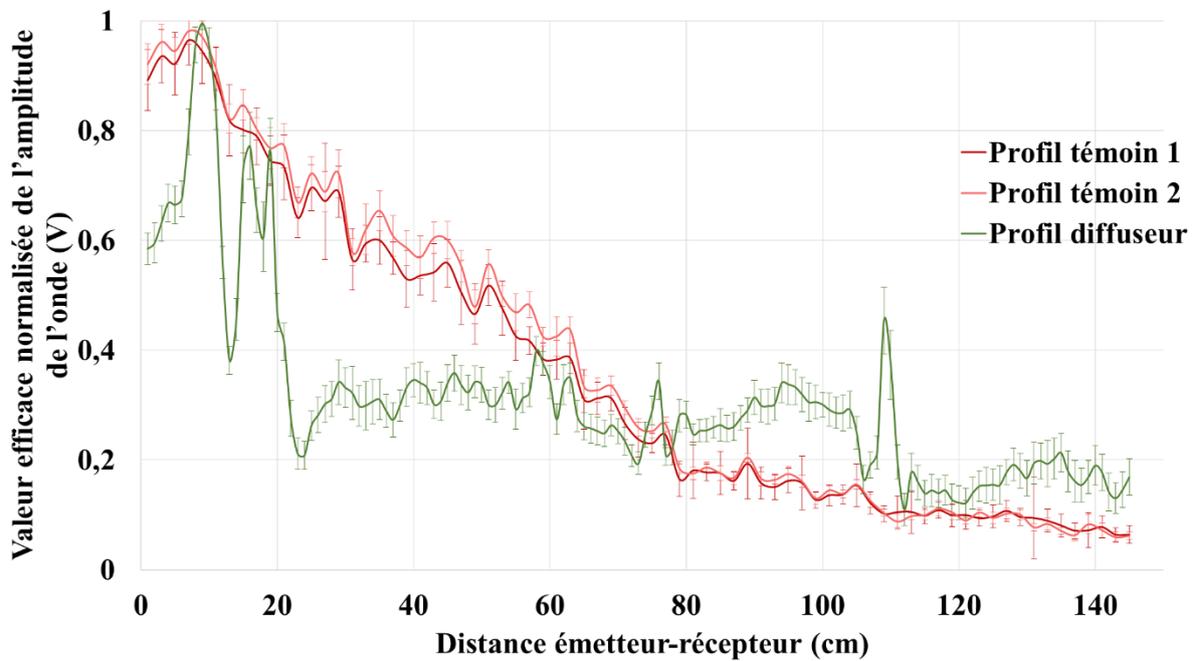


Figure A.V.3.2.3.6: Moyenne des courbes d'amplitudes normalisées de chaque série de profils, en fonction de la distance entre la source acoustique et le récepteur

En moyennant les $A(x)$ de tous les profils de chaque série, on peut obtenir des courbes d'amplitude moyennes avec écart-types. Les résultats sont affichés sur la figure A.V.3.2.3.6 et confirment que l'onde de surface « voit » les discontinuités fortes dans la matière auscultée (ici la fin des diffuseurs). De plus, il est confirmé que les autres anomalies observées (à 60 cm et 80 cm) sont associées à des variations de $A(x)$ comparables avec la partie aléatoire, donc du bruit.

En conclusion, la comparaison de ces courbes montre clairement que l'onde de surface permet de détecter des discontinuités dans la masse d'un matériau testé. Cela peut surtout s'avérer utile pour localiser précisément un objet ou un défaut dont on connaît l'existence mais dont l'emplacement n'est pas suffisamment défini.

Par ailleurs, il a été confirmé que le niveau de bruit et la non-stabilité du signal émis sont trop grands et peuvent masquer de vraies anomalies dans le béton comme des fissures, et surtout masquer leur évolution pendant un test de pression à VeRCoRs (cela nécessite une précision et une stabilité très importante).

Ces observations nous ont guidées pour remplacer les parties « hard » du scanner responsables de l'émission et de l'acquisition des signaux.

