UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE – LILLE 1

<u>THESE</u>

Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Discipline : Génie civil

Présentée par :

FNINE Abdelilah

Présentée et soutenue le 29 novembre 2006

Titre :

Auscultation de la peau du béton par ondes ultrasonores haute fréquence

<u>JURY :</u>

M. NONGAILLARD	Président,
	Professeur à l'Université de Valenciennes
M. JL. GALLIAS	Rapporteur,
	Professeur à l'Université de Cergy-Pontoise
M. JP BALAYSSAC	Rapporteur,
	Maître de conférences HDR au LMDC de l'INSA de Toulouse
M. F. BUYLE-BODIN	Examinateur et Directeur de la thèse,
	Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille
M. B. PIWAKOWSKI	Examinateur et Co-Directeur de la thèse,
	Professeur à l'Ecole Centrale de Lille
M. M. GOUEYGOU	Examinateur et co-encadrant de la thèse,
	Maître de Conférences à l'Ecole Centrale de Lille

Equipe Matériaux et Ouvrages en béton (LML UMR CNRS 8107) Université des Sciences et Technologies de Lille. Polytech'Lille, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq, France. Tel. : 0033(0) 320434610

Groupe Electronique-Acoustique (IEMN DOAE UMR CNRS 8520), Ecole Centrale de Lille BP 48 ; 59651 Villeneuve d'Ascq Cedex France. Tel. : 0033 (0)320335422.

Les ouvrages de génie civil en béton armé sont destinés à assurer un certain nombre de fonctions souvent pendant plusieurs siècles. Les armatures en acier sont protégées de l'extérieur par quelques centimètres de béton appelés épaisseur d'enrobage, couche protectrice très importante pour la durée de vie. De nombreuses agressions chimiques et physiques sont capables d'altérer cette protection, ce qui conduit à la corrosion des armatures, à de la fissuration ou de la microfissuration, et à l'augmentation de la porosité. L'intérêt principal du contrôle non destructif (CND) comme outil d'auscultation est qu'il permet sans toucher à l'intégrité de l'ouvrage de réaliser des investigations (même répétées dans le temps). L'originalité du travail est d'utiliser les ondes ultrasonores de surface (OS) se propageant à la surface du béton, dont la propagation est perturbée par des obstacles (fissures, trous,...) ou des modifications des propriétés du matériau (hétérogénéités). Il en découle des modifications de vitesse, d'atténuation et d'amplitude. L'analyse est conduite à des fréquences de 0,5 à 1 MHz, gamme de fréquence inhabituelle dans le domaine du génie civil, mais qui s'impose au vu de la faible épaisseur de la couche dégradée et de la taille des discontinuités engendrées par la dégradation. Les ondes de Rayleigh sont adaptées à notre problématique puisque elles sont les seules utilisables si une seule face de l'ouvrage est accessible et leur profondeur de pénétration est en rapport avec leur longueur d'onde et donc avec la fréquence employée.

Le travail a permis de passer d'un dispositif acoustique avec contact à un robot émetteurrécepteur sans contact automatisé (gain de temps, répétition des mesures sur une même zone, moins de perte d'énergie due au couplage, meilleure précision des mesures). Des programmes de traitement originaux des signaux acoustiques permettent l'estimation des paramètres principaux. La méthode Slant Stack (méthode de mesure de la vitesse) permet une détermination précise de la caractéristique de la dispersion. D'autre part, il a été mis en évidence la possibilité de distinguer les classes de résistance du béton, de détecter une zone carbonatée, de détecter une fissure, de localiser l'amorçage d'une fissure avant qu'elle ne soit visible. Cependant, la technique n'est pas capable de distinguer la différence entre un remplissage de la porosité par une eau chlorée ou non. De nombreuses études ont été menées aussi bien en laboratoire que sur ouvrages réels.

Les différents essais réalisés (en laboratoire et sur site) ont toujours fait l'objet d'un croisement des techniques qui montre la plus-value apportée par la combinaison de plusieurs méthodes.

MOTS-CLES

Ouvrages de génie civil, Contrôle non destructif (CND), Béton, Ondes de surface à haute fréquence (OS), Dégradation, Auscultation, Couplage de CND, Diagnostic.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sein du LML sous la direction du Professeur François BUYLE-BODIN et du Groupe Electronique-Acoustique de l'IEMN à l'Ecole Centrale de Lille sous la direction du Professeur Bogdan PIWAKOWSKI et du Docteur Marc GOUEYGOU.

Je tiens à les remercier vivement pour l'aide qu'ils m'ont apportée, leurs encouragements, la confiance qu'ils m'ont accordée. Je transmets toute ma gratitude au Professeur François BUYLE-BODIN pour m'avoir intégré au sein de son équipe. Je témoigne toute ma reconnaissance au Professeur Bogdan PIWAKOWSKI et au Docteur Marc GOUEYGOU. Merci à tous les trois, pour votre disponibilité, pour les nombreuses discussions que nous avons eues et surtout pour votre passion contagieuse pour la recherche.

Je remercie chaleureusement le Professeur François BUYLE-BODIN sans qui ce travail n'aurait pas pu exister. C'est au sein de l'équipe du Professeur François BUYLE-BODIN que j'ai préparé mon Diplôme d'Etudes Approfondies et que j'ai réalisé toute l'étude présentée dans cette thèse, inscrite dans un projet de recherche collectif « béton d'enrobage » labellisé par le RGC&U et financé par le Ministère de la Recherche.

Monsieur Bertrand NONGAILLARD m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Je tiens à lui témoigner mes remerciements les plus sincères.

Monsieur M. Jean-Louis GALLIAS, Professeur à l'Université de Cergy-Pontoise et Monsieur M. Jean-Paul BALAYSSAC, Maître de conférences HDR à l'université Paul Sabatier de Toulouse ont accepté de rapporter ce travail et de me faire profiter de leur expérience. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé directement ou indirectement pour l'avancement de ce travail. Je pense particulièrement aux techniciens de Polytech'Lille et de l'Ecole Centrale de Lille.

Je remercie vivement mes compagnons d'études Arkadiusz Kosecki pour le développement des logiciels d'acquisition des signaux, Pawel Safinowski pour le développement du robot automatisé, Lyes Bal pour les essais sur terrain et en laboratoire, Sidi Ould Naffa, Ahn-Long Thang, Nicaise Boussougou, Ludovic Legrand et les autres. Je leur souhaite bon courage.

Enfin, j'adresse une pensée particulière et pleine de gratitude à ma famille et à mes parents à qui je dédie ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale

1. Evaluation et gestion des ouvrages.	30
2.L'auscultation.	30
2.1 Evaluer pour prévoir	32
2.2 Evaluation des ouvrages.	33
2.3 Inspection.	34
2.4 Analyse des résultats de l'évaluation.	34
3. Utilité et intérêt du contrôle non destructif.	35
4. Couplage de différentes techniques CND ou non.	36
5. Evaluation des méthodes de CND.	37
6. Mise en œuvre et utilisations actuelles des CND.	<u>39</u>
7. Les méthodes de CND vis-à-vis du maître d'ouvrage.	41
8. Le projet dans lequel s'inscrit cette thèse.	42
8.1 Présentation générale de l'équipe de Lille.	43
8.2 Présentation générale de l'équipe de Toulouse.	44
8.3 Présentation générale de l'équipe de Bordeaux.	_46
8.4 Présentation générale de l'équipe de Nantes.	47
9. Le travail de thèse.	49

<u>CHAPITRE 1 : Introduction à la durabilité du matériau béton et utilisation des</u> <u>ondes de surface comme technique de CND</u>

I.1. La résistance.	53
I.2. La porosité.	55
I.3. L'homogénéité à l'échelle de l'ouvrage.	_58
I.4. Les différentes dégradations du matériau béton.	58
I.4.1 Les dégradations d'ordre chimique.	58
I.4.1.1 Attaque par les eaux pures ou douces.	59
I.4.1.2 Attaque par les sulfates.	60
I.4.1.3 Attaque par les chlorures.	61
I.4.1.4 Attaque par alcali-réaction.	61

I.4.2 Les dégradations d'ordre physique.	62
I.4.2.1 La fissuration précoce.	62
I.4.2.2 Attaque physique.	_62
I.4.2.3 Dégradation mécanique.	_63
I.4.3 La carbonatation.	64
I.5. Les conséquences des différentes dégradations.	65
I.6. Principe physique de la propagation d'une onde.	68
I.6.1 Introduction sur les ondes.	68
I.6.2 Domaine d'application.	70
I.7. Eléments théoriques de la propagation des ondes acoustiques .	71
I.7.1. Longueur d'onde	71
I.7.2. Impédance acoustique.	72
I.7.3. Ondes longitudinales et transversales.	74
I.7.4. Ondes de surface.	79
I.7.5. Champ acoustique.	80
I.7.6. Champ proche et champ lointain.	82
I.8. Vitesse et atténuation.	85
I.8.1. Vitesse.	85
I.8.2. Atténuation et coefficient d'atténuation.	87
I.8.3 Le facteur de qualité	88
I.8.4 Le décrément logarithmique.	89
I.8.5. Absorption et diffusion.	89
I.9. Génération des ondes de surface.	91
I.10. Utilisation des ondes de surface - Localisation de fissures.	93
I.11. Méthodes acoustiques appliquées au génie civil.	95
I.12. Conclusions et perspectives.	97

CHAPITRE 2 : Dispositif expérimental du système de mesures ultrasonores

II.1. Optimisation du transducteur coin et du couplant.	101
II.1.1 Introduction.	101
II.1.2 Procédure expérimentale	101
II.1.3 Modèle analytique.	103

II.1.4 Critères de sélection.	_105
II.1.5 Résultats	_107
II.1.6 Conclusion.	_110
II.2. Dispositif expérimental du système de mesures.	_111
II.3. Version 1 COIN-COIN : émetteur et récepteur avec contact.	_112
II.3.1 Version 1 : description du système	_112
II.3.2 Version 1 : paramètres issus du traitement des données.	_113
II.3.2.1 Vitesse de groupe	_113
II.3.2.2 Vitesse de phase	_114
II.3.2.3 Vitesse par la méthode Slant Stack.	_118
II.3.2.4 Atténuation.	_121
II.3.3 Version 1 : conclusion.	_125
II.4. Version 2 CHARIOT: émetteur avec contact et récepteur sans contact sur char	<u>iot</u>
	_126
II.4.1 Version 2 : description du système.	_126
II.4.2 Version 2 : paramètres issus du traitement des données.	_128
II.4.3 Version 2 : conclusion	_131
II.5. Version 3 ROBOT: émetteur avec contact et récepteur sans contact motorisés.	132
II.5.1 Version 3 : description du système	_132
II.5.2 Version 3 : paramètres issus du traitement des données	_136
II.5.3 Version 3 : conclusion	_142
II.6. Version 4 ROBOT SANS CONTACT : émetteur et récepteur sans contact	
motorisés.	_143
II.6.1 Version 4 : description du système et paramètres.	_143
II.6.2 Version 4 : conclusion et perspectives.	_144
II.7. Conclusion.	_145

CHAPITRE 3 : Essais sur des corps d'épreuve de laboratoire

III.1. Introduction.	149
III.1.1. Objectifs.	149

	149
III.2. Présentation générale des corps d'épreuve de laboratoire.	149
III.2.1. Dalles non altérées.	150
III.2.2. Dalles dégradées	150
III.2.3. Répartition des corps d'épreuve.	150
III.3. Composition des bétons.	151
III.4. Fabrication et caractérisation des corps d'épreuve.	152
III.4.1. Conditions de cure et fabrication.	152
III.4.2. Caractérisation des bétons à l'état frais.	152
III.4.3. Résistances en compression à 28 jours.	153
III.4.4. Caractérisation physique à 28 et 90 jours.	153
III.5. Procédure de fissuration.	<u> </u>
III.6. Procédure des dégradations physico-chimiques.	157
III.6.1 Variation de la teneur en eau.	157
III.6.2 Variation de la teneur en chlorures.	158
III.6.3 Variation de la profondeur carbonatée.	158
III.7. Protocole des mesures sur les dalles fissurées mécaniquement.	158
III.7.1 Système de mesures	159
III.7.2 Organisation des mesures.	159
III.7.3 Organisation du chargement des dalles.	159
III.7.4 Méthode de localisation des fissures.	160
III.8. Résultats des mesures sur les dalles fissurées.	162
III.8.1 Vitesse.	162
III.8.2 Atténuation.	164
III.8.3 Localisation des fissures.	166
III.8.3.1 Dalle B25	166
III.8.3.2 Dalle B40	173
III.8.3.3 Dalle B60	174
III.8.4 Conclusion	176
III.9 Résultats des mesures sur la teneur en eau.	179
III.9.1 Organisation des mesures.	179
III.9.2 Détermination du type de dalle.	180
III.9.3 Résultats en terme de vitesse et d'atténuation.	181

III.1.2 Présentation des pathologies choisies pour les corps d'épreuve de laboratoire.

III.9.4 Conclusion.	185
III.10 Résultats des mesures sur la teneur en chlorures.	186
III.10.1 Organisation des mesures.	186
III.10.2 Résultats en terme de vitesse et d'atténuation.	187
III.10.3 Conclusion.	190
III.11 Résultats des mesures sur les dalles carbonatées.	191
III.11.1 Organisation des mesures.	191
III.11.2 Résultats en terme de vitesse et d'atténuation.	192
III.11.3 Conclusion.	194
III.12 Conclusion du chapitre.	<u> </u>

CHAPITRE 4 : Evaluation de la peau du béton sur des ouvrages

IV.1. Introduction.	_199
IV.1.1. Objectifs	_199
IV.1.2 Présentation des pathologies choisies pour les études in situ d'ouvrages.	199
IV.2. Etude des ouvrages de l'A21.	_200
IV.2.1 Présentation des ouvrages.	_200
IV.2.2 Sélection de 4 ouvrages.	200
IV.2.3 Définition des zones de mesure.	_202
IV.2.4 Bilan effectué par le LRPC de Lille.	203
IV.2.5 Système et organisation des mesures.	_206
IV.2.6 Résultats.	_207
IV.2.7 Conclusion.	_209
IV.3. Synthèse globale des résultats des auscultations sur les ponts de l'A21.	210
IV.3.1 Classement des ouvrages.	_210
IV.3.2 Correspondance des zones de mesure avec celles du LRPC.	_210
IV.3.3 Classement des zones et évolution de la vitesse et de l'atténuation.	_211
IV.3.4 Conclusion.	_215
IV.4. Présentation des corps d'épreuve BHP 2000 de La Rochelle.	217
IV.4.1 Introduction.	217
IV.4.2 Présentation des corps d'épreuve et géométrie des mesures.	218
IV.4.3 Système de mesures	220

IV.4.4 Résultats.	221
IV.4.5 Conclusion.	223
IV.4.6 Fissuration	224
IV.4.7 Conclusion	227
IV.5. Présentation de la tranchée couverte ASF (A63) à Guéthary (64).	228
IV.5.1 Présentation de l'ouvrage	228
IV.5.2 Organisation et géométrie de mesures.	229
IV.5.3 Résultats	231
IV.5.4 Conclusion	235
IV.6. Pont de la Marque.	236
IV.6.1 Introduction.	236
IV.6.2 Présentation de l'ouvrage	236
IV.6.3 Définition des zones de mesures.	237
IV.6.4 Système et géométrie de mesures.	238
IV.6.5 Résultats	239
IV.6.6 Conclusion	241
IV.7 Conclusion du chapitre.	242

CHAPITRE 5 : Couplage des méthodes de CND

V.1. Introduction.	247
V.2. Méthodologie d'analyse des possibilités de couplage.	248
V.3. Corps d'épreuve BHP 2000 - La Rochelle.	251
V.3.1. Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageables.	251
V.3.2. A priori sur les aptitudes des techniques employées.	251
V.3.2.1. Capacité	251
V.3.2.2. Radar	251
V.3.2.3. Acoustique.	251
V.3.2.4. Electrique.	252
V.3.3. Synthèse des résultats obtenus sur la teneur en eau, la porosité, la teneu	r en sels.
	252
V.3.3.1. Capacité	252
V.3.3.2. Radar	252
V.3.3.3. Acoustique.	252

V.3.3.4. Electrique	252
V.3.4. Bilan des aptitudes.	253
V.4. Corps d'épreuve en environnement contrôlé.	255
V.4.1. Dalles de Toulouse : influence de la teneur en eau.	255
V.4.1.1 Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageab	les.255
V.4.1.2. Synthèse des résultats obtenus sur la teneur en eau.	255
V.4.1.2.1. Capacité	255
V.4.1.2.2. Radar	256
V.4.1.2.3. Acoustique.	257
V.4.1.2.4. Electrique.	258
V.4.1.3. Exploitation des mesures : quelques possibilités et difficultés.	258
V.4.1.3.1. Sensibilité de la mesure.	259
V.4.1.3.2. Variations combinées de deux paramètres.	259
V.4.1.3.3. Tableau de synthèse.	261
V.4.2. Dalles de Toulouse : influence de la profondeur de carbonatation	261
V.4.2.1 Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageab	les.261
V.4.2.2. Synthèse des résultats obtenus sur la carbonatation.	261
V.4.2.2.1. Capacité	261
V.4.2.2.2. Radar	261
V.4.2.2.3. Acoustique.	262
V.4.2.2.4. Electrique.	262
V.4.2.2.5. Tableau de synthèse.	263
V.4.3. Dalles de Toulouse : influence de la teneur en chlorures.	263
V.4.3.1 Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageab	les. <u>2</u> 63
V.4.3.2. Synthèse des résultats obtenus sur la teneur en chlorures.	264
V.4.3.2.1. Capacité	264
V.4.3.2.2. Radar	264
V.4.3.2.3. Acoustique.	264
V.4.3.2.4. Electrique.	264
V.4.3.3 Bilan	265
V.4.4. Essais de Lille : fissuration d'origine mécanique.	266
V.4.4.1. Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageat	oles.266
V.4.4.2. Synthèse des résultats obtenus sur la macrofissuration.	266
V.4.4.2.1. Radar	266

V.4.4.2.2. Acoustique	266
V.4.4.2.3. Electrique	266
V.4.4.2.4. Bilan	267
<u>V.5. Bilan.</u>	267
V.6. Contrôle non destructif sur ouvrages in situ.	269
V.6.1. Ouvrages de l'A21	269
V.6.1.1. Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisage	ables.269
V.6.1.2. A priori sur les aptitudes des techniques employées.	269
V.6.1.3. Synthèse des résultats obtenus sur la carbonatation.	270
V.6.1.3.1. Analyse entre zones d'un même ouvrage (ouvrage)	204B)270
V.6.1.3.2. Analyse entre ouvrages, classement proposé.	271
V.6.1.4. Apports du couplage.	273
V.6.2. Pont de La Marque : chevêtre.	273
V.6.2.1. Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisage	ables.274
V.6.2.2. A priori sur les aptitudes des techniques employées.	274
V.6.2.3. Synthèse des résultats obtenus sur l'alcali-réaction.	275
V.6.2.3.1. Radar	275
V.6.2.3.2. Acoustique.	275
V.6.2.3.3. Electrique	275
V.6.2.4. Apports du couplage : confirmation entre techniques de mesu	ıre (radar-
résistivité)	275
V.6.3. Tranchée couverte de Guéthary.	278
V.6.3.1. Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisage	ables.278
V.6.3.2. A priori sur l'aptitude des techniques employées.	279
V.6.3.3. Synthèse des résultats obtenus.	279
V.6.3.3.1. Radar	279
V.6.3.3.2. Acoustique.	280
V.6.3.3.3. Electrique	280
V.6.3.4. Apports du couplage.	280
V.7. Bilan : exploitation des mesures combinées et valorisation du couplage.	280
V.7.1. Bilan relatif aux capacités des techniques.	281
V.7.2. Bilan sur les modes de valorisation du couplage.	282
V.7.3. Bilan sur l'aptitude au diagnostic.	282
V.7.3.1. Indices – causes et conséquences.	282

V.7.3.2. Quelle validation des conclusions ?	283
Conclusion générale et perspective.	287
Références bibliographiques.	291

Annexes

Annexe du chapitre 3.	301
Annexe III.1 : Exemple de feuille de notes des différents profils de mes	ure des dalles
fissurées	301
Annexe III.2 : Localisation des fissures sur le profil 2 (dalle B40).	302
Annexe III.3 : Localisation des fissures sur le profil 3 (dalle B40).	303
Annexe III.4 : Localisation des fissures sur le profil 4 (dalle B40).	304
Annexe III.5: Localisation des fissures sur le profil 1 (dalle B60).	305
Annexe III.6: Localisation des fissures sur le profil 2 (dalle B60).	306
Annexe III.7: Localisation des fissures sur le profil 3 (dalle B60).	307
Annexe III.8: Localisation des fissures sur le profil 4 (dalle B60).	308
Annexe du chapitre 4.	309
Annexe IV.1 : Zones auscultées sur OA 1202A.	309
Annexe IV.2 : Zones auscultées sur OA 1204B.	310
Annexe IV.3 : Zones auscultées sur OA 1247.	311
Annexe IV.4 : Zones auscultées sur OA 1249.	312
Annexe IV.5 : Résultats obtenus sur les quatre zones du pont OA1202A	313
Annexe IV.6 : Moyenne des résultats par zone sur le pont OA1202A.	314
Annexe IV.7 : Résultats moyens par zone sur le pont OA1202A	315
Annexe IV.8 : Résultats obtenus sur les sept zones du pont OA1204B.	316
Annexe IV.9 : Moyenne des résultats par zone sur le pont OA1204B.	317
Annexe IV.10 : Résultats moyens par zone sur le pont OA1204B.	318
Annexe IV.11 : Résultats obtenus sur les sept zones du pont OA1247.	319
Annexe IV.12 : Moyenne des résultats par zone sur le pont OA1247.	320
Annexe IV.13 : Résultats moyens par zone sur le pont OA1247.	321

Annexe IV.14 : Résultats obtenus sur les sept zones du pont OA1249.	_322
Annexe IV.15 : Moyenne des résultats par zone sur le pont OA1249.	_323
Annexe IV.16 : Résultats moyens par zone sur le pont OA1249.	324
Annexe IV.17 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M25-17.	_325
Annexe IV.18 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M50-17.	_325
Annexe IV.19 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M75-17.	_326
Annexe IV.20 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M50CV-17.	326
Annexe IV.21 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M75-17E15.	327
Annexe IV.22 : Vitesse (slant stack) et courbe de régression linéaire (courbe noir	e).
	328
Annexe IV.23 : Vitesses obtenues par trois méthodes différentes sur les trois pre-	miers
profils	_328

LISTE DES FIGURES

Figure 1. L'articulation des phases dans une démarche de diagnostic.	_32
Figure I.1 : Diagramme contrainte-déformation.	_54
Figure I.2 : Diagramme déformation longitudinale-déformation transversale.	_54
Figure I.3 : Représentation schématique d'un milieu poreux	_55
Figure I.4 : relation entre la résistance à la compression et la porosité à l'eau des pâtes de	
ciment.	_57
Figure I.5 : Exemple de stalactites blanchâtres en surface du béton.	_60
Figure I.6 : Exemple de faïençage lié à une attaque sulfatique.	_60
Figure I.7 : Exemple de voûte faîençée sous l'effet d'une réaction alcali-granulat.	_61
Figure I.8 : Exemple de variation de volume créant un gonflement.	_63
Figure I.9 : Exemple de corrosion ayant entraîné des décollements du béton.	_64
Figure I.10 : Domaine de longueur d'onde utilisé in situ pour l'auscultation du béton.	_69
Figure I.11 : schéma des dispositifs expérimentaux pour la propagation des ondes	_70
Figure I.12 : Exemple de PUNDIT	_71
Figure I.13 : Réflexion et réfraction sous incidence normale.	_72
Figure I.14 : sens de propagation d'une onde longitudinale.	_75
Figure I.15 : sens de propagation d'une onde transversale.	_76
Figure I.16 : Géométrie utilisée pour l'équation (I .25)	_77
Figure I.17 : direction de propagation d'une onde de surface.	_79
Figure I.18 : a) configuration du problème de rayonnement ; b) notations employées dans	les
formules	_80
Figure I.19 : Description d'un faisceau acoustique.	_83
Figure I.20 : a) comparaison de la décroissance de l'amplitude d'une onde sphérique dans	
des milieux avec et sans atténuation ; b) amplitudes des arrivées successives	_87
Figure I.21 : Conversion des modes pendant le passage d'une interface entre les milieux 1 et 2.	92
Figure I.22 : Décroissance de l'amplitude de l'onde de Rayleigh en fonction de la profond	 leur
(Z).	94
Figure I.23 : Différentes méthodes d'auscultation acoustique et utilisation.	96

Figure II.1 : Schéma de positions des deux transducteurs et protocole d'acquisition des	
signaux	102
Figure II.2 : Exemple de signaux reçus sur le mortier sain téflon/gel D à 0,5MHz.	103
Figure II.3 : Exemple de spectre de signaux reçus à trois positions de réception et une	
illustration des paramètres F_{max} , Δf et B	104
Figure II.4 : Evolution de la largeur de bande B en fonction de la nature du couplant.	108
Figure II.5 : Evolution du paramètre Fmax en fonction de la nature du couplant	108
Figure II.6 : Evolution de la vitesse de groupe Vg en fonction de la nature du couplant.	109
Figure II.7 : Variation de l'erreur relative de vitesse de groupe $\Delta Vg/Vg$ en fonction de la	
nature du couplant	109
Figure II.8 : Evolution du paramètre Fmax en fonction de la nature du couplant sur un bét	ton
sain et dégradé	_111
Figure II.9 : Système COIN-COIN d'acquisition des mesures d'onde de surface	_112
Figure II.10 : Logiciel d'acquisition de signaux et paire des transducteurs angulaires pour	•
l'onde de surface.	113
Figure II.11 : Exemple de signaux enregistrés pour la mesure de la vitesse de groupe des	
ondes de surface	114
Figure II.12 : Illustration de la procédure de calcul de la caractéristique de phase par la	
mesure de la différence de phase.	116
Figure II.13 : Vitesse de phase estimée par la méthode de la différence de phase appliquée	e
aux signaux obtenus sur le mortier	117
Figure II.14 : Résultats du calcul de la caractéristique de phase par la méthode «Slant Stat	ck»
	_120
Figure II.15 : Configuration de la mesure de l'atténuation.	121
Figure II.16 : Détermination de l'atténuation en fonction de la fréquence.	124
Figure II.17 : Vue du système CHARIOT d'émission et de réception des ondes de surface	Э.
	_127
Figure II.18 : Vue d'ensemble et détaillé du matériel nécessaire à l'acquisition des signau	X.
	_128
Figure II.19 : Illustration de la procédure de mesure des paramètres de la vitesse acoustiq	ue
par deux méthodes	129
Figure II.20 : Exemple de visualisation de signaux enregistrés sur le pont OA1202A.	_130
Figure II.21 : Exemple de fenêtres de calculs issues du traitement de signaux enregistrés s	sur
le pont OA1202A.	131

Figure II.22 : Schématisation du robot	_132
Figure II.23 : Vue du robot : le transducteur émetteur piloté par le moteur C et le	
transducteur récepteur piloté par le moteur D	_133
Figure II.24 : Vue du robot avec les boîtiers de commande des moteurs et du logiciel de	
pilotage et d'acquisition des signaux.	_134
Figure II.25 : Principe de fonctionnement du robot et ses paramètres.	_135
Figure II.26 : Photo du bras de levier évitant de frotter le récepteur sur l'échantillon.	_135
Figure II.27 : Exemple d'illustration de la dernière version de traitement avec affichage	de
tous les signaux et des résultats de la vitesse.	_137
Figure II.28 : Exemple d'obtention des coefficients d'atténuation avec tracé des courbes.	. <u>1</u> 39
Figure II.29 : Exemple de courbes de vitesses.	_140
Figure II.30 : Exemple de courbes d'atténuations.	_141
Figure II.31 : Version 4 du Robot sans contact.	_144
Figure II.32 : Procédure par inversion de l'estimation de l'épaisseur de la couche dégrad	ée.
	145

Figure III.1 : Vue du montage initial du bâti de chargement.	155
Figure III.2 : Vue du montage final du bâti de chargement	155
Figure III.3 : Zone de mesure des profils acoustiques.	156
Figure III.4 : Conditionnement des dalles.	157
Figure III.5 : Exemple de Scan-B : a) profil sans fissure et b) profil avec fissure.	161
Figure III.6 (a) et (b) : Procédure de localisation automatique de fissure.	161
Figure III.6 (c) : Procédure de localisation automatique de fissure.	162
Figure III.7 : Evolution de la vitesse en fonction des profils à l'état sain.	163
Figure III.8 : Evolution de la vitesse en fonction des stades de fissuration.	163
Figure III.9 : Evolution de l'atténuation en fonction des profils à l'état sain.	164
Figure III.10 : Evolution de l'atténuation en fonction des stades de fissuration.	165
Figure III.11 : Localisation de fissures sur le profil 2	167
Figure III.12 : Localisation de fissures sur le profil 3	168
Figure III.13 : Localisation de fissures sur le profil 4	169
Figure III.14 : Dalle B25 : localisation des fissures 1,2 et 3 sur la dalle et sur le grap	he en
fonction de des profils aux trois stades de fissuration.	170
Figure III.15 : Dalle B40 : localisation des fissures 1,2 et 3 sur la dalle et sur le grap	he en
fonction de des profils aux trois stades de fissuration.	173

Figure III.16 : Dalle B60 : localisation des fissures 1, 2, 3 et 4 sur la dalle et sur le gra	phe en
fonction de des profils aux deux stades de fissuration.	176
Figure III.17 : Situation des profils de mesures sur la dalle.	180
Figure III.18 : Evolution de la vitesse en fonction de la teneur en eau croissante sur les	s dalles
B25	182
Figure III.19 : Evolution de la vitesse en fonction de la teneur en eau croissante sur les	s dalles
B40	182
Figure III.20 : Evolution de l'atténuation en fonction de la teneur en eau croissante sur	r les
dalles B25	183
Figure III.21 : Evolution de l'atténuation en fonction de la teneur en eau croissante sur	r les
dalles B40	184
Figure III.22 : Evolution de la vitesse en fonction de la teneur en chlorures croissante.	187
Figure III.23 : Evolution de l'atténuation en fonction de la teneur en chlorures croissan	nte.188
Figure III.24: Variation de la vitesse en fonction de la porosité.	189
Figure III.25: Variation de la vitesse en fonction de la teneur en eau ou en eau chlorée	189
Figure III.26 : Evolution de la vitesse en fonction de profondeur de carbonatation croi	ssante.
	192
Figure III.27 : Evolution de l'atténuation en fonction de profondeur de carbonatation	
croissante	193
Figure IV.1 : Vue générale et situation des quatre ouvrages sélectionnés de l'A21	201
Figure IV.2 : Exemple de zone de prélèvement rebouchée et profil de mesure	<u></u> 201
Figure IV.3 : Exemples de zones auscultées sur les ponts de l'A21	202
Figure IV.4 : Bilan sur le OA 1202A et le OA1204B	<u></u> 203
Figure IV.5 : Bilan sur le OA 1247 et le OA 1249	205
Figure IV.6 : Géométrie de mesure appliquée pour tous les ponts de l'A21	<u></u> 206
Figure IV.7 : Evolution de la vitesse et de l'atténuation suivant la profondeur de	
carbonatation et de la porosité sur l'ouvrage OA 1202A.	212
Figure IV.8 : Evolution de la vitesse et de l'atténuation suivant la profondeur de	
carbonatation et de la porosité sur l'ouvrage OA 1204B.	213
Figure IV.9 : Evolution de la vitesse et de l'atténuation suivant la profondeur de	
carbonatation et de la porosité sur l'ouvrage OA 1247.	213
Figure IV.10 : Evolution de la vitesse et de l'atténuation suivant la profondeur de	
carbonatation et de la porosité sur l'ouvrage OA 1249.	214
1	

Figure IV.11 : Vue des corps d'épreuve dans le port	217
Figure IV.12 : Ferraillage des corps d'épreuve.	219
Figure IV.13 : Géométrie des corps d'épreuve BHP 2000.	219
Figure IV.14 : Exemple de profil P1et de profil sur la tranche avec une fissure surlig	née en
blanc sur la dalle M50-17	221
Figure IV.15 : Evolution de la vitesse en fonction de la résistance du béton.	222
Figure IV.16 : Evolution de l'atténuation en fonction de la résistance du béton.	223
Figure IV.17 : Situation des fissures pour tous les corps d'épreuve (tranche, P5)	224
Figure IV.18 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M25-17.	224
Figure IV.19 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M50-17.	225
Figure IV.20 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M75-17.	225
Figure IV.21 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M50CV-17	226
Figure IV.22 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M75-17E15.	226
Figure IV.23 : Localisation de la tranchée couverte de Guéthary.	228
Figure IV.24 : Exemples d'éclatements de béton.	228
Figure IV.25 : Vue de la zone 0, photos du transducteur récepteur et du système d'ac	quisition
de mesures	229
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizonta	ale pour
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizonta toutes les zones.	ale pour 230
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizonta toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux.	ale pour 230 232
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux.	ale pour 230 232 232
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils verticaux.	ale pour 230 232 232 232 234
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux.	ale pour 230 232 232 234 234
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.31 : Situation du pont de la Marque.	ale pour 230 232 232 234 234 234 236
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.31 : Situation du pont de la Marque. Figure IV.32 : Vue générale du pont de La Marque depuis l'aval.	ale pour 230 232 232 234 234 236 237
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.31 : Situation du pont de la Marque. Figure IV.32 : Vue générale du pont de La Marque depuis l'aval. Figure IV.33 : Maillage de mesure sur le chevêtre.	ale pour 230 232 232 234 234 236 237 238
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.31 : Situation du pont de la Marque. Figure IV.32 : Vue générale du pont de La Marque depuis l'aval. Figure IV.33 : Maillage de mesure sur le chevêtre. Figure IV.34 : Vitesse (slant stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe not stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe not stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe not stack)	ale pour 230 232 232 234 234 236 237 238 noire).
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontatoutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.31 : Situation du pont de la Marque. Figure IV.32 : Vue générale du pont de La Marque depuis l'aval. Figure IV.33 : Maillage de mesure sur le chevêtre. Figure IV.34 : Vitesse (slant stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe not stack) et moyenne mobile de péri	ale pour 230 232 232 234 234 236 237 238 noire). 240
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.31 : Situation du pont de la Marque. Figure IV.32 : Vue générale du pont de La Marque depuis l'aval. Figure IV.33 : Maillage de mesure sur le chevêtre. Figure IV.34 : Vitesse (slant stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe not stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe not stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe not stack) et moyenne sur la zone d'alcali-réaction.	ale pour 230 232 232 234 234 236 237 238 noire). 240 240
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.31 : Situation du pont de la Marque. Figure IV.32 : Vue générale du pont de La Marque depuis l'aval. Figure IV.33 : Maillage de mesure sur le chevêtre. Figure IV.34 : Vitesse (slant stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe nome Figure IV.35 : Vues des carottages et des fissure sur la zone d'alcali-réaction. Figure IV.36 : Atténuation moyenne obtenue sur les zones du chevêtre.	ale pour 230 232 232 234 234 236 237 238 noire). 240 241
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.31 : Situation du pont de la Marque. Figure IV.32 : Vue générale du pont de La Marque depuis l'aval. Figure IV.33 : Maillage de mesure sur le chevêtre. Figure IV.34 : Vitesse (slant stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe reference) Figure IV.35 : Vues des carottages et des fissure sur la zone d'alcali-réaction. Figure IV.36 : Atténuation moyenne obtenue sur les zones du chevêtre.	ale pour 230 232 232 234 234 236 237 238 noire). 240 241
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.31 : Situation du pont de la Marque. Figure IV.32 : Vue générale du pont de La Marque depuis l'aval. Figure IV.33 : Maillage de mesure sur le chevêtre. Figure IV.34 : Vitesse (slant stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe nois) Figure IV.35 : Vues des carottages et des fissure sur la zone d'alcali-réaction. Figure IV.36 : Atténuation moyenne obtenue sur les zones du chevêtre. Figure V.1 : Relation expérimentale capacité-saturation pour les deux bétons.	ale pour 230 232 234 234 236 237 238 noire). 240 241 256
Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontat toutes les zones. Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux. Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux. Figure IV.31 : Situation du pont de la Marque. Figure IV.32 : Vue générale du pont de La Marque depuis l'aval. Figure IV.33 : Maillage de mesure sur le chevêtre. Figure IV.34 : Vitesse (slant stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe to state) et des fissure sur la zone d'alcali-réaction. Figure IV.36 : Atténuation moyenne obtenue sur les zones du chevêtre. Figure IV.36 : Atténuation moyenne obtenue sur les zones du chevêtre. Figure IV.36 : Atténuation moyenne obtenue sur les zones du chevêtre. Figure IV.36 : Atténuation moyenne obtenue sur les zones du chevêtre. Figure V.1 : Relation expérimentale capacité-saturation pour les deux bétons. Figure V.2 : Relation degré de saturation – amplitude radar.	ale pour 230 232 234 234 236 237 238 noire). 240 241 256 256

Figure V.4 : Variation de l'indice d'atténuation avec la saturation.	257
Figure V.5 : Variation de la résistivité (ohm.m) avec le degré de saturation.	258
Figure V.6 : Variation de la résistivité (ohm.m) en fonction de la porosité (%) et du deg	ré de
saturation (%)	260
Figure V.7 : Courbes iso-résistivité dans le plan porosité-saturation et plages d'incertitu	de.
	260
Figure V.8 : Variation de la résistivité avec la saturation, pour l'eau pure et l'eau chloré	e265
Figure V.9 : Corrélation entre profondeur carbonatée (mm) et amplitude radar.	271
Figure V.10 : Corrélation entre profondeur carbonatée (mm) et résistivité (ohm.m).	271
Figure V.11 : Distribution des profondeurs de carbonatation en mm relevées sur les care	ottes.
	272
Figure V.12 : Valeurs d'amplitude radar sur le chevêtre.	276
Figure V.13 : Valeurs de résistivité renormée moy1(x) sur le chevêtre	276
Figure V.14 : Corrélation entre amplitude radar et résistivité renormée.	277
Figure V.15 : Régression modèle amplitude / modèle résistivité renormée	278

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Principales méthodes de tests utilisées.	38
Tableau 2. Exemple de classement des méthodes de tests de durabilité.	40
	~ -
Tableau I.1. Dégradation par attaque chimique et consequences.	65
Tableau I.2. Caractérisation des dégradations par attaque chimique.	65
Tableau I. 3 . Dégradation par attaque physique et conséquences.	66
Tableau I. 4. Croisement et applications/Avantages/Inconvénients de quelques mé	thodes de
CND.	67
Tableau II.1 : Matériaux utilisés pour les coins.	102
Tableau II.2 : Couplants utilisés.	102
Tableau II.3 : Paramètres utilisés pour les critères de sélection.	106
Tableau II.4 : Vitesse de groupe Vg et Fmax des signaux obtenus sur un mortier sa	in associé
au couplant SWC à 0,5 et 1MHz	107
Tableau II.5 : Paramètres choisis pour étudier la vitesse acoustique.	126
Tableau II.6 : Paramètres choisis pour étudier l'atténuation acoustique.	126
Tableau II.7 : Paramètres choisis pour étudier la vitesse acoustique.	132
Tableau II.8 : Paramètres choisis pour étudier l'atténuation acoustique.	132
Tableau II.9 : Paramètres choisis pour étudier la fréquence.	136
Tableau II.10 : Paramètres choisis pour étudier la vitesse acoustique.	136
Tableau II.11 : Paramètres choisis pour étudier l'atténuation acoustique.	137
Tableau II.12 : Exemple d'informations et de géométrie de mesures automat	iquement
enregistrées sous Excel.	142
Tableau III.1 : Formulation du béton B25.	151
Tableau III.2 : Formulation du béton B40.	151
Tableau III.3 : Formulation du béton B60.	151
Tableau III.4 : Caractérisation des bétons à l'état frais.	152
Tableau III.5 : Résistance en compression à 28.	153
Tableau III.6: Résultats de mesures de teneur en eau libre.	153
Tableau III.7 : Résultats de mesures de porosité accessible à l'eau.	154

Tableau III.8 : Résultats de mesures de perméabilité à l'oxygène.	_154
Tableau III.9 : Ouvertures des fissures à chaque niveau de chargement.	_160
Tableau III.10 : Paramètres acoustiques choisis pour l'étude.	_162
Tableau III.11 : Vitesses obtenues sur les différentes dalles à l'état sain.	_162
Tableau III.12 : Atténuations moyennes obtenues sur les différentes dalles à l'état sain et	et aux
trois stades de fissuration.	_165
Tableau III.13 : Vitesses acoustiques choisies pour l'étude.	_179
Tableau III.14 : Atténuations acoustiques choisies pour l'étude.	_179
Tableau III.15: Détermination du type de dalle comparée à la détermination réelle.	_181
Tableau III.16 : Vitesses acoustiques choisis pour l'étude.	_186
Tableau III.17 : Atténuations acoustiques choisis pour l'étude.	_186
Tableau III.18 : Résultats obtenues sur les dalles avec variation de teneur en chlorures.	_187
Tableau III.19 : Vitesses acoustiques choisis pour l'étude.	_191
Tableau III.20 : Atténuations acoustiques choisis pour l'étude.	_191
Tableau III.21 : Vitesses et atténuations obtenues sur les dalles carbonatées.	_192
quatre ouvrages	_202
quatre ouvrages	_202
Tableau IV.2 : Vitesses choisies pour étudier la vitesse acoustique.	_207
Tableau IV.5 : Attenuations choisies pour etudier i attenuation acoustique.	_207
Tableau IV.4 : Vitesses moyennes obtenues sur les ponts de l'A21. Tableau IV.5 : Atténuetione grande alténues sur les ponts de l'A21.	_207
Tableau IV.5 : Attenuations moyennes obtenues sur les ponts de l'A21. Tableau IV.6 : Santhère des résultate altéraise sur les neute de l'A21.	_208
Tableau IV.6 : Synthese des resultats obtenus sur les ponts de l'A21. Tableau IV.7 : Commence des resultats obtenus sur les ponts de l'A21.	_210
Tableau IV.7 : Correspondance des zones : OA 1202A (Montigny-en-Gonelle) et OA 1	204B
(Dourges).	_210
(Equippières les lens)	211
(Fouquieres-ies-iens).	_211
Tableau 1V.9 : Classement des zones pour chaque ouvrage par epaisseur de carbonat	
croissante.	_211
Tableau IV.10 : Classement des zones pour chaque ouvrage par porosite decroissante.	_212
Tableau IV.11 : Corps a epreuve retenus et tecnniques utilisees. Tableau IV.12 : Witesses securitiques chaisis a constitue de la securitique de la securitiq de la securitique de la	_218
Tableau IV.12 : Vitesses acoustiques choisis pour l'étude. Tableau IV.12 : Atténuations acoustiques alsociais neurolitéte de	_220
LADIEAU IV.15 : Attenuations acoustiques choisis pour l'étude.	220
$\mathbf{T} = \mathbf{I} + $	_220