Références bibliographiques Chapitre V

[Abraham et al – 2018] O. ABRAHAM, J.F. CHAIX, V. GARNIER, J.M. HENAULT, J.B. LEGLAND, C. CICCARONE, H. SOGBOSS, G. VILLAIN, B. PIWAKOWSKI, J. VERDIER, O. DURAND, G. GUGOLE, S. RAKOTONARIVO, X. DEROBERT, Non Destructive Evaluation of concrete material properties for nuclear power plant survey: results in the laboratory and on the VeRCoRS mock-up, New Brunswick USA27-29-08-2018, NDT-CE 2018.

[Abraham et al – 2019] O. ABRAHAM, G. VILLAIN, X. DEROBERT, G. GUGOLE, J.-F. CHAIX, V. GARNIER, S. RAKOTONARIVO, O. DURAND, J.-B. LEGLAND, B. PIWAKOWSKI, C. CICCARONE, J. VERDIER, H. SOGBOSSI, J.-M. HENAULT, Non destructive monitoring of mechanical stress in concrete for the survey of nuclear power plants, Quantitative Non Destructive Evaluation (QNDE2019), juillet 2019, Portland, USA.

[Ciccarone et al – 2018] C. CICCARONE, R.DRELICH, B. PIWAKOWSKI, J.-M. HENAULT, V. GARNIER, F. SKOCZYLAS, Sonic and Ultrasonic Non Destructive Evaluation of concrete in VeRCoRS mock-up during the pressure tests, TINCE 2018 – Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering France, Paris-Saclay – august 2018.

[Garnier et al – 2016a] V. GARNIER, J.-M. HENAULT, H. HAFID, J. VERDIER, J.-F. CHAIX, O. ABRAHAM, E. LAROSE, B. PIWAKOWSKI, G. VILAIN, Z.-M. SBARTAI, J.-P. BALAYSSAC, 2016, Containment Nuclear Plant Structures Evaluation by Non Destructive Testing: Strategy and Results, TINCE proceedings, Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering, Paris, France, 13p.

[Garnier et al – 2016] V. GARNIER, C. PAYAN, M. LOTT, N. RANAIVOMANANA, J.-P. BALAYSSAC, J. VERDIER, E. LAROSE, Y. ZHANG, J. SALIBA, A. BONIFACE, Z.-M. SBARTAI, B. PIWAKOWSKI, C. CICCARONE, H. HAFID, J.-M. HENAULT, F. OUVRIER-BUFFET, Non Destructive Evaluation of containment walls in nuclear power plants, 43th QNDE, Atlanta, juillet 2016.

[Garnier et al – 2018a] V. GARNIER, B. PIWAKOWSKI, J.-M. HENAULT, J. VERDIER, J.-P. BALAYSSAC, N. RANAIVAMONANA, J.-F. CHAIX, S. RAKOTONRIVO, G. VILLAIN, O. ABRAHAM, X. DEROBERT, C. PAYAN, Z.-M. SBARTAI, J. SALIBA, E. LAROSE, H. HAFID, R. DRELICH, C. CICCARONE, Non Destructive Evaluation of the durability and damages of concrete in nuclear power plants, 12th European Conference on Non-Destructive Testing (12th ECNDT) Goteborg Sweden, June 2018.

[Garnier et al – 2018b] V. GARNIER, J.-M. HENAULT, B. PIWAKOWSKI, C. PAYAN, J.-F. CHAIX, O. ABRAHAM, G. VILLAIN, M. LOTT, C. CICCARONE, E. LAROSE, Z.-M. SBARTAI, J. VERDIER, H. HAFID, Non Destructive Evaluation of the durability and damages of concrete in nuclear power plants, TINCE 2018 – Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering France, Paris-Saclay – août 2018.

[Henault et al – 2018] J.-M. HENAULT, P. LAVIRON, S. DESFORGES, D. VAUTRIN, A. COURTOIS, B. MARTIN, A. LEGRIX, How to characterize the airtightness of containment structure – Overview of monitoring techniques tested on VeRCoRs Mock Up, TINCE 2018 – Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering France, Paris-Saclay – 2018, August 29.