Tableau IV.15 : Atténuations obtenues sur P1 pour les différents corps d'épreuve. 2	222
Tableau IV.16 : Présentation préliminaire des zones. 2	229
Tableau IV.17 : Vitesses acoustiques choisis pour l'étude. 2	231
Tableau IV.18 : Atténuations acoustiques choisis pour l'étude. 2	231
Tableau IV.19 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux et horizontaux. 2	231
Tableau IV.20 : Atténuations obtenues sur les profils verticaux et horizontaux. 2	233
Tableau IV.21 : Paramètres choisis pour étudier la vitesse acoustique. 2	238
Tableau IV.22 : Paramètres choisis pour étudier l'atténuation acoustique. 2	238
Tableau V.1 : Contribution du couplage issue du croisement des objectifs et des plus-val	ues
possibles2	247
Tableau V.2 : Sensibilité attendue des techniques aux défauts et/ou propriétés. 2	249
Tableau V.3 : Bilan des aptitudes : $A = détection$, $B = quantification relative, C$] =
quantification absolue2	253
Tableau V.4: Comparaison des sensibilités des mesures à une variation du degré	de
saturation2	259
Tableau V.5 : Synthèse des sensibilités aux variations des paramètres. 2	261
Tableau V.6 : Synthèse des sensibilités aux variations des paramètres. 2	263
Tableau V.7 : Synthèse des sensibilités aux teneurs en eau et chlorures. 2	265
Tableau V.8 : Synthèse des sensibilités des techniques à la fissuration. 2	267
Tableau V.9: Premier bilan des capacités opérationnelles de détection des objets	et
propriétés2	268
Tableau V.10: Aptitude théorique au diagnostic de carbonatation et sources de bu	ruit
possibles2	270
Tableau V.11 : Proposition de classement des ouvrages vis-à-vis de la carbonatation. 2	272
Tableau V.12: Aptitude théorique au diagnostic d'alcali-réaction et sources de ba	ruit
possibles2	274
Tableau V.13 : Coefficient de détermination r^2 radar – électrique.2	277
Tableau V.14 : Intensité de l'atténuation radar (une forte atténuation indique une forte ten	ieur
en eau)2	279
Tableau V.15 : Bilan des capacités des techniques 2	281

INTRODUCTION GENERALE

Les ouvrages de génie civil, bâtiments, ouvrages d'arts, réseaux, galeries, routes,... sont destinés à assurer un certain nombre de fonctions, certaines pour une durée limitée, d'autres pour de beaucoup plus longues durées, parfois plusieurs siècles.

L'ouvrage a pour but de servir aussi longtemps que possible moyennant bien sûr un minimum d'entretien et une surveillance régulière. La plupart du temps le matériau employé est le béton presque toujours associé à l'acier. L'influence des armatures sera prise en compte dans la durabilité de l'ouvrage à cause de la corrosion. Mais généralement, l'étude porte sur le béton seul car les armatures sont sensées être protégées de l'extérieur par quelques centimètres de béton appelés épaisseur d'enrobage. Cette couche protectrice est très importante pour la durée de vie de l'ouvrage, empêchant la réduction des performances mécaniques suite à la corrosion des armatures. De plus, il est assez facile de refaire cette couche protectrice quand elle est dégradée et ainsi prolonger la durée de vie de l'ouvrage.

Tous ces objectifs se traduisent par des exigences en termes de résistance mécanique et de stabilité, de comportement en service et de durabilité.

Prédire la durée de vie d'un ouvrage donné n'est pas une chose facile : elle dépend beaucoup de l'état de santé actuel qui est souvent difficile à déterminer. Cet état de santé est fonction des caractéristiques du matériau, du vieillissement et des agressions subies.

Dans le cas le plus fréquent, celui des altérations du béton armé par corrosion, dans un environnement donné, il faut connaître plusieurs paramètres pour être capable d'estimer la durée de vie résiduelle : la profondeur carbonatée, la teneur en ions chlorures, la profondeur d'enrobage, la porosité du béton ou ses coefficients de diffusion. C'est la connaissance de l'ensemble de ces paramètres, physiques, chimiques, mécaniques qui constitue l'enjeu des méthodes d'évaluation non destructive.

Le maître d'ouvrage a un certain nombre d'exigences vis-à-vis de la durabilité, d'où une stratégie de la gestion des ouvrages qui permettra par la suite de réaliser des travaux de rénovation, consolidation,...etc.

Cette stratégie ne peut être élaborée sans une connaissance précise de l'état de l'ouvrage.

N'oublions pas que la majorité du patrimoine est d'âge supérieur à trente ans. Il s'agit donc d'assurer son vieillissement correct et ainsi d'augmenter la durée de vie.

I.1. Evaluation et gestion des ouvrages.

La pratique des maîtres d'ouvrages et des gestionnaires d'ouvrage est très importante pour l'inspection et la mise en place de procédures. En effet il n'y a pas de textes réglementaires qui régissent l'évaluation des ouvrages. [Uemoto, 2000].

L'instruction technique pour la *surveillance* et l'*entretien* des ouvrages d'art avec notamment sa première partie [MELT, 1979] et ses fascicules 02 [MELT, 2002] et 03 [MELT, 1998], éditée par la Direction des Routes du Ministère de l'Equipement, expose la manière dont sont articulées les opérations de surveillance sur les ouvrages d'art. Nous nous en inspirerons largement pour préciser la signification des termes qui seront employés dans la suite.

La gestion des ouvrages commence par une surveillance qui permet de suivre l'état général afin de pouvoir programmer par la suite des opérations de maintenance si nécessaire.

Cette surveillance se décompose de la façon suivante :

-surveillance continue : surveillance organisée par les agents gestionnaires à l'occasion d'un déplacement afin de déceler une anomalie entre deux visites,

-surveillance organisée : visites de contrôle annuelles, visites d'évaluation et inspections détaillées (régulières avec une périodicité, inspections détaillées, inspections suite à un événement (séisme,...)) (fascicule 02 de l'ITSEOA [MELT, 2002],

-surveillance renforcée ou haute surveillance : auscultation et mesures de sécurité (fascicule 03 de l'ITSEOA) [MELT, 1998].

I.2.L'auscultation.

L'auscultation est un ensemble d'actions ou d'examens afin de connaître l 'état réel d'un ouvrage et de pouvoir prononcer un diagnostic de(s) pathologie(s). Mais cette auscultation passe aussi par une identification des zones altérées et si possible des mécanismes mis en jeu. L'observation visuelle est le plus souvent la première technique mise en œuvre mais des techniques plus élaborées existent comme les prélèvements, les mesures insitu...[Châtelain,1997].

Afin de réaliser un bon diagnostic pour le maître d'ouvrage, la figure1 suivante résume l'enchaînement des différentes étapes. En effet, dans un premier temps, l'ouvrage doit satisfaire un certain nombre de fonctions (critères, états limites,...) qui peuvent être plus ou moins bien assurées. Pour cela il s'agit de recueillir des informations et de mettre en œuvre des méthodes.

Cette première auscultation va passer par un ensemble d'actions :

- observation de l'ouvrage et de son environnement,

- propriétés du matériau : essais sur place (semi destructifs ou non) ou laboratoire (destructif),

- fonctionnement de la structure.

Suite à cette auscultation, les premiers résultats, issus de ces différentes méthodes, sont ensuite intégrés dans les informations recueillies pour donner une première estimation de l'état de l'ouvrage. Ces résultats donneront une évaluation (estimation des fonctions) qui pourra elle-même mener à un diagnostic et voire même un pronostic.



Figure 1. L'articulation des phases dans une démarche de diagnostic. [MDND,2005]

I.2.1 Evaluer pour prévoir.

Répondre précisément aux questions du maître d'ouvrage, c'est le rôle du diagnostic qui fournit toutes les informations utiles pour les décisions futures : état satisfaisant, durée de vie, état de la dégradation, réparations et coûts,...

Le passage au pronostic reste une tâche difficile nécessitant de connaître les différents mécanismes de dégradation et de posséder des données suffisantes sur l'ouvrage.

Ceci reste dans la pratique une tâche difficile par manque de moyens ou de connaissances en particulier des modèles d'évaluation.

Par contre le diagnostic peut être mené par une «équipe » composée :

- d'un bureau d'études qui pose les questions,

- de laboratoires qui mettent en œuvre des techniques d'investigation qui pourront peut être répondre aux questions,

- du maître d'ouvrage qui finance et qui prend les décisions.

La présence d'un coordonnateur d'expertise peut être nécessaire dans les cas difficiles. Il permettra de coordonner les différentes équipes intervenantes dans le cas de pathologie importante. Il est choisi par le maître d'ouvrage pour ses compétences techniques.

I.2.2 Evaluation des ouvrages.

Cette première évaluation dépend beaucoup de l'état actuel de l'ouvrage.

L'évaluation peut se faire de manières différentes, par exemple :

- réévaluer l'ouvrage une fois sa géométrie et les propriétés de ses matériaux mieux connues.

- estimer les modifications de l'ouvrage suite à des démolitions partielles ou des adjonctions.

Une modélisation physique peut apporter des précisions au sujet de la durée de vie. Par exemple, elle dépend pour une structure corrodée de la section et de l'enrobage des armatures, dont l'évolution des paramètres peut être modélisée.

L'évaluation est à mettre en relation avec les contraintes budgétaires qui définiront la planification des éventuels travaux. Il convient donc d'établir un certain nombre de priorités comme découper l'ouvrage en plusieurs zones ou sélectionner l'ouvrage parmi ceux d'un même parc...Une évaluation grossière de certaines tranches peut parfois suffire pour les classer les unes par rapport aux autres.

Mais dans certains cas, c'est l'évolution de la dégradation qui sera privilégié à la dégradation en elle même : certains ouvrages dégradés peuvent conserver des performances mécaniques assez stables alors que pour d'autres, leur sécurité peut en dépendre. Dans le cas de dégradation évolutive, les réparations peuvent devenir plus coûteuses et voire même impossible si aucune réparation préventive n'a été effectuée à temps. La méthode IQOA (Image de la qualité des ouvrages d'art) utilisée par la direction des routes pour évaluer l'état de ses ouvrages en est un bon exemple [Robichon, 1995].

L'analyse de mesures, de mécanismes de dégradation, de risques et de coûts permettra d'évaluer un certain nombres de propositions en tenant compte des différentes disciplines (analyse de structures, science des matériaux, chimie,...) pour l'interprétation des résultats.

I.2.3 Inspection.

La surveillance de l'ouvrage commence par une inspection visuelle régulière lors d'une visite avec une fréquence généralement annuelle, sauf pour les ouvrages présentant des pathologies importantes.

Puis une inspection détaillée peut compléter la visite de surveillance. Cette visite donne une première idée sur la (les) pathologie(s) affectant l'ouvrage ou sur les causes possibles.

Elle est importante puisqu'elle permettra d'orienter la méthodologie d'auscultation. Cette inspection comprend l'examen des éléments disponibles comme :

- le dossier d'ouvrage,

- le dossier de construction,

- le dernier rapport de visite ou du dernier rapport d'inspection détaillée,

- des photos de(s) pathologie(s)

- et la visite de l'ouvrage proprement dite.

Cela permet :

- d'évaluer l'ampleur des désordres, ce qui constitue un élément important du choix des techniques de réparation,

- de vérifier certaines hypothèses de calculs : épaisseur d'enrobage, homogénéité des matériaux, efforts dans l'ouvrage,...

I.2.4 Analyse des résultats de l'évaluation.

Un problème essentiel est de bien définir les grandeurs et d'obtenir leurs valeurs afin que leur exploitation puisse conduire à une évaluation puis au diagnostic.

Le ou les experts, à partir de la connaissance des mécanismes de dégradation, établissent les objectifs des phases d'auscultation et les grandeurs à déterminer.

Mais pour qualifier telle ou telle propriété d'un matériau, il existe un certain nombre de techniques de mesure. L'expert doit donc choisir parmi ces techniques celles qui permettront de l'aider dans son évaluation. Attention à ne pas trop faire de mesures inutiles.

L'idéal, pour éviter cela et donc perdre du temps, est de planifier les investigations sur l'ouvrage. Cette auscultation suivra un plan détaillé avec les objectifs de mesures à atteindre ainsi que les différentes investigations à mener. Ce plan peut bien sûr être modifié en cours d'investigation suite aux premiers résultats obtenus, par exemple en concentrant les efforts sur une zone bien déterminée.

I.3. Utilité et intérêt du contrôle non destructif.

L'inspection visuelle est la plus simple et la plus immédiate des méthodes de contrôle non destructif (CND). C'est ainsi que nous pourrons estimer un premier degré de dégradation et de fissuration, et peut-être identifier les premières causes de dégradation.

Pour cela, les pathologies les plus courantes ont été décrites dans une étude exploratoire sur le développement des outils de diagnostic afin d'aider à la reconnaissance et au diagnostic [Buyle-Bodin, 1998].

L'observation visuelle peut s'accompagner de moyens supplémentaires :

- appareils photos numériques

- caméras d'enregistrement

- moyens de mesure de déplacement ou de déformation de l'ouvrage (fissuromètre, déflectomètre...)

Suite à cette inspection visuelle, le maître d'ouvrage s'interroge sur la capacité de l'ouvrage à remplir ses fonctions en relation avec :

- des modifications des charges d'exploitation (augmentation du trafic en particulier des poids lourds)

- des modifications de fonctionnement (aménagements divers, extensions, tassements d'appuis,...)

- des dégradations des matériaux constitutifs de l'ouvrage.

L'inspection visuelle ne peut seule répondre à toutes ces interrogations. Le recours à l'auscultation peut s'avérer utile :

- pour un ouvrage supposé sain quand il va s'agir d'estimer, de vérifier ou de contrôler les caractéristiques de construction,

- pour un ouvrage supposé endommagé afin de détecter de l'extension de l'endommagement,

- pour un ouvrage visiblement endommagé afin de caractériser l'extension de l'endommagement.

L'intérêt principal du contrôle non destructif comme outil d'auscultation est qu'il permet sans modifier l'aspect de l'ouvrage de réaliser des investigations qui peuvent même être répétées dans le temps.

L'autre intérêt du CND est d'être quantitatif même si les grandeurs mesurées ne sont pas directement reliées aux grandeurs caractéristiques de l'état de l'ouvrage.

Il existe également des méthodes de contrôle semi destructives, par exemple prélèvement ou inclusion à la surface de l'ouvrage. Elles fournissent des données physiques, chimiques ou mécaniques directement exploitables à des fins de calage ou de confirmation. Mais il n'est pas toujours possible de faire des prélèvements sur toutes les parties d'un ouvrage sans l'altérer et leur coût limite leur emploi à des zones précises.

En conclusion les méthodes de contrôle non destructif présentent les avantages suivants :

- commodité et rapidité de mise en œuvre sur site
- coût raisonnable
- utilisation en continu sur des ouvrages de grandes dimensions
- image à grande échelle de l'ouvrage

- localisation des éventuelles zones à problème sur lesquelles on pourra se focaliser ou approfondir son étude par la suite avec d'autres méthodes.

I.4. Couplage de différentes techniques CND ou non.

Une méthode de CND délivre rarement des résultats fiables directement exploitables dans tous les contextes. Elle devra donc être complétée par d'autres techniques destructives ou non.

La combinaison de plusieurs techniques de CND peut apporter des données supplémentaires, affiner des résultats ou hypothèses, confirmer des zones d'endommagement en s'affranchissant des masquages générés par des phénomènes physiques.

Les mesures semi destructives permettent d'étalonner les mesures non destructives sur site ou de les valider par exemple pour la profondeur de carbonatation ou la résistance du béton en compression.

Le couplage de différentes méthodes de CND entre elles ou avec d'autres techniques destructives ou semi-destructives permet de mener une « stratégie d'auscultation ». Elle consiste à bien choisir les méthodes à mettre en œuvre en pensant au préalable aux combinaisons pertinentes.

L'élaboration d'une stratégie d'auscultation nécessite une bonne connaissance de l'ouvrage (plans, dossiers), de son environnement (accessibilité, climat), de son histoire (accidents, inspections antérieures),...ainsi qu'une bonne expertise des techniques d'auscultation non destructives (domaine de validité, paramètres influents).

I.5. Evaluation des méthodes de CND.

L'évaluation d'un ouvrage passe par celle du matériau ou de la structure à une échelle passant du local au global. Cette évaluation peut porter sur :

- les propriétés physiques (humidité, porosité,...), chimiques (teneurs en chlorure,...) ou mécaniques (résistance, adhérence acier/béton,...) du matériau en lui-même

- le mode de fonctionnement de la structure de l'ouvrage : transferts d'efforts, déformations, contraintes,...

- la géométrie d'une partie de l'ouvrage : épaisseur d'une dalle, poutre, localisation des aciers,...

- l'état de la surface : fissures, largeur des fissures, nid de cailloux, gonflements,...

Pour cela, les questions doivent être bien posées et les réponses précises. La plupart du temps, ces réponses en relation avec les fonctions de l'ouvrage se traduisent de la manière suivante :

- la détection : mesurer la valeur d'une propriété du matériau dans une zone, confirmer l'existence d'une altération des caractéristiques du matériau,

- la localisation : préciser l'altération par rapport à la zone auscultée, détecter un défaut de nature bien précise (fissure, vide,...),...
- la quantification : donner une valeur à la propriété ou à l'objet détecté, quantifier l'état et le comparer à des critères.

Le tableau suivant résume les principales méthodes de contrôle des structures en béton pouvant être mis en œuvre.

Propriété à étudier	Test	Type d'équipement
Corrosion des armatures	Potentiel de « half-cell »	Electrochimique
	Résistivité	Electrique
	Résistance linéaire de polarisation	Electrochimique
	Impédance	Electrochimique
	Epaisseur de la couche d'enrobage	Electromagnétique
	Profondeur de carbonatation	Chimique/microscopique
	Concentration en chlorures	Chimique/électrique
Qualité, durabilité et	Dureté de la surface extérieure	Mécanique
détérioration du béton	Vitesse ultrasonique d'impulsion	Electromécanique
	Radiographie	Radioactif
	Radiométrie	Radioactif
	Absorption de neutrons	Radioactif
	Humidité relative	Chimique/électrique
	Perméabilité	Hydraulique
	Absorption	Hydraulique
	Pétrographie	Microscopique
	Teneur en sulfate	Chimique
	Dilatation	Mécanique
	Porosité	Microscopique/Hydraulique
	Type de ciment	Chimique/microscopique
	Résistance à l'abrasion	Mécanique
Résistance du béton	Prélèvements	Mécanique
	Pull-out	Mécanique
	Pull-off	Mécanique
	Compression	Mécanique
	Fracture interne	Mécanique
	Résistance à la pénétration	Mécanique
	Maturité	Chimique/électrique
	Cure	Electrique/électronique
Intégrité et performance	Tassement	Mécanique
	Pulse écho	Mécanique/électronique
	Réponse dynamique	Mécanique/électronique
	Emission acoustique	Electronique
	Thermoluminescence	Chimique
	Thermographie	Infrarouge
	Radar	Electromagnétique
	Location des armatures	Electromagnétique
	Mesures de la fissuration	Optique/mécanique/électrique
	Mise en charge	Mécanique/électronique/électrique

 Tableau 1. Principales méthodes de tests utilisées. [Bungey, 1996]

Cette prévision de l'évolution des fonctions de l'ouvrage est le besoin le plus courant des maîtres d'ouvrages puisque l'état futur dépend de l'état actuel, de la géométrie et des mécanismes d'évolution de l'ouvrage. Et ceci est très difficile à réaliser.

Pour essayer de lever cette difficulté, chacune des méthodes de CND doit connaître ses capacités à répondre aux questions formulées ou à mesurer des objets et propriétés.