[Klemczak – 2014] B.A. KLEMCZAK, Modeling thermal-shrinkage stresses in early age massive concrete structures – Comparative study of basic models, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Volume 14, Issue 4, Pages 721-733, August 2014.

[Larose et al – 2015] E. LAROSE, A. OBERMANN, A. DIGULESCU, T. PLANES, J.-F. CHAIX, F. MAZEROLLE, G. MOREAU, Locating and characterizing a crack in concrete with diffuse ultrasound: a four-point bending test, Journal of the Acoustical Society of America, Volume 138, July 2015, DOI: 10.1121/1.4922330.

[Parmentier et al – 2009] B. PARMENTIER, V. POLLET et G. ZARMATI, Le retrait empêché du béton, Centre Scientifique et Technique de la Construction, Les Dossiers du CSTC, Numéro 2/2009, Cahier n°3, page 12.

[Piwakowski et al – 2018] B. PIWAKOWSKI, R. DRELICH, C. CICCARONE, J. LI, Non-destructive non-contact concrete evaluation by sound and ultrasound using an automated surface wave scanner, International Congress on Ultrasonics, ICU2019, Bruges.

[Sbartai et al – 2015] Z.-M. SBARTAI, A. BONIFACE, J. SALIBA, Improvement of damage localization in concrete by acoustic emission using an adaptive meshing algorithm, 15th International Academic Conference on Engineering, Technology and Innovations (IACETI), Singapore Dec., 2015.

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons évalué l'utilité et vérifié la faisabilité de détection et quantification de différentes pathologies du béton à l'aide d'ondes ultrasonores particulières : les ondes de surface.

Ce travail a été possible grâce à la collaboration de deux équipes de recherche de l'Ecole Centrale de Lille. L'une est le laboratoire d'électronique spécialisé dans la propagation d'ondes acoustiques (IEMN, groupe TPIA, équipe EC Lille) et l'autre est le laboratoire de Génie Civil spécialisé dans l'expérimentation sur les géo matériaux dont le béton fait partie (LAMCube, EC-Lille). Une grande part de l'originalité de ce travail vient de l'association de ces deux équipes qui, chacune, ont pu s'enrichir mutuellement de leur expérience propre. Cela a permis de mettre au point un programme d'expérimentation très riche et en en parallèle tester des techniques ultrasonores originales ayant un grand potentiel.

Le technique des ondes de surface a été appliquée dans un dispositif sans contact avec la surface auscultée et est réalisée de manière automatique à l'aide de deux scanners HF (Hautes Fréquences) et BF (Basses Fréquences), qui couvrent respectivement des bandes fréquentielles différentes, et donc des profondeurs d'auscultation de matériau différentes. L'intervalle des profondeurs maximales exploitées dans cette thèse à l'aide de ces deux scanners est de 1 cm à 60 cm.

Le point commun des pathologies recherchées était le diagnostic de murs d'enceintes de confinement de centrales nucléaires mais les conclusions de ce travail peuvent être étendues à d'autres structures (ponts, chaussées, etc.). Les pathologies examinées sont :

- La lixiviation (Chapitre II)
- La délamination (Chapitre III)
- Le suivi d'un front de saturation (Chapitre IV)
- Le suivi de contrainte (Chapitre V)
- La détection de l'endommagement thermique (Chapitre V)
- La détection d'une fissure ou une zone micro-fissurée (Chapitre V)

Chapitre II :

En ce qui concerne la détection et l'évaluation de la lixiviation du béton, les résultats ont été obtenus à l'aide du scanner HF, et de la comparaison de ces résultats avec des mesures en laboratoire. La détection et la quantification de la dégradation chimique du béton semblent établies et pertinentes. L'atténuation d'onde et le gradient

de vitesse GV se distinguent comme des observables très sensibles à la lixiviation (augmentations respectives de 600 % et 500 % pendant les tests effectués), alors que la vitesse varie seulement de 25 %.

De plus la méthode d'inversion appliquée sur ces résultats a permis de déterminer la profondeur du front de lixiviation: les valeurs de profondeur de ce front (13 mm) correspondent à celles obtenues par les autres méthodes destructives testées en laboratoire.

Finalement la méthode par ondes de surfaces, la seule méthode non destructive présentée dans cette étude, a montré sa pertinence dans l'étude de la lixiviation des surfaces de béton, et des matériaux du génie civil à priori. Sa capacité à détecter un front de lixiviation rend compte de son intérêt pour évaluer la durée de vie des structures affectées par la lixiviation. Il paraît établi que la technique est prête à être testée sur site.

Dans la suite de cette recherche, il pourrait être intéressant d'examiner la dalle lixiviée sur une plus grande profondeur à l'aide du scanner BF - ce qui pourrait affiner les résultats d'inversion (grâce à l'augmentation de la pénétration dans la dalle).

Chapitre III

Les résultats pour la détection de la délamination ont permis de démontrer la capacité de la technique acoustique basée sur l'utilisation des ondes de surface à détecter une zone délaminée. C'est la différence de propriétés dispersives entre les ondes de surface et les ondes de plaque qui permet d'identifier une zone délaminée, grâce à l'analyse des courbes de dispersion et la recherche de l'apparition des modes A_0 et/ou S_0 de l'onde de plaque (modes les plus facilement détectables). Une délamination se comporte alors comme un convertisseur de modes ou comme un filtre spatio-temporel. Si on imagine une auscultation automatique d'une grande surface à l'aide d'un scanner, la détection de la délamination pourrait être effectuée automatiquement par le traitement approprié.

Il est également possible d'approximer la profondeur à laquelle la délamination se situe par rapport au plan ausculté, par une lecture de la fréquence de changement de pente sur la courbe de dispersion de vitesse. En perspective de cette étude, l'approximation de la profondeur de la délamination peut être affinée par l'utilisation d'une technique d'inversion des courbes de dispersion selon un modèle d'ondes de plaque. De plus, étant donné que l'approche sans contact peut être automatisée, il serait intéressant de coupler le scanner à ondes de surface avec l'approche d'impact

écho en semi-contact automatisé – ce qui donne déjà de bons résultats dans la détection de la délamination.

Par ailleurs, cette étude nous a permis d'identifier la façon la plus pertinente de simuler physiquement une délamination en testant quatre méthodes de rupture mécanique différentes grâce à la fabrication de 10 dalles de béton ou mortier. Les conclusions indiquent que 2 feuilles de polyane immergées dans une dalle de mortier se comportent acoustiquement comme une lame d'air, tandis qu'une seule feuille de polyane n'est pas suffisante. Une épaisseur de 80 μ m de polyane est donc suffisante pour simuler une « vraie » délamination. En revanche, la reprise de bétonnage n'est pas vue comme une délamination, sans doute parce que la reprise de bétonnage n'assure qu'une trop faible rupture mécanique entre deux couches de béton.

Chapitre IV

La campagne d'essais sur la détection d'un front de saturation a été effectuée sur deux matériaux, un calcaire perméable, poreux et homogène et un béton de structure, fissuré, hétérogène par constitution, et a donné des résultats contradictoires sur les effets de la saturation. Il paraît avéré que pour le calcaire l'augmentation de saturation en eau déclenche une diminution de la vitesse des ondes de surface et qu'on observe un effet contraire sur le béton. Il faut noter que le matériau inspecté, le calcaire, a des propriétés particulières : le module d'élasticité E diminue avec la saturation alors que le coefficient de Poisson augmente de façon monotone avec la saturation (ce qui n'est pas le cas pour le béton). Les effets de la saturation sur le calcaire sont bien marqués et, moyennant quelques essais de calibration supplémentaires, il est vraisemblable que la méthode acoustique permettrait, via la propagations des ondes et l'application de la technique d'inversion, d'obtenir une répartition de la saturation avec la profondeur.