Afin de répondre à cette évaluation des méthodes, une grille d'évaluation a été établie par le Comité Technique RILEM « Preliminary assessment of NDT Methods », (RILEM TC NEC) [RILEM, 2000], selon les caractéristiques suivantes :

« user-friendliness » : facilité opératoire pour obtenir un résultat sur le site, incluant le travail préparatoire et la durée de l'essai,

- caractère non-destructif ou semi-destructif : degré auquel la surface du béton reste exempte de toute altération après l'essai, nécessité ou non de pénétrer dans la matière de l'ouvrage (méthode intrusive), niveau d'endommagement nécessaire par rapport au volume intéressé par la conclusion,

- répétabilité : aptitude de la méthode à fournir des résultats identiques pour des mesures répétées dans des conditions identiques,

- disponibilité de l'équipement de mesure.

Les caractéristiques suivantes évaluent les propriétés étudiées :

- sensibilité de la mesure à une variation de la propriété à mesurer (la méthode est d'autant plus pertinente qu'une faible variation de la propriété se traduit par une forte modification de la mesure),

- validité conceptuelle, qui mesure le degré de logique et le caractère rationnel des concepts de la méthode et des modèles d'obtention des résultats (phase d'interprétation et de dépouillement des mesures),

- degré de pertinence, ou de corrélation entre les résultats de l'essai et les mécanismes ou propriétés à évaluer.

I.6. Mise en œuvre et utilisations actuelles des CND.

Parmi toutes les techniques de CND, le choix de celles qui sont les plus pertinentes pour une stratégie d'auscultation bien définie est difficile à réaliser. Ce choix peut s'effectuer en fonction du temps ou de la rapidité de mise en œuvre mais aussi du coût.

Le tableau suivant résume un classement des méthodes d'évaluation de la durabilité du béton armé en fonction de leur coût, de la rapidité d'exécution, des dommages et des applications.

Méthode	Coût	Rapidité	Dommage	Applications
		de mis en	_	
		oeuvre		
Mesure de l'épaisseur	Faible	Rapide	Non	
d'enrobage				Risque et cause de
Profondeur de carbonatation	Faible	Rapide	Mineur	corrosion
Teneur en chlorures	Faible	Rapide	Mineur	
Potentiel de « half-cell »	Moyen/élevé	Rapide	Mineur	Risque de corrosion
Résistivité	Moyen/élevé	Rapide	Mineur/non	-
Résistance linéaire de	Moyen/élevé	Moyen	Mineur	
polarisation				Evaluation du taux
Impédance	Moyen/élevé	Lent	Mineur	de corrosion
Impulsion galvano statique	Moyen/élevé	Rapide	Mineur J	
Absorption	Modéré	Lent	Modéré/ Mineur	
Perméabilité	Modéré	Lent	Modéré/ Mineur	Cause et risque de
Humidité relative	Faible	Lent	Mineur	corrosion &
Chimique	Elevé	Lent	Modéré	-détérioration du
Pétrographie	Elevé	Lent	Modéré	béton
Dilatation	Elevé	Lent	Modéré	
Radiographie	Elevé	Lent	Non J	

Tableau 2. Exemple de classement des méthodes de tests de durabilité. [Bungey, 1996]

Il faut pouvoir relier les grandeurs géométriques ou physiques fournies par le CND à des propriétés des matériaux inconnues (réponse indirecte).

Cela est facile quand les mesures sont directement corrélées avec l'état à qualifier, mais peut devenir très complexe quand des facteurs perturbateurs extérieurs influent.

Par exemple, il n'est pas possible d'établir une corrélation universelle entre la vitesse des ondes dans le béton et sa résistance en raison de la complexité du matériau. Mais moyennant une analyse simple, cette vitesse peut être reliée au module dynamique de déformation du béton.

Afin de connaître la sensibilité et les domaines d'application des appareils utilisés pour le CND, il est nécessaire de disposer de collections de données suffisantes issues d'essais de référence sur le matériau sur lequel on travaille [Buyle-Bodin, 1998].

En effet, le résultat fourni par une méthode de CND peut être fonction de plusieurs paramètres du matériau qui ne peuvent être séparés aisément. L'utilisation de plusieurs méthodes complémentaires de CND peut résoudre le problème. Une solution consiste à corriger la mesure en tenant compte d'un paramètre perturbateur bien identifié de sensibilité différente à ces paramètres (exemple de la teneur en eau dans le béton).

Pour éliminer certains paramètres d'influence, nous pouvons également réaliser des mesures sur des parties de l'ouvrage en bon état considérées comme référence et mener une analyse comparative.

Un autre aspect important dans la détermination de bons résultats est le facteur humain. La formation et la qualification de la personne qui réalise le CND sont indispensables pour garantir un travail de qualité. Par exemple, en technique radar, le choix de l'antenne conditionne la profondeur d'investigation, ce qui sous-entend une grande expérience de l'expérimentateur tant en physique qu'en génie civil.

I.7. Les méthodes de CND vis-à-vis du maître d'ouvrage.

Les données issues des méthodes de CND n'apportent pas de réponses directes aux questions que se pose le maître d'ouvrage [Buyle-Bodin, 1998]. L'auscultation représente un investissement non négligeable, le diagnostic basé sur les résultats de l'auscultation est souvent peu ou mal exploité. Il n'existe pas de guide ou de standard permettant de conclure simplement.

Une revue faite par le Comité Technique « Non Destructive Evaluation » de la RILEM recense plus de 115 méthodes de CND des propriétés du béton [RILEM, 2000].

Des recherches diverses ont permis d'établir des tableaux de synthèse. Nous trouvons dans la littérature par exemple des tableaux reliant :

- les types de défauts aux mécanismes physico-chimiques d'évolution [OCDE, 1998],

- les types de défauts à détecter aux méthodes d'auscultation les plus appropriées

[Baker, 1992], [Bungey, 1996], [OCDE, 1998], [FSTT 1998],

- les fonctions que l'ouvrage doit assurer aux types de défauts à détecter et aux propriétés concernées et mesures possibles [Uemoto, 2000].

D'autres tableaux décrivent les principes, coût, vitesse, conditions d'utilisation des méthodes d'auscultation [AFREM, 1993], [Bungey, 1996], [OECD, 1998], Rhazi [2000].

Le maître d'ouvrage est intéressé par le diagnostic et le pronostic. Les moyens d'y parvenir ne l'intéressent a priori pas. Cela relève de la responsabilité du maître d'œuvre.

La grande variété des types de diagnostic impose de les définir clairement. Le choix du type de diagnostic doit être fait en liaison avec les objectifs recherchés par le maître d'ouvrage : géométrique, propriétés des matériaux, fonctions, durabilité...

I.8. Le projet dans lequel s'inscrit cette thèse.

Le présent travail de thèse est une partie d'un projet de recherche national financé par le réseau génie civil et urbain RGCU et le Ministère de la Recherche : « Evaluation de la dégradation du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages ». Ce projet repose sur la réunion de partenaires concernés quotidiennement par le diagnostic d'ouvrages et d'équipes universitaires mettant en œuvre plusieurs techniques avec des approches différentes, mais fortement complémentaires pour le diagnostic du béton de recouvrement des armatures. Le projet a pour particularité d'être centré autour des ouvrages existants, en plus du travail de laboratoire (pour isoler les phénomènes et valider les concepts).

En outre, la mise en commun de corps d'épreuve, d'ouvrages et de moyens doit permettre des confrontations efficaces et doit faire émerger des couplages pertinents, nécessaires pour aboutir à un diagnostic fiable de diverses pathologies.

Pour cela, plusieurs techniques d'auscultation sont exploitées et notamment l'auscultation sonique, la réflectométrie RADAR, la mesure capacitive et la résistivité électrique.

Le projet est piloté par le professeur Ginette Arliguie du LMDC de Toulouse et regroupe les partenaires suivants (résumé dans tableau en annexe) :

- la Société GETEC (Toulouse),

- le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions LMDC - INSA - UPS (Toulouse),

- le Centre de Toulouse de l'ONERA,

- le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussés de Toulouse LRPC Section Ouvrages d'Art,

- le LERM (Arles),

- le CDGA de l'Université Bordeaux I,

- la Société SOVEP (Lille),

- le Laboratoire de Mécanique de Lille LML (Département GT-GC de Polytech'Lille),

- le Groupe Acoustique-Electronique de l'Ecole Centrale de Lille (IEMN DOAE UMR 8520 CNRS),

- le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC, Section Reconnaissance Géophysique (Nantes).

I.8.1 Présentation générale de l'équipe de Lille.

L'utilisation de méthodes non destructives apporte des réponses intéressantes à l'étude de la dégradation des ouvrages en béton armé. Ces méthodes analysent principalement la peau du béton, partie supérieure du matériau, qui assure la protection de l'intérieur des ouvrages. L'état de dégradation de cette peau est donc un indicateur général de l'ouvrage. Plus précisément, il peut être possible par l'évaluation de l'état de cette peau, de prévoir la position de l'ouvrage dans son cycle de vie. C'est pourquoi l'équipe de Lille se divise en deux sous-équipes :

- celle de Mr Buyle-Bodin travaillant sur le thème «matériaux et durabilité » du Département GT-GC de Polytech'Lille rattaché au LML,

- celle de Mr Piwakowski travaillant que le thème « imagerie et caractérisation
 des milieux non homogènes par ondes acoustiques » du Groupe Acoustique-Electronique de
 l'Ecole Centrale de Lille.

La recherche menée par les équipes lilloises fait donc appel à l'analyse de la peau du béton par ondes ultrasonores haute fréquence. Il s'agit pour la première année d'une étude de faisabilité conduite en laboratoire, qui se prolonge par la mise au point d'un prototype d'appareil d'auscultation des ouvrages sur site avec des premières mesures d'évaluation et d'ajustement.

La recherche a donné lieu à 18 publications depuis 1999.

Parmi les diverses causes de dégradation, de nombreux ouvrages en béton sont exposés aux risques de corrosion des armatures du béton. Il apparaît donc important de pouvoir détecter rapidement, par une auscultation non destructive, les premiers signes de cette dégradation pour mettre en œuvre le plus tôt possible une réparation préventive. Les dégradations du béton armé ont des causes extérieures. La peau du béton, zone périphérique de l'ouvrage, assure sa protection. C'est donc l'état de cette peau dont l'évaluation est proposée.

Dans ce contexte, notre équipe s'est fixée pour objectif de mettre au point un appareil permettant l'auscultation sur site de la peau du béton. La mise au point passe par une étude en laboratoire sur éprouvettes de mortier et de béton.

L'évaluation est basée sur l'analyse d'une impulsion acoustique transmise à travers le matériau. La commodité d'emploi et le coût raisonnable des méthodes ultrasonores ne sont en effet plus à prouver.

La dégradation doit être détectée au stade le plus précoce et, pour ce faire, l'analyse est conduite à des fréquences de 0,5 à 1 MHz. Cette gamme de fréquence est inhabituelle dans le domaine du génie civil, mais elle s'impose au vu de la faible épaisseur de la couche dégradée et de la taille des discontinuités engendrées par la dégradation.

L'étude de faisabilité a consisté à mesurer la vitesse et l'atténuation des trois types d'ondes : ondes longitudinales, transversales et ondes de surface. Elle doit permettre à terme de préciser les corrélations entre le niveau de dégradation et la variation des paramètres acoustiques. Parmi ces ondes, les ondes de surface sont retenues pour l'appareil d'auscultation sur site. Celui-ci devra en fin de projet être capable de fournir des données sur la nature et la profondeur de la couche dégradée, et d'apporter une contribution consistante à l'analyse en parallèle par radar, résistivité, ultrasons, et autres.

I.8.2 Présentation générale des travaux de l'équipe de Toulouse.

De nombreuses études ont montré que pour bon nombre d'ouvrages en béton armé, la corrosion des armatures est en passe de devenir un facteur de dégradation important. Pour ce type de dégradations les principales causes possibles sont la carbonatation et la pénétration des chlorures. Dans un cas comme dans l'autre, la teneur en eau du béton de recouvrement des armatures est un des facteurs déterminants vis à vis de l'évolution du processus de corrosion.

Un système RADAR (**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging) est un dispositif capable d'émettre des impulsions électromagnétiques de fréquences appropriées et d'enregistrer un ensemble de réflexions générées par des objets (cibles) situés dans son environnement. Outre la simple détection de l'existence d'une cible, l'analyse des temps de propagation et de l'atténuation des signaux électromagnétiques peut donner accès à des paramètres intéressants tels que la position de la cible (radar aérien, météorologique) ou encore aux caractéristiques

électromagnétiques (permittivité diélectrique) du milieu de propagation. Le RADAR, par les multiples utilisations qui en sont faites en géophysique, est un outil dont les perspectives d'utilisation ne sont pas encore toutes exploitées. Pourtant, son intérêt est manifeste vis à vis des objectifs que nous nous sommes fixés, puisque sa mise en œuvre sur un tablier de pont par exemple, ne nécessite pas l'interruption du service de l'ouvrage. En effet le balayage par antenne RADAR peut se faire à partir d'un véhicule circulant sur la chaussée. Il n'est pas nécessaire d'avoir un accès direct à la structure, la couche de roulement est préservée. L'auscultation est rapide et facilement reproductible ce qui rend plus aisé le suivi d'un ouvrage dans le temps. La prise de décision souvent difficile des maîtres d'ouvrage devrait ainsi être facilitée.

Pour les ouvrages d'art du Génie Civil, le RADAR est encore peu utilisé. Les applications initiales en génie civil peuvent se décomposer en deux familles : détection (cavités, délamination des tabliers de pont, canalisations, structure de chaussées...) et mesure (épaisseur de dalles, de couches de roulement, profondeur d'armatures...). L'intérêt de cette technique tient au fait que l'auscultation est totalement non destructive et de mise en œuvre simple et rapide. Cependant, les premiers résultats obtenus (détection de la délamination, mesures de profondeur) ne présentaient pas une grande fiabilité et le développement commercial trop rapide de l'auscultation radar a dans un premier temps porté préjudice à la technique. Les limitations actuelles dans l'utilisation du RADAR résident principalement dans l'interprétation des mesures, fortement dépendante de la qualité du traitement du signal, qui demeure une difficulté majeure. Cette difficulté est d'une part liée à la qualité du signal émis par l'antenne, et d'autre part au manque de connaissances précises sur les propriétés diélectriques du béton. Les problèmes de qualité des signaux incidents ont aujourd'hui beaucoup moins d'importance grâce au développement récent d'antennes de haute résolution. L'antenne au sol de fréquence centrale égale à 1.5 GHz de la société américaine Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI) présente par exemple l'avantage d'émettre une impulsion très courte limitant ainsi les problèmes d'interférences entre signaux incidents et réfléchis et facilitant les opérations de traitement. En revanche, les lacunes importantes qui demeurent encore aujourd'hui sur la compréhension des caractéristiques diélectriques du béton empêchent de mettre au point des modèles de propagation pertinents, qui permettraient par inversion de déterminer des caractéristiques intéressantes du matériau (humidité, teneur en ions dissous...) en vue du diagnostic de la corrosion des armatures par exemple. Des sociétés spécialisées ont développé ces dernières années des outils logiciels de traitement automatique

des données radar recueillies sur tablier de pont (IRIS par Penetradar, DECAR par Infrasense...), mais leur efficacité reste très contestée du fait qu'ils s'appuient tous les deux sur des hypothèses fortes.

L'intérêt de développer le radar comme outil d'aide au diagnostic de la corrosion des armatures repose sur le fait que la propagation des signaux électromagnétiques dans le béton est très affectée par la teneur en eau et la présence éventuelle de chlorures, qui sont des indicateurs essentiels vis à vis de la détection de la corrosion. Les ouvrages concernés sont tous ceux qui sont susceptibles d'être affectés par la corrosion, qu'ils soient d'accès facile ou non, les antennes étant très facilement manipulables (poids et encombrement faibles, unité de mesure portative et autonome). En outre, son fonctionnement ne nécessite pas l'accès aux deux faces d'une paroi (intérêt pour les murs de soutènement, les barrages, etc....). Enfin, les investigations sont très rapides et ne nécessitent pas une interruption du fonctionnement des ouvrages, ce qui constitue un avantage pour ceux qui sont liés au trafic routier ou ferroviaire.

Le travail réalisé jusqu'à présent au LMDC a consisté à mettre en évidence la sensibilité de la technique RADAR vis à vis de deux paramètres essentiels pour la durabilité du béton d'enrobage, la teneur en eau et la teneur en chlorures.

Les études de sensibilité réalisées en laboratoire dans des conditions expérimentales maîtrisées ont toutefois été validées par des auscultations d'ouvrages.

I.8.3 Présentation générale des travaux de l'équipe de Bordeaux.

La mesure des résistivités sur ouvrages en béton armé fait partie des mesures électriques qui comprennent actuellement la mesure du potentiel de corrosion, et la mesure de la résistance de polarisation des armatures. Ces trois techniques sont principalement utilisées dans le cadre de l'évaluation de la corrosion des armatures dans le béton. L'utilisation de la résistivité électrique proposée dans ce projet, et telle qu'elle est développée au CDGA, exploite la sensibilité de cette mesure à la porosité du matériau pour l'étude des altérations de la matrice cimentaire.

Du point de vue de leur résistivité, les bétons sont représentés schématiquement comme des milieux bi phasiques. Le modèle retenu généralement est composé de granulats (solides et totalement isolants) noyés dans la matrice cimentaire (solide) dont la porosité est partiellement remplie d'eau (supportant les électrolytes). Selon cette représentation, la

conduction dans le béton est essentiellement de nature électrolytique. On note que la porosité est un paramètre essentiel, qui va conditionner les possibilités de circulation des fluides (donc des électrolytes) dans la matrice. Andrade et Alonso (1996) avancent que la résistivité électrique prend en compte les paramètres de connectivité et de tortuosité de la porosité.

L'altération physique ou chimique des bétons se traduit généralement par des variations de porosité. Qu'il s'agisse de dissolution d'éléments solides sous l'effet de fluides agressifs (lixiviation), ou bien qu'au contraire il y ait des recristallisations d'éléments expansifs (cas de l'éttringite), on observe toujours un changement dans le volume ou la nature de la porosité. En ce qui concerne les sollicitations mécaniques, l'endommagement classique est la fissuration, plus ou moins intense, plus ou moins évolutive. Considérant les propriétés électriques des matériaux, on peut admettre que la fissuration s'apparente à la création de voies de circulation des fluides au sein de la matrice solide.

Dans tous les cas de figure, l'altération ou l'endommagement du matériau de construction se traduit par des variations dans le régime d'écoulement et de circulation des électrolytes, et peut donc à ce titre être étudié par les mesures électriques.

S'inspirant des travaux en géophysique, le CDGA développe un dispositif de mesure quadripolaire, et son protocole de mesure associé. L'originalité réside d'une part dans la géométrie carrée du dispositif de mesure, d'autre part dans la définition d'un protocole spécifique d'utilisation in situ.

I.8.4 Présentation générale des travaux de l'équipe de Nantes.

Le principe de la technique repose sur la mesure de la fréquence de résonance d'un circuit oscillant entre deux électrodes posées sur du béton. Si on considère ces deux électrodes métalliques, elles constituent avec le matériau environnant un condensateur diélectrique dont la capacité exprimée en Farad dépend de la géométrie des électrodes et de la valeur de la constante diélectrique relative ε_r du matériau. Ainsi, la fréquence de résonance dépend de la capacité de ce condensateur spécial.

En pratique, cela se traduit par une fréquence de résonance qui varie en fonction de la nature diélectrique du béton. Et celle-ci est principalement dépendante de la teneur en eau. C'est donc une technique de mesure d'humidité couramment employée sur des structures en maçonnerie.

On remarque que la valeur de la capacité est proportionnelle à la constante diélectrique, et en particulier plus le matériau contiendra de l'eau, plus la capacité sera élevée.

Plusieurs électrodes peuvent être montées en parallèle pour modifier, soit le volume de mesure, soit la profondeur d'action. Celle-ci oscille, suivant les dispositifs, entre quelques millimètres et deux trois centimètres.

Pour mesurer la capacité diélectrique, on utilise en général un circuit électronique (oscillateur) qui délivre une tension alternative dont la fréquence dépend de la valeur de la capacité. Cette fréquence est mesurée par un fréquencemètre et, si un étalonnage a pu être réalisé, on obtient une relation fréquence – teneur en eau.

En pratique, pour les ouvrages en béton armé, il existe toujours un gradient important d'humidité dans le béton. Les mesures capacitives donnent alors une information volumique sur la permittivité relative moyenne du béton sur les premiers centimètres qui prend en compte la teneur en eau à différentes profondeurs avec une pondération liée à la distance entre les électrodes les couches élémentaires concernées.

Mais, dans une telle situation un étalonnage reste difficile, voire impossible. La première raison est que la nature des composants du béton est très variable suivant les ouvrages. Les permittivités relatives correspondantes peuvent être notablement différentes pour une même teneur en eau. De plus, il existe toujours un gradient d'humidité au sein du béton qui rend toute tentative d'étalonnage inutile. Il faut donc se contenter d'une information relative qui évolue avec la teneur en eau du béton de surface (lui-même sensible à la teneur en eau en profondeur).