Le problème paraît beaucoup plus complexe sur le béton pour lequel la présence de fissuration masque en grande partie les effets de la re-saturation. Pour le béton, les variations de vitesse en fonction de la teneur en eau sont de l'ordre de 6 %. Elles sont donc plus faibles que pour le calcaire (16 %). Finalement, on se trouve dans la situation où les variations de vitesse sont de même ordre de grandeur que l'écart-type des mesures. C'est pour cela que les techniques d'inversion ne permettent pas pour l'instant de déboucher sur une possibilité d'évaluation précise de la saturation de béton. On peut supposer que l'on pourrait affiner un peu la méthode par un important travail en amont de calibration en laboratoire, ce qui permettra de passer de l'éprouvette à la structure.

En perspective, étant donné qu'à partir de la troisième imbibition du mur en béton, le front de saturation a dépassé la profondeur maximale atteinte par les ondes de surface, il serait intéressant de refaire les mesures à l'aide du scanner BF afin de pouvoir suivre ce front sur une plus grande profondeur, donc pendant une plus grande partie de sa progression. En effet, l'expérimentation sur le même mur effectué à l'occasion de tests du scanner BF (Chapitre V) nous a permis de supposer que sur de plus grandes profondeurs, le même mur affiche une saturation qui diminue avec la profondeur.

Chapitre V

Les expérimentations dans la cadre du projet ENDE réalisées au laboratoire puis à VeRCoRs nous ont permis de tester deux scanners à ondes surface dans le contexte des murs de confinement des enceintes nucléaires dans les conditions de service et d'accident (en termes de pression et de température).

Le premier scanner HF était déjà développé avant le début de cette recherche et sa pénétration dans le béton était limitée à 6 cm. Le deuxième scanner BF, unique en ce qui concerne les solutions techniques adoptées, a été réalisé pendant la réalisation de cette thèse, dans le but d'obtenir des ondes de surface pénétrant l'épaisseur totale du mur de l'enceinte de la maquette VeRCoRs (40 cm).

Sa mise en fonctionnement nécessitait de nombreuses expériences, tests et modifications, ce qui a finalement permis d'obtenir les performances souhaitées. Il devient maintenant, au bout de 4 ans de tests et de perfectionnement, un outil fiable et précis. La profondeur maximale de pénétration atteint est de 60 cm mais peut être encore augmentée. Son originalité consiste dans le fait qu'il utilise des sources atypiques (tweeters de haute fréquence) et profite de la bibliothèque unique des différentes fonctions chirp et codes de Golay, ce qui permet d'optimiser la résolution et la qualité des signaux. Parallèlement, de nouvelles procédures de traitement visant la détection et le suivi d'une fissure ont été développées. Le nouveau paramètre introduit α_{local} s'avère être très bien adapté pour la détection des anomalies comme une fissure, et il était démontré qu'il corrèle bien avec l'ouverture de la fissure (mesurée par fibre optique). Ainsi, le scanner BF (HF aussi à priori) pourrait avoir la même fonction que les fibres optiques dans les structures n'ayant pas été équipées de fibres optiques en amont (l'immense majorité des structures actuelles). Le scanner BF démontre sa capacité à détecter de très faibles ouvertures de fissure (quelques micromètres). Cela justifierait son utilisation sur le parc nucléaire, ainsi que sur les autres structures du génie civil, où les ouvertures sont parfois bien plus grandes (quelques centaines de micromètres).

Les résultats obtenus à VeRCoRs prouvent l'utilité des scanners dans le suivi de béton pendant les épreuves de mise en pression de l'enceinte. Ils permettent de suivre des paramètres mécaniques comme la contrainte et la microfissuration (à travers la vitesse et l'atténuation de l'onde dans le volume inspecté) et de détecter des anomalies locales comme des macro-fissures, et même de suivre leur ouverture.

Pendant les tests au laboratoire, il a été conclu que dans l'intervalle de variations prévues pour un accident de l'enceinte de confinement, la vitesse des ondes de surface est peu sensible à la contrainte et est très peu sensible à l'association de la contrainte avec l'endommagement thermique. Elle est au contraire très sensible à l'endommagement thermique. Au contraire l'atténuation d'onde de surface est à priori très sensible à l'endommagement thermique et à la contrainte.

En perspective il nous semble que les scanners sont prêts à être utilisés pour le suivi régulier et automatique du vieillissement (micro et macro-fissuration, module d'élasticité) d'une enceinte nucléaire réelle. Etant donné la possibilité d'automatisation des mesures, il serait intéressant de s'orienter vers la construction d'un dispositif qui balaie le mur entier. Le scanner BF peut aussi être utilisé pour la recherche des macro-fissures dans un mur, sur les ponts et toutes les structures du Génie Civil. Il a déjà découvert plusieurs fissures non détectées auparavant à VeRCoRs.

Titre : Utilisation d'ondes de surface à l'aide de scanners acoustiques sans contact pour le contrôle non destructif de structures en béton

Résumé : Ce travail propose une méthode de contrôle non destructif du béton pour les structures du génie civil. Cette méthode se base sur l'émission et la réception – une fois le matériau traversé – d'ondes acoustiques sonores et ultrasonores. Les ondes utilisées dans cette thèse sont des ondes de surface, car elles ont la propriété de pénétrer le matériau sur une profondeur égale à leur longueur d'onde. L'auscultation de béton est faite à l'aide de deux scanners : un premier scanner appliquant cette méthode avec des ondes hautes fréquences a été utilisé pour caractériser la peau d'un béton, tandis qu'un second scanner utilisant des ondes basses fréquences, développé dans le cadre de ce travail, a permis de caractériser un béton sur l'épaisseur d'un mur entier. Afin de déterminer les capacités et les limites de cette méthode pour le contrôle non destructif du béton, plusieurs pathologies ou conditions environnementales du béton ont été simulées en laboratoire sur des éprouvettes. Ces éprouvettes ont ensuite été auscultées de manière non destructive avec les scanners acoustiques, puis de manière destructive avec des tests matériau. Les pathologies ou conditions en question sont la lixiviation, la délamination, la micro/macrofissuration du béton, et son état de saturation. La comparaison des résultats nous a permis de conclure que cette méthode et ces scanners sont capables de détecter et déterminer la profondeur d'une lixiviation du béton, de même que pour une délamination au sein de béton, de suivre l'évolution d'un front de saturation au sein d'un calcaire mais pas encore au sein d'un béton, et de détecter et suivre la contrainte et la microfissuration ainsi que l'évolution de macro fissures, notamment grâce à des mesures automatisées effectuées in situ sur la structure de VeRCoRs.

Mots-clefs :

Contrôle Non Destructif, béton, lixiviation, délamination, saturation, fissures, ondes de surface, ondes de plaque, transducteurs sans contact, dispersion de vitesse, atténuation, inversion, porosité, module d'élasticité, signal chirp, mesure automatique, scanner

Title: Use of surface waves with non-contact acoustic scanners for non-destructive testing of concrete structures

Abstract: This work proposes a method for the non-destructive testing of concrete for civil engineering structures. This method is based on the emission and reception - when the surface wave has passed through the material - of acoustic sonic and ultrasonic waves. The waves used in this thesis are surface waves, as they have the property of penetrating the material to a depth equal to their wavelength. The auscultation of concrete is done using two scanners: a first scanner applying this method with high frequency waves was used to characterize the concrete skin, while a second scanner using low frequency waves, developed within the framework of this work, made it possible to characterize a concrete over the thickness of an entire wall. In order to determine the capabilities and limitations of this method for the non-destructive testing of concrete, several pathologies or environmental conditions of concrete were simulated in the laboratory on test specimens. These specimens were then examined non-destructively with acoustic scanners and destructively with material tests. The pathologies or conditions in question were leaching, delamination, micro/macroc cracking of the concrete, and its state of saturation. Comparison of the results allowed us to conclude that this method and these scanners are able to detect and determine the depth of a leaching of concrete, as well as for a delamination within concrete, to follow the evolution of a saturation front within a limestone but not yet within a concrete, and to detect and follow the stress and micro-cracking as well as the evolution of macro-cracks, in particular thanks to automated measurements carried out in situ on the VeRCoRs structure.

Key words:

Non Destructive Testing, concrete, leaching, delamination, saturation, cracks, surface waves, plate waves, non-contact transducers, velocity dispersion, attenuation, inversion, porosity, elasticity modulus, chirp signal, automated measure, scanner