Le travail du LCPC concerne l'utilisation des ondes de surface pour la caractérisation de fissures débouchant en surface. Ce travail fait suite à la thèse de G. Hévin qui a montré que la profondeur de cette fissure peut être obtenue en étudiant dans le domaine fréquentielle la répartition de l'énergie des ondes de surface de part et d'autre de la fissure. Ce principe, validé sur des modèles physiques contrôlés (dalles de béton épaisses, trait de scie de 0.5cm d'épaisseur), doit être maintenant transposé sur des cas réels.

I.9. Le travail de thèse.

Le travail proprement dit de cette thèse porte sur le développement d'une méthode d'auscultation par ondes ultrasonores des ouvrages en béton armé. Le mémoire se divise en cinq chapitres. Suite à l'introduction générale, nous verrons dans le premier chapitre une introduction à la durabilité du matériau béton et l'utilisation des ondes de surface comme technique de CND. Dans le chapitre 2, nous verrons le développement des différentes versions du dispositif expérimental du système de mesures ultrasonores. Ainsi, nous réaliserons des essais sur des corps d'épreuve de laboratoire au chapitre 3 et sur des ouvrages (in situ) au chapitre 4.

Nous avons souligné dans cette introduction générale l'intérêt du croisement entre les différentes techniques de CND. Ce point sera traité dans le chapitre 5 au sujet du couplage des méthodes de CND.

CHAPITRE 1 : Introduction à la durabilité du matériau béton et utilisation des ondes de surface comme technique de CND Nous allons étudier dans ce chapitre les propriétés du matériau béton qui influent sur la durée de vie et les performances mécaniques des ouvrages. Nous aborderons plus précisément certains mécanismes de dégradation du matériau et leurs conséquences sur la durabilité des structures.

I.1. La résistance.

La plupart du temps, dans la littérature, les résistances considérées sont celles en compression et en traction.

La résistance en compression est la résistance de référence la plus utilisée en terme de valeur de caractérisation d'un béton. Elle est généralement mesurée à 28 jours suivant une procédure normalisée : la compression axiale d'un cylindre droit d'une hauteur double du diamètre (norme NF P18-406) est la plus utilisée en France.

Pour un chargement uniaxial, la seule composante non nulle du tenseur de contraintes σ est σ_{zz} .

La loi de Hooke (équation I.19 au paragraphe I.7.3) se réduit à :

$$0 = \lambda tr\varepsilon + 2\mu\varepsilon_{xx} \qquad (I. 1)$$

$$0 = \lambda tr\varepsilon + 2\mu\varepsilon_{yy} \qquad (I. 2)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda tr\varepsilon + 2\mu\varepsilon_{zz} \qquad (I. 3)$$

où λ et μ sont les coefficients de Lamé, tr ϵ (trace du tenseur de déformation) correspond à la dilatation volumique.

De ces équations, on extrait (sachant que $tr \varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$):

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = -\frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \varepsilon_{zz} \qquad (I . 4)$$
$$\sigma_{zz} = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \varepsilon_{zz} \qquad (I . 5)$$

or, $\sigma_{zz} = E \varepsilon_{zz}$ et $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = -v \varepsilon_{zz}$.

On peut représenter la variation de la contrainte en fonction de la déformation longitudinale, et déterminer le module de Young *E*, la limite d'élasticité σ_c et la résistance en compression Fc (fig. I.1). La limite d'élasticité est la contrainte maximale admise par le matériau au-delà de laquelle la réversibilité des déformations n'est plus vérifiée.



Figure I.1 : Diagramme contrainte-déformation.

De même, on peut représenter la déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale, et déterminer le coefficient de Poisson v (fig. I.2).



Figure I.2 : Diagramme déformation longitudinale-déformation transversale.

Ces représentations graphiques montrent la signification physique de ces modules :

- E : représente la rigidité du matériau sous chargement uniaxial,

- v : représente la capacité du matériau à transférer sa déformation

perpendiculairement au chargement.

La résistance en traction traduit généralement la capacité de résistance à la fissuration du béton. La valeur de résistance en traction est environ dix fois plus faible que la valeur en compression. Cette résistance est classiquement mesurée sur des éprouvettes identiques a celles de la compression suivant la technique du fendage (norme NF P18-408).

La résistance mécanique est influencée par les facteurs suivants :

- la qualité du ciment caractérisée par sa classe de résistance : plus celle ci est élevée, plus la résistance du béton est importante,

- les dosages en ciment et en eau représentés par leur rapport E/C (E=eau, C=ciment): la résistance croit quand E/C décroît,

- la qualité des granulats par la proportion relative sable/gravier mais aussi la forme et la taille des granulats,

- la température et l'humidité : surtout lors de la phase de durcissement,

- la limite d'élasticité σ_c .

I.2. La porosité.

La porosité est le paramètre de premier ordre de la durabilité car il régit la capacité de pénétration des agents agressifs. Si le matériau est poreux, ses performances mécaniques sont diminuées ainsi que sa durabilité du fait de la pénétration des agents agressifs par le réseau de fissures ou de microfissures puis le réseau poreux.

La pénétration des agents agressifs se caractérise par la perméabilité et la diffusivité qui sont deux mécanismes de transport de matière :

- la perméabilité décrit un écoulement qui se produit sous gradient de pression,

- la diffusivité sous gradient de concentration en phase liquide ou gazeuse à une échelle beaucoup plus petite (moléculaire).

Un milieu poreux se compose d'une matrice solide (granulats, hydrates, ciment anhydre) et d'un espace de vides :



Figure I.3 : Représentation schématique d'un milieu poreux.

Les pores ou vides sont remplis d'air et (ou) d'eau. Les pores forment un espace poreux de forme géométrique très complexe et constitué de :

- pores interconnectés : les vides sont connectés entre eux, nous parlons alors de porosité ouverte, et c'est ce milieu poreux qui participe au transport des matières et des agents agressifs.

- pores isolés ou non connectés : les vides ne communiquent pas entre eux, nous parlons alors de porosité fermée.

- pores aveugles ou bras morts : les vides sont connectés d'un seul coté et sont accessibles mais ne permettent pas d'échange.

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la porosité. La plus classique consiste à remplir avec un fluide le volume poreux d'un échantillon préalablement séché. La différence de poids (saturé-sec) permet de déduire le volume poreux. Les fluides habituellement utilisés sont l'eau, le mercure, l'hélium, le méthanol. La mesure de la porosité ouverte à l'eau est très répandue en raison de sa relative facilité de mise en œuvre. Mais elle ne donne qu'une valeur globale et ne permet pas de connaître la distribution des pores.

Pour la porosité ouverte à l'eau, connaissant la masse volumique de l'eau (ρ_{eau} = 1g/cm³), on peut en déduire facilement la porosité par :

$$\rho_{\text{\acute{e}chantillon}} = \frac{V_{\text{pores}}}{V_{\text{total}}} = \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}}}{V_{\text{total}}} \times \frac{1}{\rho_{\text{eau}}}$$
(I.6)

où

 m_{sat} : masse de l'échantillon saturé en g m_{sec} : masse de l'échantillon sec en g

 V_{pores} : volume poreux

 V_{total} : volume total de l'échantillon en cm³

 ρ_{eau} : masse volumique de l'eau en g/cm³

Pour obtenir le rayon et la distribution du réseau poreux, une méthode consiste à utiliser la porosimètrie au mercure. Cette mesure consiste à remplir les pores de l'échantillon de mercure sous pression. Le champ examiné des diamètres de pores supposés de section circulaire est proportionnel à la pression appliquée selon la loi de Laplace :

$$d = \frac{I\cos\theta}{p} \tag{I.7}$$

où

I: tension superficielle phase mouillante-phase non mouillante (N/m)

 $\boldsymbol{\theta}$: angle de contact liquide-solide

p : surpression capillaire (Pa)

d: diamètre des pores (m)

De nombreuses relations empiriques relient la résistance à la compression et la porosité. En 1892, Feret a proposé une loi qui relie ces deux paramètres :

$$\sigma_{\rm c} = K_{\rm f} . \sigma_{\rm mc} . (1 - \rho)^2 \qquad (I . 8)$$

où σ_c est la résistance à la compression, σ_{mc} est la résistance normale du ciment à la même échéance (à 28 jours par exemple), ρ est la porosité de l'échantillon et K_f une constante qui dépend de la nature des granulats.

De façon générale la relation est de la forme :

$$\sigma_{c} = \sigma_{0} \left(1 - \rho\right)^{A} \qquad (I.9)$$

où σ_0 est la résistance à la compression potentielle à porosité capillaire nulle et *A* une constante qui est fonction de la nature de la pâte et du degré d'hydratation.

Plusieurs études ont abouti à des relations empiriques [Bal'shin, 1949], [Ryshkewitch, 1953], [Schiller, 1971], et [Carde, 1996]. La figure I.4 illustre le type de graphe obtenu en général.





Les résultats de toutes ces études, quel que soit le modèle, permettent de conclure que plus la porosité augmente moins le matériau est résistant.

Le rapport E/C (E=eau, C=ciment) a un effet sur la porosité : le volume de la porosité ouverte et la dimension des pores augmentent avec le rapport E/C.

I.3. L'homogénéité à l'échelle de l'ouvrage.

Pour garantir une bonne durabilité de l'ouvrage, il est nécessaire d'éviter de créer des zones plus sensibles à la pénétration d'agents agressifs. Il faut donc que le béton soit homogène sur tout l'ouvrage. Pour cela, il faut éviter les nids de cailloux ou de graviers qui sont une des conséquences de la ségrégation. Cette ségrégation est le résultat d'une mauvaise adéquation entre la formulation du béton et les conditions de mise en œuvre.

Ceci est remédiée par une bonne consistance (béton fluide et réglage correct du dosage en eau) qui permet au béton de se répartir correctement au moment du coulage et de bien protéger les armatures.

I.4. Les différentes dégradations du matériau béton.

Le béton a la capacité de protéger les armatures de la corrosion. Mais de nombreuses agressions chimiques et physiques sont capables de dégrader le béton et d'altérer cette protection, ce qui conduit à la corrosion des armatures, la fissuration ou microfissuration et l'augmentation de la porosité. La qualité du béton d'enrobage est ici primordiale.

I.4.1 Les dégradations d'ordre chimique.

La dégradation du béton peut résulter de diverses réactions chimiques qui ont pour support commun l'eau et proviennent de l'environnement (nature, concentration, renouvellement ou non des agents agressifs). Les ouvrages sont en effet exposés à la pluie, à la neige, au gel dégel, à l'eau de mer,...

La solution interstitielle du béton, située dans sa porosité, présente un pH basique (environ 12,5) dû à la nature de la pâte de ciment :

- 15 à 20 % d'une base forte la portlandite,

- 70 % de C-S-H silicates de calcium hydratés considérés comme des sels d'acide faible (silicique) et de base forte,

- 10 à 15 % d'aluminates et sulfoaluminates de calcium hydratés,

- des alcalins dans la solution interstitielle dans les pores et les capillaires.

Or le pH de l'environnement extérieur est bien inférieur à cette valeur. Il en résulte un déséquilibre chimique entre le béton et le milieu extérieur, ce qui conduit à la production de

sels solubles ou insolubles; et même une dissolution qui peut conduire à un lessivage de la chaux donc une dégradation du béton. Ce type de dégradation est classé en deuxième position derrière la corrosion [OCDE, 1989].

Les agents chimiques agressifs sont variés :

- les gaz : d'origine naturelle ou résultant de pollution atmosphérique et de fermentation comme le dioxyde de carbone, de soufre et d'azote, les vapeurs chlorées,...

- les liquides : organiques ou non, acides ou basiques, dont les ions sont agressifs,

- les solides : des déchets d'origines diverses ou issus des sols,

- les milieux biologiques : essentiellement des bactéries, champignons, organismes présents dans l'eau de mer,...

Les mécanismes fondamentaux d'altération du béton se présentent sous trois formes :

- hydrolyse (dissolution issue des ions réagissant avec l'eau) des hydrates de la pâte de ciment durcie,

- réactions d'échange entre le milieu agressif et les composés hydratés,

- réactions (cristallisation) entraînant la formation de produit expansif.

Nous allons par la suite nous intéresser à plusieurs types d'attaques chimiques.

I.4.1.1 Attaque par les eaux pures ou douces.

L'attaque du béton par les eaux douces agressives dépend de la teneur en dioxyde de carbone agressif, des possibilités de renouvellement de l'eau, de la compacité du béton et du type de ciment. Le résultat peut conduire à une dissolution de la chaux très soluble dans l'eau, phénomène de lixiviation. Si le béton contient beaucoup de chaux, cette attaque devient importante. Ces eaux sont principalement issues du ruissellement de l'eau de pluie pure.

Les conséquences sont une réduction des propriétés mécaniques du béton associée à une augmentation de la porosité interne qui se manifeste parfois par l'apparition d'efflorescences ou de petites stalactites blanchâtres en surface du béton (fig. I.5).



Figure I.5 : Exemple de stalactites blanchâtres en surface du béton.

I.4.1.2 Attaque par les sulfates.

Les sulfates se trouvent naturellement dans les sols. Ils peuvent être d'origine naturelle, biologique, ou provenir de pollutions domestiques ou industrielles. Ils constituent un élément nutritif pour les plantes à des concentrations faibles. Par contre l'utilisation des engrais chimiques conduit à la production de sulfate d'ammonium très agressif, qui se retrouve dans les eaux souterraines. Le béton au contact des eaux souterraines, de l'eau de mer, des pluies acides,...réagit chimiquement avec les ions sulfates, ce qui conduit à de la cristallisation sous forme d'aiguilles. Le développement de ces cristaux engendre des contraintes internes importantes (expansion) (fig. I.6).



Figure I.6 : Exemple de faïençage lié à une attaque sulfatique (Cliché LRMH).

I.4.1.3 Attaque par les chlorures.

L'eau de mer renferme des ions variés dont les effets ne sont pas forcément cumulatifs. Les ouvrages en milieu marin peuvent être continuellement immergés ou continuellement émergés ou alternativement immergés ou émergés. En dehors de l'environnement marin, en hiver, certains ouvrages sont soumis aux sels de déverglaçage.

L'attaque du béton par les ions chlorures s'effectue donc en présence d'eau de mer, d'embruns ou de sels de déverglaçage. Les chlorures pénètrent dans les pores par diffusion ou le long d'une fissure. Ils n'agressent pas la pâte de ciment mais, s'ils atteignent les armatures, ils entraînent leur corrosion.

I.4.1.4 Attaque par alcali-réaction.

Cette attaque est favorisée par un milieu humide (80 à 85% d'humidité au minimum) et conditionnée par la teneur en alcalins du béton. Certains types de granulats contiennent des formes de silices réactives (silice amorphe) et réagissent alors avec la phase liquide interstitielle du béton contenant des alcalins comme le sodium et le potassium. Ceci s'accompagne de la formation de gel de type silico-calco-alcalin capable d'absorber une grande quantité d'eau et donc de gonfler. Ce gonflement des gels peut entraîner une expansion du béton d'où fissuration et création de pores dans le béton. Cette fissuration est présente généralement sous forme de réseaux de maille étroite avec des fissures de faible profondeur appelée faïençages (fig. I.7).



Figure I.7 : Exemple de voûte faîençée sous l'effet d'une réaction alcali-granulat.

<u>I.4.2 Les dégradations d'ordre physique.</u> <u>I.4.2.1 La fissuration précoce.</u>

Pour réaliser un béton résistant à l'action des agents agressifs, il est nécessaire de diminuer le risque de fissuration et donc d'interconnexion de la porosité.

Les fissures précoces sont plus particulièrement préjudiciables et proviennent de quatre phénomènes physiques :

- le ressuage (avant la prise) : apparition d'une pellicule d'eau à la surface horizontale du béton frais sous l'effet de la pesanteur et tassement important des granulats peuvent s'accompagner de la création de fissures ouvertes au droit des obstacles s'opposant au mouvement du béton ; les fissures se situent en face supérieure au dessus des armatures qui gênent le tassement.

- le retrait plastique (avant et pendant la prise) : retrait de dessiccation du béton frais ou en cours de prise, il est contrôlé par la vitesse d'évaporation de l'eau ; les fissures se présentent sous forme d'un maillage.

- la contraction thermique (après la prise) : phase de durcissement s'accompagnant d'une élévation de température d'où une expansion puis une contraction du béton ; les fissures se situent en surface et sont peu profondes à proximité des jonctions de pièces en béton.

- le retrait par auto-dessication : retrait de la pâte de ciment au cours de son hydratation conséquence de la contraction de Le Chatelier; les fissures sont plus importantes en présence d'un gradient important de retrait de l'ouvrage.

Cette fissuration précoce est la plus pénalisante pour la durabilité du béton car elle crée des fissures ouvertes.

I.4.2.2 Attaque physique.

Les attaques physiques sont essentiellement dues à l'environnement et au climat extérieur : gel-dégel, érosion, abrasions,...

Les cycles de gel-dégel créent des dégradations dans les zones de l'ouvrage non protégées par un revêtement étanche. Cela se traduit par des variations de volume et plus particulièrement des gonflements qui créent des écaillages de surface (gonflement partiel) ou de la fissuration en réseau (gonflement important) (fig. I.8). Les variations de température importantes et les gradients d'humidité affectent aussi les performances mécaniques de l'ouvrage par des variations de volume d'où la création de fissures dans certaines zones de l'ouvrage.



Figure I.8 : Exemple de variation de volume créant un gonflement.

I.4.2.3 Dégradation mécanique.

La dégradation mécanique a essentiellement pour origine les charges appliquées à l'ouvrage. Son chargement favorise les fissures internes en particulier les chargements cycliques ou les surcharges permanentes. Une charge constante ou variable crée une déformation importante de la structure appelée fluage. Ce fluage dépend de plusieurs facteurs :

- la température,
- l'âge du béton,
- le degré d'humidité,
- le rapport entre la contrainte de service et celle de rupture.

Ce fluage entraîne par la suite une diminution de la précontrainte et/ou de la résistance mécanique et conduit à la formation de fissures évolutives dans les structures hyperstatiques précontraintes.

L'action du courant ou les chocs de corps flottants créent sur les piles de pont de l'abrasion mais aussi de la fissuration qui peut ensuite continuer à s'ouvrir.

I.4.3 La carbonatation.

L'air contient du dioxyde de carbone qui réagit avec les différents hydrates et principalement la portlandite pour donner du carbonate de calcium.

La carbonatation a aussi lieu avec le dioxyde de carbone dissous dans l'eau qui réagit avec la chaux passée en solution.

La vitesse du processus de carbonatation dépend de la facilité de pénétration du dioxyde de carbone à l'intérieur des pores du béton. Cette vitesse est liée à l'humidité relative. En effet, le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone dans l'air est dix mille fois plus élevé que dans l'eau. La pénétration du dioxyde de carbone dans les pores est par contre très faible quand les pores sont saturés d'eau.

En milieu humide et avec apport d'oxygène, la couche passive est détruite et la corrosion se développe car le pH du béton carbonaté diminue et la protection de l'acier disparaît.

Cette corrosion entraîne par la suite une réduction de la section des armatures et diminue la capacité portante des ouvrages. De plus l'augmentation du volume de rouille par rapport au métal d'origine entraîne des contraintes dans le béton d'enrobage qui créent des fissures. Ces fissures apparaissent dès que la couche d'oxydes atteint une épaisseur de 0,1mm.

Si les fissures restent normales aux armatures, la corrosion reste localisée dans des zones étroites entraînant simplement une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage.

Si les fissures se développent parallèlement aux armatures (cas le plus fréquent), la corrosion s'accentue fortement jusqu'à créer des décollements du béton d'enrobage, diminuer l'étanchéité et les performances mécaniques de l'ouvrage (fig. I.9).



Figure I.9 : Exemple de corrosion ayant entraîné des décollements du béton.

1.5. Les conséquences des différentes dégradations.

Les tableaux suivants résument les différents types de dégradations chimiques et physiques, leurs conséquences et la caractérisation par telle ou telle méthode non destructive.

Origine	Conséquence sur le	Pathologie	Fonction altérée		térée
	matériau béton		Stabilité	Etanchéité	Durée de vie
Réaction alcali-	Formation d'un gel	Fissuration	Х	Х	Х
granulat	expansif	Gonflement			
	- Cristallisation de	Erosion	Х		Х
Attaque par les	sels dans les pores du	Désintégration et			
sulfates ou sulfures	béton	perte de ciment			
	- Formation				
	d'efflorescences en				
	surface				
Lixiviation	Lessivage de la	Augmentation de	Х		Х
	chaux	la porosité			
Attaque par les	- Dépassivation des	Corrosion des	Х	Х	Х
chlorures (milieu	aciers	aciers			
marin ou sels de	- Possibilité de	Fissuration			
déverglaçage)	démarrage de	Délamination			
	réactions sulfatiques				
Carbonatation	Dépassivation des	Corrosion des	X	X	Х
	aciers	aciers			
		Fissuration			
		Délamination			

 Tableau I.1. Dégradation par attaque chimique et conséquences. [MDND, 2005]

Origine	Caractérisation par CND
	1
Réaction alcali-granulat	Radar
_	Ondes ultrasonores
	Résistivité électrique
	Radar
Attaque par les sulfates ou sulfures	Résistivité électrique
Lixiviation	Radar
	Ondes ultrasonores
	Résistivité électrique
Attaque par les chlorures	Radar
	Résistivité électrique
Carbonatation	Radar
	Ondes ultrasonores
	Résistivité électrique

Tableau I.2. Caractérisation des dégradations par attaque chimique.

Origine	Conséquence sur le	Pathologie	Fonction altérée			
	matériau béton		Stabilité	Etanchéité	Durée de vie	
Retrait	Contraintes internes	Fissuration	Х	Х		
Fluage (pression,	Diminution des performances	Fissuration	X			
précontrainte)	mécaniques,					
Sollicitation	déformation excessive					
mécanique						
(chargement,						
flexion)						
Variations	Variation de volume	Fissuration	Х	Х	Х	
d'humidité						
Cycles de	Variation de volume :	Fragmentation,	Х		Х	
gel/dégel	gonflement depuis la	écaillage de surface,				
	surface jusqu'au	éclatement				
	volume entier, les					
	cavités remplies d'eau					
	augmentent jusqu'à					
	+9%		<u> </u>			
Cycles	Baisse des	Eclatements, fissures	Х		Х	
thermiques	caractéristiques					
(dilatation,	mécaniques					
contraction)						
Actions du	Abrasion, érosion,	Perte de matière,			Х	
courant sur des	cavitation	usure de surface				
ouvrages						
immergés						
Chocs						
Fatigue,	Déformation excessive	Micro fissures près	Х			
vibration		des agrégats et des				
		barres, décollement				
		aux interfaces,				
		fissuration				

Tableau I. 3. Dégradation par attaque physique et conséquences. [MDND, 2005]

Ces dégradations par attaque chimique peuvent être évaluées à partir des méthodes de contrôle non destructif suivantes :

- radar,

-ondes acoustiques,

- résistivité électrique.

Ceci est un des objectifs du projet RGCU et donc de la thèse par l'utilisation des ondes ultrasonores à haute fréquence.

Méthodes de CND	Application(s)	Paramètre	Avantage	Désavantage	Coût
Visuel	Aide au diagnostic Recherche de pathologie	Conditions de surface	Rapide	Superficiel Pas d'enregistrement Photos	Faible
Électrique	Homogénéité	Conductivité et ddp	Rapide Prof: ≤ 1 m	Sensibilité à l'eau	Faible
Magnétique	Détection d'armatures	Champ magnétique	Rapide Carto. possible	Prof: ≤ 10-15 cm	Faible
Radar	Vides Épaisseurs Localisation de barres Teneur en eau	Vitesse des ondes EM	Rapide Carto. Possible Portable	Prof: \leq 15-50 cm Résolution \geq 5 cm Fortes densités d'acier	Important
Infra-rouge	Défauts béton Délaminage, vides Barres	Champ de température	Rapide Carto. Possible Portable	Prof: \leq 10-15 cm voire plus (50 cm) Résolution : dm ³	Important
Radio Graphique	Détection d'armatures Contrôle de gaines Mesure de densité	Rayons X ou γ	Pénètre l'acier Portable	Lent, local, Dangereux En transmission	Très important
Sismique	Hétérogénéités Qualité mécanique du béton	Vitesse des ondes sismiques	Carto. de l'état interne du béton	<u>Transmission</u> Résolution : qq dm ³	Important
Sonique	Qualité mécanique du béton de surface Fissures, vides	Vitesse des ondes soniques	Rapide	Subjectif	Faible
Ultra- sonique	Fissures, Porosité, Caractérisation du béton	Vitesse des ondes US, Atténuation	Rapide, localisation, Dimensionnement	Dépendance de beaucoup de paramètres	Moyen
Impact	Délamination Épaisseur de béton Injection de gaines	Modes ou signature fréquentielle	Rapide, simple, localisation	Local	Faible
Scléro Métrique	Dureté, homogénéité de surface	Hauteur de rebond d'une bille	Simple	Dépend de la composition locale	Faible

Tableau I. 4. Croisement et applications/Avantages/Inconvénients de quelques méthodes de

CND. [MDND, 2005]

I.6. Principe physique de la propagation d'une onde ultrasonore.I.6.1 Introduction sur les ondes acoustiques.

L'existence de forces internes de cohésion dans tous les corps (solides, fluides) leur confère des aptitudes aux déformations. Ainsi, quand un élément d'un milieu matériel subit un ébranlement, son déplacement, grâce aux forces de cohésion intermoléculaires, provoque le déplacement des éléments voisins de telle sorte que l'ébranlement se propage de proche en proche à travers tout le milieu, mais sans transport de matière. Une vibration acoustique correspond à un ébranlement de particules de matière.

Pour l'auscultation du béton, les ondes mécaniques et électromagnétiques sont les plus couramment utilisées et sont de deux types :

- ondes entretenues : généralement monochromatique (fonction sinusoïdale à une seule fréquence) et l'amplitude du signal est la caractéristique exploitée,

- ondes transitoires : le signal source a une durée limitée et le temps de trajet de cette impulsion et son amplitude sont les premières caractéristiques exploitées.

Le plus souvent, nous nous intéresserons à la mesure de la vitesse d'une onde mécanique se propageant à travers le béton (transmission ou réflexion) ou à sa surface (onde de surface).

La propagation est perturbée par des obstacles (de type fissure, trous,...) ou des modifications des propriétés du matériau (hétérogénéités). Il en découle des modifications de vitesse et d'amplitude.

Les ondes ultrasonores sont des vibrations acoustiques de hautes fréquences : f > 20 kHz (le domaine sonore s'étend de 20 Hz à 20 kHz). Les ondes ultrasonores peuvent être de différents types suivant le mode de vibration des particules de la matière.

Suivant la nature de l'essai, il faut choisir le domaine de fréquence le plus approprié. La figure I.10 résume le type d'onde choisi en fonction de la fréquence et donc de la longueur d'onde.



Figure I.10 : Domaine de longueur d'onde utilisé in situ pour l'auscultation du béton. [MDND, 2005]

La propagation des ondes dans le béton est complexe surtout si la longueur d'onde utilisée est petite ou du même ordre de grandeur que la dimension des hétérogénéités que forment les granulats.

Il existe trois types de géométrie d'auscultation (fig.I.11) :

- en émission : la source se trouve à l'intérieur du matériau et les capteurs (au minimum trois) se trouvent à la surface du matériau,

- en transmission : le matériau se situe entre la source et le capteur, et de préférence sur l'axe défini par la source et le capteur pour récupérer le maximum d'énergie,

- en réflexion (pulse écho) : la source et le capteur se situe sur la même face et le couple source-capteur peut être déplacé le long de la surface.



Figure I.11 : schéma des dispositifs expérimentaux pour la propagation des ondes. [MDND, 2005]

I.6.2 Domaine d'application.

Les paramètres acoustiques et donc la propagation des ondes sont sensibles à :

- certaines propriétés physiques du béton,
- les caractéristiques mécaniques du béton,
- la composition du béton,
- la microstructure du béton.

Les méthodes acoustiques peuvent être utilisées pour contrôler le béton :

- sa maturité,
- son homogénéité,
- la détection d'un ou plusieurs défauts,
- le suivi des défauts dans le temps,
- sa caractérisation mécanique.

Actuellement, les méthodes traditionnelles utilisent la méthode par transmission. Elle consiste à placer deux transducteurs en vis-à-vis de part et d'autre du matériau. Le trajet de l'onde sera alors celui de l'épaisseur du matériau analysé [Selleck, 1998].

C'est l'exemple du PUNDIT (fig. I.12) appareil composé de deux capteurs basses fréquences 24 ou 50 kHz et d'un générateur amplificateur étalonné à partir d'une éprouvette en aluminium. A partir du temps de vol mesuré, il est possible de déterminer la vitesse et l'atténuation.



Figure I.12 : Exemple de PUNDIT. [MDND, 2005]

I.7. Eléments théoriques de la propagation des ondes acoustiques.

Dans cette partie, nous rappelons les formules analytiques utilisées dans la suite de cette thèse. Ces formules concernent aussi bien le rayonnement, la formation du champ acoustique, les signaux (vitesse, atténuation)...Elles sont donc nécessaires pour la compréhension des démarches et la mise en place du protocole des mesures.

I.7.1. Longueur d'onde.

La longueur d'onde λ est la distance minimale, dans la direction de propagation d'une onde périodique, entre deux points où les vibrations sont en concordance de phase. Elle est égale au rapport de la vitesse de propagation c divisée par la fréquence f:

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad (I.10)$$

La longueur d'onde intervient dans la profondeur de pénétration des ondes (voir amortissement), dans son pouvoir de séparation de deux objets (voir surface de Fresnel), dans le lobe de rayonnement de la source et dans les notions de champ proche et de champ lointain. Dans le béton les plus petites longueurs d'onde sont centimétriques (dès lors les granulats sont des objets diffractant), les plus grandes métriques. Le nombre d'onde est aussi souvent utilisé. Il est égal à :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{I.11}$$

I.7.2. Impédance acoustique.

Par définition, l'impédance acoustique Z traduit le comportement d'un milieu matériel vis-àvis des ultrasons. Elle dépend de la masse volumique et de la compressibilité du milieu, c'està-dire de son aptitude à reprendre sa forme originale après déformation. Elle s'écrit :

$$Z = \frac{\Pr ession}{Vitesse} = \rho * c \qquad (I.12)$$

avec ρ la masse volumique et c la célérité de l'onde ultrasonore.

Elle est d'autant plus grande que la densité est importante et que la compressibilité est faible. Elle traduit la plus ou moins grande aptitude d'un milieu donné à la pénétration des ultrasons et s'exprime en $kg/m^2/s$. Elle est faible pour l'air (Z \approx 0,0004 10⁶ kg/m²/s) et élevé pour les milieux durs (Z \approx 8,3 10⁶ kg/m²/s dans le béton).

L'expression des amplitudes des ondes réfléchies et transmises est complexe quand l'onde incidente n'est pas perpendiculaire à l'interface. Dans le cas où l'angle d'incidence est nul (fig. I.13), la continuité à l'interface des déplacements des particules (contraintes pour les ondes mécaniques, continuité du champ électrique et conservation de l'énergie en électromagnétisme) implique que les amplitudes des ondes incidente I, réfléchie R et transmise T vérifient :

$$R + T = I \tag{I.13}$$

et



Figure I.13 : Réflexion et réfraction sous incidence normale. [MDND, 2005]

Le coefficient de réflexion pour les amplitudes des déplacements des particules ou des champs est égal à :

$$\frac{R}{I} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$
(I.15)

et le coefficient de transmission pour les amplitudes des déplacements ou des champs est égal à :

$$\frac{T}{I} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$$
(I.16)

L'amplitude de l'onde réfléchie est d'autant plus grande que les impédances des matériaux sont différentes.

Dans le cas où l'angle d'incidence est nul, le coefficient de réflexion en énergie est égal à :

$$\frac{E_R}{E_I} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \tag{I.17}$$

où E_R , E_I sont respectivement l'énergie réfléchie et l'énergie incidente.

En chaque point, la pression acoustique varie selon la fréquence de l'onde ultrasonore. L'énergie délivrée dépend de ces variations de pression qui soumettent les particules du milieu à des mouvements vibratoires. On appelle aussi intensité ultrasonore l'énergie qui traverse perpendiculairement l'unité de surface pendant l'unité de temps. Elle est reliée à la pression acoustique.

Le coefficient de transmission en énergie est égal à :

$$\frac{E_T}{E_I} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \qquad (I.18)$$

où E_T est l'énergie transmise.

La somme de ces deux coefficients est égale à 1. Les coefficients en énergie restent identiques quel que soit le sens de la propagation.

Lorsque $Z_1 \ll Z_2$ la réflexion est totale (les déplacements des particules des ondes mécaniques incidente et réfléchie sont en opposition de phase).

Lorsque $Z_1 = Z_2$ la transmission est totale.

Lorsque $Z_1 >> Z_2$ la réflexion est totale (les déplacements des particules des ondes mécaniques incidente et réfléchie sont en phase).
I.7.3 Ondes longitudinales et transversales.

Pour générer une onde mécanique, il faut soit un transducteur émetteur soit un choc à la surface du béton. Ceci induit deux types d'ondes :

- des ondes de volumes (longitudinales et transversales) qui se propagent suivant un front d'onde hémisphérique,

- des ondes de surface qui sont guidées par la surface du milieu.

Dans un milieu élastique, linéaire, homogène et infini, deux types d'ondes peuvent se propager : les ondes de compression ou ondes longitudinales (L) et les ondes de cisaillement ou ondes transversales (T). Pour le premier type, le mouvement vibratoire a lieu dans la direction de propagation, tandis que pour le second type, le mouvement vibratoire a lieu dans un plan normal à la direction de propagation.

La loi de Hooke reliant le tenseur de contrainte σ_{ij} au tenseur de déformation ε_{ij} pour un milieu homogène et isotrope s'écrit :

$$\sigma_{ij} = \lambda.tr\varepsilon.\delta_{ij} + 2\mu \mathcal{E}_{ij} \tag{I.19}$$

où λ et μ sont les coefficients de Lamé, tr ε (trace du tenseur de déformation) correspond à la dilatation volumique et $\delta i j$ le tenseur de Kronecker égal à 1 quand *i* est égal à *j* et nul dans le cas contraire.

L'équation fondamentale de l'élasticité est donnée par :

$$div(\sigma) = \rho \vec{u}$$
 (I.20)

L'équation de mouvement se présente alors ainsi :

$$(\lambda + 2\mu) \overline{grad(div(\vec{u}))} - \mu \overline{rot(\vec{u})} = \rho \vec{u}$$
 (I.21)

En exprimant le vecteur déplacement \mathcal{U} par un potentiel scalaire φ et un potentiel vecteur $\vec{\psi}$:

$$\vec{u} = \overrightarrow{grad\phi} + \overrightarrow{rot(\psi)}$$
 (I.22)

avec $div\psi=0$, on arrive à séparer les ondes de compression et les ondes de cisaillement.

Pour les ondes de compression le mouvement est irrotationnel, c'est-à-dire :

$$rot(u) = 0$$
 (I.23)

Pour les ondes transversales:

$$\vec{u} = rot(\vec{\psi})$$
 (I.24)

A l'aide des expressions I.23 et I.24 on peut séparer l'équation I .21 en deux expressions distinctes.

En résumé, les ondes de volume sont de deux types :

- les ondes de compression ou ondes longitudinales appelées aussi ondes P ou primaires. La déformation du milieu qui accompagne leur passage se fait par dilatations et compressions successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde (onde P polarisée suivant la direction de propagation). Ces ondes sont les plus rapides et leur vitesse de propagation V_L s'écrit :

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2 \varphi = \rho \ddot{\varphi}$$
 (I.25)

D'où

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{V_L^2} \ddot{\varphi} \qquad (I.26)$$

Avec

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$
 (I.27) ou $V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ (I.28)

Où E est le module de Young,

 ρ est la masse volumique,

 λ est le 1 er coefficient de Lamé

et μ le module de cisaillement le 2nd coefficient de Lamé.



Figure I.14 : sens de propagation d'une onde longitudinale.

- les ondes de cisaillement ou ondes transversales appelées aussi ondes S ou secondaires. La déformation du milieu qui accompagne leur passage se fait perpendiculairement à la direction de propagation (fig. I.15). Ces ondes sont aussi plus lentes que les ondes P, leur vitesse de propagation V_T s'écrit :

$$\nabla^2 \vec{\psi} = \frac{1}{V_T^2} \vec{\psi} \qquad (I.29)$$

avec



Figure I.15 : sens de propagation d'une onde transversale.

Les solutions des équations élémentaires (I .26) et (I .29) sont données sous le nom de fonction de Green de l'espace libre :

$$G(O,M,\omega) = \left[\frac{e^{-jkR}}{4\pi R}\right] e^{j\omega t} \qquad (I.31)$$

où pour les ondes longitudinales : $k = k_L = \frac{\omega}{V_L}$,

et pour les ondes transversales : $k = k_{\rm T} = \frac{\omega}{V_{\rm T}}$.

La fonction de Green peut être interprétée comme l'onde générée par un point (une source ponctuelle) vibrant avec la fréquence ω et observée à la distance R (suivant la géométrie illustrée sur la figure I.16). Les deux termes de la fonction de Green représentent respectivement les ondes sphériques élémentaires transversale et longitudinale et les symboles k_L et k_T sont les nombres d'ondes respectifs.



Figure I.16 : Géométrie utilisée pour l'équation (I.25). [Ould Naffa, 2004]

Pour une impulsion de la forme de Dirac, avec le terme relatif au champ proche négligé ([Lhemery,1994], [Ouarradi,1999]), la fonction de Green prend la forme de deux ondes sphériques impulsionnelles se propageant avec les vitesses V_L et V_T :

$$G(t,R) = \frac{1}{4\pi R} \delta(t - R/V_L) + \frac{1}{4\pi R} \delta(t - R/V_T)$$
(I.32)

où le symbole δ indique l'impulsion de Dirac.

Dans un milieu atténuant chacun des termes de la fonction de Green (I.31) comprend un facteur $e^{-\alpha R}$ supplémentaire [Kinsler, 1982]. On a alors :

$$G(0,\omega,\alpha) = e^{-\alpha R} \left(\frac{e^{-jkR}}{4\pi R}\right) e^{j\omega t}$$
(I.33)

D'où la décroissance supplémentaire de l'amplitude de l'onde en fonction de la distance R parcourue. Le symbole α représente ici le coefficient d'atténuation qui dépend en général de la fréquence. L'atténuation provoque aussi une dispersion des vitesses (principe de causalité), c'est-à-dire que la vitesse de propagation V, dans ce cas, n'est pas constante mais devient fonction de la fréquence:

$$V = V(\omega) \tag{I.34}$$

L'expression de l'onde impulsionnelle x(t,R) issue d'une source ponctuelle excitée par un signal de forme temporelle quelconque s(t) peut être obtenue par la convolution de la réponse impulsionnelle (équation I.32) avec le signal d'excitation (principe de linéarité du système).

$$x(t,R) = s(t) * G(t,R) = \frac{1}{4 \pi R} [s(t-R/V)]$$
 (I.35)

Il est aussi possible d'analyser le spectre de cette onde en utilisant la transformée de Fourier \Im :

$$S(j,\omega,R) = \Im[x(t,R)] = |S(\omega)|e^{-j\varphi(\omega)}$$
(I.36)

 $|S(\omega)|$ représente le module du spectre du signal et $\phi(\omega)$ représente sa caractéristique de phase.

Tenant compte de l'équation I.35 et des propriétés de la transformée de Fourier, la caractéristique de phase peut s'écrire:

$$\varphi(\omega, R) = \frac{\omega R}{V(\omega)} = k(\omega) R \qquad (I.37)$$

La vitesse de propagation V peut donc être obtenue par la comparaison de phases $(\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1)$ de deux signaux observés à la distances R_1 et R_2 :

$$V_{ph}(\omega) = \frac{\omega(R_2 - R_1)}{\varphi_2 - \varphi_1} = \omega \frac{\Delta R}{\Delta \varphi(\omega)}$$
(I.38)

La vitesse ainsi obtenue est la vitesse de phase V_{ph} . Et la fonction $V_{ph}(\omega)$ est la caractéristique de dispersion des vitesses.

D'autre part la vitesse peut être également déterminée dans le domaine temporel par le calcul du temps de retard Δt entre les signaux observés aux distances respectives R_1 et R_2 :

$$V_g = \frac{\Delta R}{\Delta t} \tag{I.39}$$

Une telle mesure donne la vitesse du signal "entier". La vitesse ainsi obtenue est appelée vitesse de groupe Vg. En pratique, la vitesse de groupe est déterminée à partir des retards entre les deux premières arrivées du signal ou entre les maximas les plus faciles à distinguer. Il est facile de s'apercevoir que dans un milieu non dispersif la vitesse de phase et la vitesse de groupe sont égales. Si la vitesse de phase est constante $(V_{ph}(\omega)=V)$ nous avons $k=\omega/V$ et les équations (I. 38) et (I. 39) donnent le même résultat.

I.7.4 Ondes de surface.

Les ondes de surface sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude à la surface du béton est plus forte. Elles sont de plusieurs types :

- les ondes de Lamb (ou ondes de plaques) qui affectent toute l'épaisseur du matériau et qui possèdent deux modes de propagation (symétrique et antisymétrique),

- les ondes de Rayleigh correspondant à une déformation elliptique du milieu et qui n'affectent que la surface du matériau (fig. I.17),

- les ondes de Love correspondant à une déformation du milieu contenue dans un plan parallèle à la surface et qui n'affectent que la surface du matériau.

Leur vitesse est une fonction complexe de la densité et des vitesses des ondes de volume.



Figure I.17 : direction de propagation d'une onde de surface.

Si l'on écrit, dans les équations de propagation, la condition de contrainte nulle en surface du solide semi-infini, et si l'on impose en outre que les potentiels décroissent exponentiellement avec la profondeur, nous arrivons à la condition de RAYLEIGH [Achenbach, 1999]:

$$4PS - (1+S^2)^2 = 0 \tag{I.40}$$

avec $P = \left[I - \frac{V^2}{V_L^2} \right]^{1/2}$ et $S = \left[I - \frac{V^2}{V_T^2} \right]^{1/2}$ où V est la vitesse de propagation des ondes de surface.

En remplaçant P et S par leurs valeurs et en tenant compte des expressions des vitesses en fonction des coefficients de Lamé, on trouve :

$$4\left[1 - \frac{V^2}{V_L^2}\right]^{1/2} \left[1 - \frac{V^2}{V_T^2}\right]^{1/2} = \left[2 - \frac{V^2}{V_T^2}\right]^2$$
(I.41)

qui est l'équation dite de Rayleigh dont la racine positive est approximativement égale à :

$$V = V_R \approx \frac{2.86\lambda + 1.74\mu}{3\lambda + 2\mu} \left[\frac{\mu}{\rho}\right]^{1/2} = \frac{2.86\lambda + 1.74\mu}{3\lambda + 2\mu} V_{\rm T} \tag{I.42}$$

où V_R est la vitesse de Rayleigh. Prenant en compte des valeurs courantes de λ et μ , la vitesse V_R est toujours plus faible que la vitesse des ondes T et nous avons $V_R \approx 0.9V_T$.

I.7.5. Champ acoustique.

L'ensemble des points mis en vibration par un transducteur génère un faisceau acoustique dont les caractéristiques dépendent du diamètre du transducteur et de la longueur d'onde.

Sur la figure I.18, on désigne par S la surface active du transducteur et par $V_n(M)$ la vitesse acoustique d'un point M appartenant à S. Ce transducteur est couplé avec le demi-espace infini représentant le milieu de propagation, dans notre cas, il s'agit du béton.

Le problème du rayonnement consiste à évaluer les grandeurs caractéristiques du champ acoustique en un point d'observation *O* quelconque du milieu de propagation.



Figure I.18 : a) configuration du problème de rayonnement ; b) notations employées dans les formules. [Ould Naffa, 2004]

Le problème du rayonnement dans le milieu solide est complexe [Lhemery, 1994]. Une approche simplifiée consiste à appliquer au modèle solide, le modèle du rayonnement utilisé dans un milieu fluide [Weight, 1987], ce qui se justifie par la similitude des fonctions de

Green pour les deux milieux . La formulation est sensiblement identique, sauf que le milieu fluide ne comporte que le terme relatif aux ondes longitudinales (pas de cisaillement).

La formule utilisée dans le milieu fluide pour déterminer le champ acoustique en un point d'observation O est l'intégrale de Rayleigh, ou intégrale des potentiels retardés [Skudrzyk, 1971] :

$$\Phi(O,t) = \iint_{S} \frac{V_n (M, t - R/c)}{2 \pi R} dS(M)$$
(I.43)

où V_n est la composante normale de la vitesse et Φ est le potentiel acoustique.

Si la vitesse est impulsionnelle, soit $V_n(t, M) = \delta(t)V_n(M)$, l'intégrale I.43 définit alors la réponse impulsionnelle en terme de potentiel du système : transducteur-milieu de propagation-point *O* [Stepanishen, 1971]:

$$h_{\varphi}(O,t) = \iint_{S} \frac{V_n(M)\,\delta(t - R/c)}{2\,\pi\,R} dS(M) \tag{I.44}$$

Si le transducteur est excité par un signal quelconque g(t) incluant la réponse électrique du transducteur, étant donné la linéarité du système, le potentiel devient :

$$\Phi(O,t) = g(t) * h(O,t) \tag{I.45}$$

où le symbole '*' désigne le produit de convolution.

Dans le cas particulier d'une excitation harmonique c'est-à-dire lorsque $g(t) = exp(i\omega t)$, l'intégrale I.43 prend la forme suivante [Skudrzyk, 1971] :

$$H(O, j\omega) = \iint_{\mathbf{S}} \frac{Vn(M)e^{-jkR}}{2\pi R} d\mathbf{S}(M)$$
(I.46)

Tenant compte de la dualité de l'excitation impulsionnelle et harmonique dans un système linéaire la réponse h est liée avec la transmitance H par la transformée de Fourier inverse :

$$h(O,t) = \Im^{-1} [H(O, j\omega)]$$
 (I.47)

De même, avec les propriétés de la transformée de Fourier, l'équation I.45 peut être exprimée dans le domaine spectral :

$$\Phi(O, j\omega) = G(j\omega) \cdot H(O, j\omega) \qquad (I \cdot 48)$$

avec G(jw) la transformée de Fourier.

I.7.6. Champ proche et champ lointain.

Sur une distance R séparant le point d'observation O de la source, on distingue deux zones du champ acoustique : champ proche et champ lointain.

La limite R_f entre ces deux zones est donnée par la formule :

$$R_f = \frac{(dim(S)_{max})^2}{\lambda}$$
 (I.49)

où $dim(S)_{max.}$ est la dimension maximale du transducteur dans le plan (x,y), et λ est la longueur d'onde dans le matériau où l'onde se propage (fig. I.18).

Dans le champ lointain, la formule I.46 a une solution analytique pour les transducteurs de formes régulières. L'évaluation de cette intégrale donne la formule [Kinsler, 1982] pour une excitation harmonique :

$$\phi(O,\omega,t) = \frac{q e^{j(\omega t - kR)}}{2\pi R} b(\theta)$$
 (I.50)

où $b(\theta)$ est la caractéristique de directivité et $q=SV_n$ est le débit volumique de la source. Les notations utilisées dans ces formules sont précisées sur la figure I.18.

La comparaison de cette formule avec celle du paragraphe 1.7.3 équation I.31 indique que dans le champ lointain, le transducteur S agit comme une source ponctuelle rayonnant une onde sphérique sauf que le champ est "pondéré" dans l'espace par la caractéristique $b(\theta)$. Dans le cas particulier où le transducteur est circulaire (cas de notre thèse) la condition de champ lointain (équation I.48) devient :

$$R_f \gg \frac{D^2}{4\lambda} \tag{I.51}$$

et le diagramme de directivité est donné par la formule :

$$b(\theta) = \frac{J_{I}(k_{\theta}D/2)}{k_{\theta}D/2}$$
 (I.52)

où $k_{\theta} = \frac{2\pi}{\lambda} sin(\theta)$, J_1 est la fonction de Bessel du premier ordre.

L'angle de divergence de la caractéristique de directivité (direction du premier "zéro") devient :

$$\theta_0 = \arcsin(1.22\frac{\lambda}{D})$$
 (I.53)

La figure I.19 illustre les formules I.51,52 et 53 du champ acoustique d'un transducteur circulaire. Nous pouvons, sur cette figure, constater que le champ acoustique dans la zone proche est très irrégulier (fonction H, équation I.46). En revanche, si on se place dans la zone lointaine, le champ se focalise sur l'axe du transducteur et la distribution spatiale latérale est influencée par la caractéristique de la directivité (I.52) avec l'angle de divergence donné par l'équation I.53. De plus, dans cette zone, la décroissance du champ en fonction de la distance entre le transducteur et le point d'observation suit une fonction en 1/R (équation I.49).



Figure I.19 : Description d'un faisceau acoustique. [Lambert, 1993]

Les fluctuations de l'amplitude dans une zone proche de la source sont complexes : elles dépendent notamment de la distance à la source d et de la longueur d'onde λ . L'expression de l'amplitude du mouvement des particules comporte un terme de champ lointain en $\frac{1}{d}$ et un terme de champ proche en $\frac{1}{d^2}$. Le terme en champ proche peut être négligé pour une distance d supérieure à environ 2λ , au-delà de laquelle l'onde se propage en champ lointain.

Regardons maintenant le champ acoustique dans un milieu atténuant, celui-ci est caractérisé par un coefficient d'atténuation $\alpha(\omega)$, la détermination du champ peut se faire également à l'aide de l'intégrale de Rayleigh sauf que la fonction de Green pour le milieu non atténuant devrait être remplacée par celle correspondant au milieu atténuant. L'intégrale I.46 devient alors :

$$H_{\alpha}(O,\omega) = \left[\iint_{S} \frac{Vn(M)e^{-\alpha R}e^{-jkR}}{2\pi R} dS(M)\right]$$
(I.54)

et la réponse impulsionnelle, par analogie avec l'équation (I.47), est :

$$h_{\alpha}(t,O) = F^{-1}[H_{\alpha}(O,j\omega)] \qquad (I.55)$$

Afin de respecter le principe de causalité exprimé par les relations de Kramers-Krönig [Trousil, 2001] l'introduction d'un terme de phase est nécessaire ; l'équation I.54 devient alors :

$$h_{\Omega}(t,O) = F^{-1}[H_{\Omega}(O,j\omega)_{e}^{-jkd(\omega)R}]$$
 (I.56)

où $k_d(\omega)R$ est le déphasage incluant la vitesse de phase $V(\omega)$:

$$k_d(\omega) = \frac{\omega}{V(\omega)} \qquad (I.57)$$

Pour un point d'observation se trouvant dans le champ lointain, l'intégrale I.54 a une solution analogue à l'équation (I.50) :

$$\phi(O,\omega,t,\alpha) = \frac{q \ e^{-\alpha(\omega)R} \ e^{j(\omega t - kR)}}{2\pi \ R} b(\theta)$$
(I.58)

La comparaison des équations I.58 et I.50 montre que, dans le champ lointain l'atténuation du matériau provoque une décroissance supplémentaire en $e^{-\alpha(\omega)R}$ de l'amplitude de l'onde par rapport au cas des matériaux non atténuant. L'interprétation de cette équation est identique à celle d'une source ponctuelle.

<u>I.8. Vitesse et atténuation.</u> <u>I.8.1. Vitesse.</u>

Dans la plupart des essais mécaniques classiques (compression,traction,...) sont déterminés les coefficients élastiques statiques du matériau comme le module de Young E et le coefficient de Poisson v. Ces coefficients sont reliés eux même aux coefficients de Lamé λ et μ intervenant dans les définitions des vitesses décrites aux paragraphes I.7.3 et I.7.4. Les vitesses des ondes longitudinales, transversales et de surface peuvent s'écrire en fonction des coefficients E et v :

$$V_{L} = \left[\frac{E}{\rho (1+\nu)(1-2\nu)}\right]^{1/2}$$
(I.59)

$$V_T = \left[\frac{E}{2\rho \ (l+\nu)}\right]^{1/2} \tag{I.60}$$

$$V_{R} = \frac{0.87 + 1.12\nu}{l + \nu} \left[\frac{E}{2\rho (l + \nu)} \right]^{1/2}$$
(I.61)

L'inversion de deux des équations I.59, 60 et 61 permet de déduire les coefficients élastiques à partir des vitesses. Par exemple, avec V_L , V_T et ρ données on a :

$$E = \rho V_T^2 \left[\frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{V_L^2 - V_T^2} \right]$$
 (I.62)

$$v = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)}$$
(I.63)

Les équations I.62 et I.63 sont utilisées dans les méthodes acoustiques appliquées à la caractérisation des matériaux. A partir des vitesses V_L , V_T , V_R il est donc possible de déterminer le coefficient de Poisson et le module de Young, ou bien les constantes de Lamé et inversement. Des études ([Nilsen et Aïtcin, 1992]) ont montré la possibilité de suivre l'évolution du module élastique *E* du béton par le suivi de l'évolution de la vitesse de propagation des ondes acoustiques. Cependant, la détermination des modules élastiques à partir des vitesses de propagation dans le béton ne peut pas se faire sans précaution étant donnée la forte hétérogénéité du matériau.

Quant à la résistance du béton, il n'y a pas de relation physique entre cette résistance et la vitesse. On peut rappeler que le module d'élasticité est relié à la résistance mais que cette relation n'a pas non plus de base physique.

La vitesse des ondes ultrasonores à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats mais aussi de la porosité ou de la teneur en eau. Le module d'élasticité des granulats varie énormément.

Les facteurs essentiels qui influencent la vitesse de propagation dans le béton sont [Kouassi, 1989] :

- la résistance à la compression : la vitesse est plus élevée dans un béton B60 que dans un B25,

- la nature du ciment : le ciment a une résistance plus importante si le pourcentage de silicate tricalcique (C_3S) et la finesse de mouture du ciment sont grands,

- le dosage en ciment : la résistance du béton est déterminée par la résistance de la pâte de ciment et de son dosage,

- la taille des granulats : la vitesse est surtout influencée par les gros granulats ; la granulométrie est d'autant plus importante qu'elle détermine les conditions de propagation de l'onde dans le béton en fonction du rapport entre la longueur d'onde et les dimensions des granulats,

- la porosité : plus la porosité augmente plus la vitesse diminue,

- la teneur en eau : cette teneur en eau dépend de la porosité, en effet les ondes se déplacent plus vite dans un pore rempli d'eau que d'air. La vitesse sera plus importante dans un échantillon saturé en eau que sec.

Les définitions de vitesse décrites précédemment concernent essentiellement l'exploitation de la vitesse de groupe. Nous développerons au chapitre 2 la caractéristique de dispersion de vitesse de phase $V_{ph}(\omega)$ directement liée à l'atténuation $\alpha(\omega)$.

I.8.2. Atténuation et coefficient d'atténuation.

La propagation des ondes (mécaniques et électromagnétiques) s'accompagne d'une atténuation géométrique liée à la géométrie du front d'onde. L'atténuation peut être définie de façon générale comme la diminution de l'amplitude et une perte fréquentielle des hautes fréquences du signal propagé en fonction du milieu de propagation.

L'atténuation du signal acoustique est caractérisée par le coefficient $\alpha(\omega)$ introduit dans l'équation I.31 de Green. Cette atténuation est à l'origine de la décroissance exponentielle de l'amplitude. En effet, dans un milieu non atténuant la diminution de l'amplitude de l'onde sphérique est proportionnelle à 1/R. En revanche, pour les milieux atténuants un facteur supplémentaire ($e^{-\alpha R}$) vient s'ajouter au terme 1/R (fig. I.20 (a)).

L'amplitude de l'onde sphérique s'écrit alors comme suit :

$$X(\omega, R) = \frac{A}{R} e^{-\alpha(\omega)R}$$
(I.64)

où A est une constante



Figure I.20 : a) comparaison de la décroissance de l'amplitude d'une onde sphérique dans des milieux avec et sans atténuation ; b) amplitudes des arrivées successives. [Ould Naffa, 2004]

Dans la littérature, l'atténuation des ondes est souvent exprimée au moyen de plusieurs paramètres : coefficient d'atténuation α , décrément logarithmique δ , facteur de qualité Q. Ces trois paramètres sont issus de définitions empiriques (à partir d'expérience), indépendamment du modèle adopté.

Le coefficient d'atténuation $\alpha(\omega)$ est exprimé en unité Néper/m, dB/m ou en dB/ λ . Il est mesuré à partir de la comparaison des amplitudes spectrales de l'onde à deux points distants de la source respectivement de R_1 et R_2 . A partir de l'équation I.64 on obtient la formule appliquée usuellement pour la détermination de l'atténuation:

$$X_{l}(R_{l},\omega) = \frac{A e^{-\alpha(\omega)R_{l}}}{R_{l}}$$
(I.65a)

$$X_2(R_2,\omega) = \frac{A e^{-\alpha(\omega)R_2}}{R_2}$$
 (I.65b)

De I.65a et de I.65b, on obtient le coefficient d'atténuation $\alpha(\omega)$ en dB/m ([Papadakis, 1999]), ([Bourbié et al, 1986]) par :

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{R_2 - R_l} \left[20 Log(\frac{X_l(\omega)}{X_2(\omega)}) - 20 Log(\frac{R_2}{R_l}) \right]$$
(I.66)

Dans le cas général la détermination rigoureuse de l'atténuation n'est pas facile. Certains auteurs utilisent des «indices» qui expriment l'atténuation de façon indirecte (décalage spectral, rapport des valeurs crêtes des signaux,...).

I.8.3 Le facteur de qualité.

Le facteur de qualité peut se définir de façon expérimentale comme le coefficient d'atténuation. Il est égal au rapport de l'énergie maximale emmagasinée pendant un cycle de chargement sur l'énergie dissipée pendant ce cycle et s'écrit :

$$Q = \frac{2\pi E}{\Delta E}$$
 (I. 67)

où ΔE est l'énergie dissipée par cycle de chargement et *E* est le maximum de l'énergie élastique emmagasinée par cycle de chargement. Le facteur *Q* est lié au coefficient d'atténuation α par la relation:

$$Q = \frac{\pi}{\lambda \alpha} \qquad (I.68)$$

Remarquons que le facteur de qualité est un paramètre sans dimension qui ne fait pas référence à la méthode expérimentale qui conduit à son calcul. Dans le cas particulier où l'atténuation croît linéairement en fonction de la fréquence on a :

$$\alpha(f) = \alpha_0 f \qquad (I . 69)$$

Dans ce cas le facteur Q est constant et égal à $(\lambda = V/f)$:

$$Q = \frac{\pi}{\alpha_0 V} = \text{const.}$$
(I. 70)

D'autre part, les auteurs préfèrent utiliser parfois l'inverse du facteur de qualité 1/Q ou $10^6/Q$ et parlent alors du facteur d'atténuation [Cuxac, 1991].

I.8.4 Le décrément logarithmique.

Le décrément logarithmique est défini à travers un système oscillant en vibrations libres et s'écrit :

$$\delta = Log \frac{A_i}{A_{i+1}} \qquad (I.71)$$

où A_i et A_{i+1} sont les amplitudes de deux oscillations consécutives (fig. I.20 (b)). Si on introduit le coefficient d'absorption exprimé en dB/ λ , on obtient la relation générale suivante:

$$\alpha [dB/\lambda] = \lambda \alpha [dB/m] = \frac{\pi}{Q} = \delta \qquad (I.72)$$

I.8.5. Absorption et diffusion.

Comme nous avons vu à la définition I.8.2, l'atténuation est un phénomène aux causes multiples. Mais elle est principalement due à deux phénomènes qui se superposent : l'absorption et la diffusion. Le coefficient d'atténuation peut s'écrire comme l'addition de deux coefficients, l'un relatif à l'absorption et l'autre à la diffusion. L'absorption est le phénomène par lequel l'énergie associée au mouvement de l'onde est redistribuée sous forme d'énergie de chaleur à cause des frottements internes au sein du matériau. Dans le cas où l'on est en présence uniquement de l'absorption le coefficient d'atténuation croît linéairement avec la fréquence ultrasonore. Cette absorption se traduit uniquement par une atténuation de l'onde en fonction de sa propagation.

Quant à la diffusion, elle vient s'ajouter à l'absorption, notamment dans les matériaux hétérogènes. Ce phénomène est analogue au phénomène observé avec un faisceau lumineux par temps de brouillard. Il résulte de multiples réflexions de l'onde sur les défauts de la matrice (granulats, pores, microfissures). La diffusion est accentuée lorsque la longueur d'onde est comparable à l'échelle des hétérogénéités [Klimis, 1988].

Dans les milieux granulaires, le rapport entre la longueur d'onde λ et la taille des hétérogénéités *D* (des granulats pour le béton), détermine la nature de l'atténuation :

- si $\lambda << D$, on est dans le domaine géométrique et le coefficient d'atténuation α en fonction de la fréquence *f* est donné par la formule I.73 [Garnier, 2000] :

$$\alpha = a_0 f + b_0 / D \qquad (I.73)$$

- si $\lambda \approx D$, le coefficient d'atténuation α peut être donné par la formule suivante :

$$\alpha = a_I f + c_I D f^2 \qquad (I.74)$$

où un facteur quadratique vient s'ajouter au facteur linéaire de l'absorption.

- si $\lambda >>D$, on est dans le domaine de Rayleigh. Le coefficient d'atténuation α peut être donné par la formule suivante :

$$\alpha = a_2 f + c_2 D f^2 + d_2 D^3 f^4 \qquad (I.75)$$

où a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , c_1 , c_2 et d_2 sont des constantes qui dépendent de la nature du béton.

Dans chaque équation, la première partie (partie linéaire) caractérise l'absorption alors que la seconde partie traduit la diffusion sur les grains. Quelques auteurs [Gaydecki, 1992] mesurent ces différents coefficients pour différents types de béton et montrent que le sable et le mortier sont les éléments les plus atténuants. D'autres auteurs [Frohly, 1983] proposent de calculer l'atténuation due aux hétérogénéités selon la densité de celles-ci et la comparaison de la longueur d'onde à leurs dimensions.

Pour les hétérogénéités de faibles dimensions par rapport à la longueur d'ondes $(D <<\lambda)$, on utilise le Modèle continu : cela correspond au cas où le nombre des hétérogénéités par unité de volume est suffisamment faible pour que les sections efficaces ne se recouvrent pas, et qu'après avoir subie une diffraction l'onde plane se soit reformée avant d'atteindre l'hétérogénéité suivante. De plus, on néglige les diffusions multiples. Dans ces conditions le coefficient d'atténuation est donné par la formule suivante [Frohly, 1983] :

$$\alpha = n_0 \phi$$
 (I. 76)

où n_o est la densité des hétérogénéités et ϕ est la section efficace.

La section efficace désigne le rapport entre l'énergie diffusée par unité de temps et la densité d'énergie incidente par unité de surface et par unité de temps. Sa dimension est homogène à une surface. Klimis (1988) donne l'expression I.77 de la section efficace en fonction du rayon des hétérogénéités et du nombre d'onde. Les hétérogénéités sont considérées comme des cavités sphériques de rayon très petit comparé à la longueur d'onde :

$$\phi = g K^4 D^6 \qquad (I.77)$$

avec *K* : nombre d'onde

D : rayon des hétérogénéités

g : coefficient fonction du rapport (V_L/V_T)

Pour des hétérogénéités de dimensions non négligeables par rapport à la longueur d'onde, on utilise le Modèle discret : les dimensions de ces hétérogénéités deviennent non négligeables par rapport à la longueur d'onde et aux dimensions de l'échantillon, le modèle continu précédent n'est plus applicable. La formule permettant le calcul du coefficient d'atténuation devient [Frohly, 1983]:

$$\alpha = \frac{3}{2D} Log(\frac{1}{1 - n_0 \frac{2D}{3}\varphi}) \tag{I.78}$$

Pour une densité d'hétérogénéités très élevée avec des dimensions non négligeables par rapport à la longueur d'onde la formule I.78 devient [Frohly, 1983] :

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}}{D\sqrt{2}} Log \frac{1}{1 - n_0 \frac{D\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \phi_c}$$
(I.79)

où ϕ_c représente la section efficace corrigée.

Les équations précédentes relient l'atténuation à la fréquence et à la longueur d'ondes. En revanche, elles ne traduisent pas l'effet d'une dégradation éventuelle du béton comme la perte de résistance, la dislocation des liaisons inter-granulaires, la porosité ou la teneur en eau.

I.9. Génération des ondes de surface.

Comme nous l'avons signalé précédemment, l'utilisation du mode de propagation surfacique est le plus adaptée pour l'auscultation de la peau du béton.

Pour cela, Ould Naffa, dans son travail de thèse, a montré que les moyens classiques pour générer des ondes de surface ne sont pas assez efficaces pour les raisons suivantes :

- transducteur à pointe : génération d'autres types d'ondes (longitudinales et transversales) induisant du bruit additionnel,

- choc provoqué par l'impact d'une masse (bille, marteau,...): même type de perturbation que précédemment,

- PUNDIT (appareil très utilisé en CND génie civil) : il s'agit d'un transducteur de mode de vibration longitudinal qui génère en même temps une onde de surface de faible amplitude (dans ce cas, l'onde de surface est considérée comme un signal «parasitaire»).

Dans ces différentes méthodes, le transducteur ne génère pas uniquement des ondes de surface, et les autres types d'ondes générés (longitudinales et transversales) représentent un bruit cohérent additionnel. De plus, les transducteurs de ce type n'offrent pas un bon rapport signal sur bruit : ce rapport se dégrade quand la fréquence augmente. D'un point de vue énergétique l'efficacité de tels transducteurs est faible.

Pour cela, dans le cadre de cette thèse comme pour celle de Ould Naffa, la réalisation d'un transducteur angulaire adapté a été conduite. Le fonctionnement de ce type de transducteur (utilisé dans le CND des métaux) est fondé sur la réflexion totale et la conversion des modes ([Krautkramer, 1969]) ; les faisceaux réfléchi et transmis ont des directions déterminées par les lois de Descartes (fig. I.21).



Figure I.21 : Conversion des modes pendant le passage d'une interface entre les milieux 1 et 2. [Ould Naffa, 2004]

Pour une onde incidente de type L (longitudinal), nous avons :

$$sin(\theta_{L2}) = \frac{V_{L2}}{V_{L1}} sin(\theta_{L1}) \quad \text{et} \quad sin(\theta_{T2}) = \frac{V_{T2}}{V_{L1}} sin(\theta_{L1}) \tag{I.80}$$

 V_{Ll} et V_{Tl} sont respectivement les vitesses de propagation des ondes L et T dans le milieu 1.

Pour une onde incidente de type *T*(transversale), nous avons respectivement :

$$sin(\theta_{L_2}) = \frac{V_{L_2}}{V_{T_1}} sin(\theta_{T_1}) \quad \text{et} \quad sin(\theta_{T_2}) = \frac{V_{T_2}}{V_{T_1}} sin(\theta_{T_1}) \tag{I.81}$$

 V_{L2} et V_{T2} sont respectivement les vitesses de propagation des ondes L et T dans le milieu 2.

Lorsque l'angle d'incidence θ_{L1} augmente, il apparaît un premier angle critique à $\theta_{L2}=90^{\circ}$, puis un second angle critique à $\theta_{T2}=90^{\circ}$. Ce dernier cas correspond à la condition de réflexion totale. A ce moment l'onde incidente est convertie en onde de surface. A partir des formules I.80 et I.81, les angles θ_{cL1} et θ_{cT1} correspondant à la génération de l'onde de surface (angles critiques) sont égaux à :

$$sin(\theta_{cL_1}) = \frac{V_{L_1}}{V_{T_2}} \quad \text{et} \quad sin(\theta_{cT_1}) = \frac{V_{T_1}}{V_{T_2}} \tag{I.82}$$

Ces équations n'ont un sens que si V_{L1} et V_{T1} sont inférieures à V_{T2} . Il faut donc que la vitesse dans le milieu 1 soit inférieure à la vitesse des ondes *T* dans le milieu 2 (béton). L'incidence sous angle critique est assurée par un coin qui joue le rôle du milieu 1.

En prenant V_{T2} =1700 m/s comme la plus faible valeur des vitesses de propagation d'ondes transversales mesurées sur un bloc dégradé , deux solutions sont possibles pour le matériau du milieu 1 (donc pour la réalisation du coin) :

- si l'onde incidente est une onde L (notre cas), le matériau solide répondant à cette exigence doit avoir une vitesse inférieure à 1700 m/s.

- si l'onde incidente est une onde T, le choix du matériau est un peu plus large.

L'onde générée est ainsi essentiellement constituée du mode de l'onde de surface.

I.10. Utilisation des ondes de surface - Localisation de fissures.

Les ondes de Rayleigh sont des ondes de surface, qui induisent des déformations du milieu et qui présentent une composante longitudinale et une composante transversale en quadrature, décrivant ainsi une ellipse. Ces ondes s'atténuent fortement en profondeur et dans les milieux couplés à l'eau. L'amplitude de l'onde de Rayleigh décroît exponentiellement en fonction de la profondeur (fig. I.22). Cette figure montre que l'onde s'évanouit à une profondeur égale à deux fois la longueur d'onde.

Les ondes de Rayleigh présentent plusieurs avantages :

- elles sont les seules utilisables si une seule face de l'ouvrage est accessible,

 leur profondeur de pénétration est en rapport avec leur longueur d'onde et donc avec la fréquence employée. Ces deux avantages nous conduisent à les privilégier dans notre thèse, où le but est de caractériser la dégradation du béton d'enrobage, donc de surface.



Figure I.22 : Décroissance de l'amplitude de l'onde de Rayleigh en fonction de la profondeur (Z). [Ould Naffa, 2004]

Avec d'autres auteurs, Ould Naffa dans sa thèse a montré que l'utilisation des ondes acoustiques dans le béton se trouve confrontée à un problème de longueur d'onde (donc de fréquence) adéquate. Etant donné que la profondeur de pénétration des ondes de surface dépend de la longueur d'onde, la variation de cette dernière sur la bande passante du signal émis peut renseigner sur la profondeur de la couche dégradée.

Jusqu'ici les longueurs d'ondes utilisées dans le béton classiquement sont de l'ordre du décimètre, (fréquences inférieures à 100 kHz) ceci s'expliquant par la volonté d'éviter une diffraction très importante sur les granulats, qui pourrait rendre le signal inexploitable (zone λ <D). Pourtant, pour caractériser une couche de l'ordre de quelques millimètres d'épaisseur il faut utiliser des longueurs d'ondes comparables à cette épaisseur c'est-à-dire des fréquences de l'ordre de 1 MHz.

Il s'agit donc d'élargir la gamme de fréquences par rapport à celles utilisées habituellement en Génie Civil.

Pour la gamme de fréquence utilisée habituellement de 5 à 80 kHz, des études ont caractérisé la localisation et l'estimation de la profondeur d'une fissure ou d'un trait de scie. Song (2003) détermine le coefficient de transmission de l'onde de surface à travers une fissure expérimentalement et numériquement. Il en découle une profondeur de fissure égale au tiers de la longueur d'onde λ . Hévin (1998) présente un modèle numérique permettant l'estimation de la profondeur de la fissure par la fréquence de coupure du coefficient de transmission à travers la fissure. Cette fréquence de coupure est déterminée au moment de la décroissance de la courbe du rapport signal transmis/ signal incident. Dans les deux cas, l'onde de surface est générée à l'aide d'un impact.

Dans notre travail, l'onde de surface est générée à l'aide d'un transducteur piézolélectrique. L'originalité de notre recherche sur les fissures est de travailler avec un réseau de fissures, ce qui est plus difficile. La méthode de localisation de fissures sera présentée au paragraphe III.7.4 du chapitre 3.

I.11. Méthodes acoustiques appliquées au génie civil.

De nombreuses méthodes acoustiques existent et peuvent être classées selon :

- leurs objectifs : caractérisation (détermination des paramètres mécaniques,...) ou imagerie (image interne de l'échantillon),

- la configuration géométrique : accessibilité à l'échantillon et forme de l'échantillon,

- le type de signal utilisé : impulsion ou harmonique.

La figure I.23 résume les différentes méthodes et leurs utilisations.



Figure I.23 : Différentes méthodes d'auscultation acoustique et utilisation. [Ould Naffa, 2004]

Pour effectuer des mesures sur des épaisseurs peu importantes, une des méthodes utilisée est celle de l'impact-écho. Cette technique interprète dans le domaine fréquentiel la réponse de la structure à un choc. Le générateur (marteau ou bille) envoie une onde de choc reçue par le transducteur récepteur. Il est ainsi possible de mesurer l'épaisseur, de détecter des interfaces dans le matériau ou des présences de vides ou de délaminages

Pour la localisation des défauts (fissures, vides, rugosité, gros cailloux,...), ce sont les méthodes d'imagerie acoustique, comme l'imagerie par écho impulsionnel, qui sont les plus utilisées. Le mode de balayage de la structure utilisé permet de distinguer trois modes :

- Scan-A : le signal est enregistré en un seul point,

- Scan-B : plusieurs signaux sont enregistrés suivant une ligne (points alignés),

- Scan-C : plusieurs signaux enregistrés dans deux directions perpendiculaires pour visualiser les dimensions latérales d'un (des) objet(s).

La forme et la taille des défauts à détecter et la distance entre le défaut et la surface de l'échantillon sont également des paramètres à prendre en compte.

Pour la caractérisation du matériau, les paramètres vitesse de propagation ou atténuation sont les plus utilisés puisque le signal propagé subit des modifications d'amplitude et de vitesse liées aux caractéristiques mécaniques et physiques du milieu. Le milieu de propagation est un paramètre à prendre en compte en fonction de son impédance et de son atténuation.

I.12. Conclusions et perspectives.

L'idéal pour accélérer les cadences de mesure dans le futur est de travailler avec un transducteur sans contact, ce qui évite les problèmes liés au couplage et permet de revenir sur les mêmes points de mesure en s'affranchissant des erreurs induites par la qualité du couplage. Ce transducteur sans contact est à l'étude et des tentatives d'utilisation ont été faites pour les campagnes sur site et les essais de fissuration contrôlée. Le chapitre suivant relatif aux résultats des essais réalisés en laboratoire abordera ce point.

CHAPITRE 2 : Dispositif expérimental du système de mesures

ultrasonores

II.1. Optimisation du transducteur coin et du couplant. II.1.1 Introduction.

Le problème de l'optimisation de la mesure des ondes de surface implique l'optimisation du transducteur et de son couplage avec le béton. Pour cela, nous allons regarder l'influence du matériau utilisé pour le coin et la nature du couplant sur les paramètres des ondes de surface. Pour cela, le choix de la meilleure combinaison matériau/couplant est effectué en recherchant séparément le meilleur matériau pour le coin et le meilleur couplant [Piwakowski, 2004.a]. Trois matériaux plexiglas, PVC et téflon, dont la vitesse de propagation remplit la condition nécessaire pour la génération des ondes de surface, sont ici comparés. Parallèlement cinq couplants sont comparés: SWC, miel, gel D, gel keratina. Pour chaque test, cinq paramètres sont obtenus à partir des mesures : la bande de fréquence, la fréquence centrale disponible maximale, l'erreur et l'écart-type sur la vitesse de groupe et l'erreur sur la caractéristique de la vitesse de dispersion. Ces paramètres sont ensuite classés en fonction du matériau du coin et du couplant.

Les couplants sont utilisés directement, ou avec un film plastique ou transparent. Les coins seront ensuite testés sur des échantillons de mortier sains ou dégradés à différents stades ainsi que sur des échantillons de béton [Fnine, 2001].

II.1.2 Procédure expérimentale.

Nous réalisons une série d'au minimum 5 à 10 points de mesure selon la qualité des signaux reçus. L'émetteur est fixe, le récepteur est placé à 3cm de l'émetteur au départ, puis il est déplacé de 1cm à chaque mesure (figure II.1) jusqu'à obtenir une série suffisante pour l'interprétation des résultats. Le système de mesures présenté figure fig.II.1 comporte un générateur d'ondes (Sofranel 5055 PR), une paire de transducteurs de contact (Panametrics), un oscilloscope digital et un ordinateur. Les mesures sont réalisées pour deux fréquences centrales 0,5 MHz et 1MHz.

Les essais sont réalisés sur des échantillons de mortier sains et dégradés chimiquement [Ould Naffa, 2002] et des petites dalles de béton. Ces échantillons ont des dimensions bien choisies afin d'éviter les effets de bord sur la propagation des ondes. Le mortier (ne contenant aucun gravier) est employé afin de limiter l'hétérogénéité du matériau ainsi que de faciliter l'interprétation des mesures sur les premiers essais en laboratoire. Les tests finaux sont réalisés sur du béton.



Figure II.1 : Schéma de positions des deux transducteurs et protocole d'acquisition des signaux.

Les matériaux pour les coins ainsi que les vitesses de propagation respectives sont listés dans les tableaux II.1 et les couplants dans le tableau II.2.

matériau	vitesse de propagation		
plexiglas	(OT) c _{wT} 1250 m/s		
PVC dur	(OT) c _{wT} 990m/s		
téflon	(OL) c _{wL} 1273 m/s		

Tableau II.1 : Matériaux utilisés pour les coins.

Couplant	Fabricant		
SWC	Sofranel 78500 Sartrouville		
Miel	Production St Georges 64700 Gan		
gel D	Sofranel 78500 Sartrouville		
gel keratina	Gel keratina 61101 Flers		

Tableau II.2 : Couplants utilisés.

Les ondes de surface sont générées suivant le principe d'inclinaison jusqu'à un angle critique décrit au paragraphe I.9 du chapitre 1. Ainsi, la vitesse dans le matériau utilisé pour réaliser le coin doit être inférieure à celle dans l'échantillon qui est autour de 2000m/s.

En déplaçant le transducteur récepteur aux différentes distances R_1 , R_2 ... R_n nous enregistrons un profil de signaux. Un exemple de signaux obtenus à six distances R_1 , R_2 ,... R_6 est présenté dans la figure ci-dessous.



Figure II.2 : Exemple de signaux reçus sur le mortier sain téflon/gel D à 0,5MHz.

Ces signaux sont ensuite traités à l'aide du logiciel MATLAB. Pour cela, le traitement nécessite le développement d'un modèle analytique présenté au paragraphe suivant.

II.1.3 Modèle analytique [Piwakowski, 2004.a]

Les signaux d'entrée et de sortie sont notés $S_i(j\omega)$ et $S_o(j\omega)$ reliés entre eux par une fonction de transfert $H(j\omega)$ en supposant que les réponses électriques des deux transducteurs sont incluses dans le signal d'entrée :

$$S_i(j\omega) = S_o(j\omega) \times H(j\omega)$$
 (II.1)

avec

$$H(j\omega) = A(\omega) \times e^{-\alpha(\omega)R} \times e^{j\varphi(\omega)}$$

(II.2)

où R est la distance parcourue par le signal, $\alpha(\omega)$ le coefficient d'absorption et $\phi(\omega)$ les caractéristiques de phase.

La représentation ci-dessus permet de considérer séparément les termes représentant l'absorption totale et les caractéristiques de phase. Les autres effets (diffraction,...) sont inclus dans le terme $A(\omega)$. La distance parcourue par l'onde entre le transducteur émetteur et récepteur (figure II.1) peut être présenté comme :

$$R = 2R_w + 2(R_c + \Delta R_c) + R_m$$
(II.3)

où R_w , R_c et R_m représentent respectivement les distances parcourues par l'onde dans le coin, dans le couplant et dans le milieu inspecté. Le terme ΔR_c représente ici la partie aléatoire liée à l'incertitude et l'aspect aléatoire de l'accouplement et de l'épaisseur du couplant. De même, l'absorption totale du signal voyageant entre l'émetteur et le récepteur peut s'exprimer par :

$$\alpha(\omega)R = 2\alpha_{w}(\omega)R_{w} + 2\alpha_{c}(\omega)(R_{c} + \Delta R_{c}) + \alpha_{m}(\omega)R_{m}$$
(II.4)

où α_w , α_c et α_m représentent respectivement l'absorption dans le coin, dans le couplant et dans le milieu inspecté.

Puisque l'absorption augmente avec la fréquence, le terme $e^{(-\alpha(\omega)R)}$ agit en tant que filtre bas causant de ce fait un décalage Δf du spectre et un rétrécissement de la largeur de la bande [Kuc, 1984]. Cet effet est clairement mis en évidence dans la figure ci-dessous sur cet exemple de trois signaux de réception.



Figure II.3 : Exemple de spectre de signaux reçus à trois positions de réception et une illustration des paramètres F_{max} , Δf et B.

La fréquence maximum *Fmax* et la largeur de bande B définis à la figure II.3 peuvent être employées comme indicateurs de l'absorption totale $\alpha(\omega)$. Pour un couplant donné et différents matériaux du coin, *Fmax* et *B* sont indexés sur l'absorption dans le coin α_w . Aussi

bien, pour un matériau donné du coin et différents couplants, *Fmax* et *B* reflètent l'absorption du couplant α_c .

La vitesse de groupe Vg des ondes de surface est obtenue en mesurant le temps Δt mis par l'onde pour parcourir une distance ΔR , i.e. $V_g = \frac{\Delta R}{\Delta t}$. De l'équation II.3, on voit que le terme ΔR_c affectera l'exactitude dans la détermination de Vg. En étudiant l'erreur systématique de Vg et son erreur relative $\frac{\Delta V_g}{V_g}$ pour différents types de couplants, ceci permettra de déterminer le matériau capable de donner des résultats répétitifs ou répétables.

Le déphasage total du signal s'exprime comme :

$$\varphi(\omega) = k(\omega)R = 2k_w(\omega)R_w + 2k_c(\omega)(R_c + \Delta R_c) + k_m(\omega)R_m$$
(II.5)

où k, k_w , k_c and k_m représentent respectivement les nombres d'onde, l'incertitude sur le couplage (terme ΔR_c) causera aussi une incertitude sur les caractéristiques de phase. Ceci aura comme conséquence une incertitude sur la caractéristique de dispersion de la vitesse de phase $V_f(\omega)$ définie comme :

$$V_f(\omega) = \omega \frac{\Delta R}{\Delta \varphi(\omega)}$$
(II.6)

II.1.4 Critères de sélection.

La stratégie de sélection de la meilleure combinaison coin/couplant nous conduit à rechercher séparément le meilleur matériau pour le coin et le meilleur agent couplant.

La recherche sur le matériau du coin nous impose :

- une vitesse telle que $c_{wL} < c_{T2}$ ou $c_{w_T} < c_{T2}$,

- une absorption α_{W} aussi petite que possible (valeurs maximales de F_{max} and B)

En tenant compte de la disponibilité des matériaux, trois combinaisons type d'onde/coin sont choisis comme le montre le tableau II.1.

La recherche sur le type de couplant nous impose :

- une épaisseur R_{C} aussi petite que possible $% \left(erreur minime \ sur \ V_{g} \right)$,
- une absorption α_c aussi petite que possible (valeurs maximales de F_{max} and B),

- une répétition des résultats (erreur relative minimale de $\frac{\Delta V_g}{V_a}$ et de $V_f(\omega)$),

- une facilité d'emploi,
- un produit très peu coûteux.

Les types de couplants utilisés durant les tests sont présentés précédemment au tableau II.2. Ils ont été choisis parmi les couplants utilisés dans le domaine médical et du contrôle non destructif pour le SWC et le gelD; pour des mesures dans le béton à de basses fréquences pour la graisse et le miel. L'utilisation du gel de cheveux Keratina est d'ordre économique.

Les couplants sont testés dans deux configurations : contact direct et contact avec un film plastique très fin. L'utilisation du film offre plusieurs avantages :

- facilité de déplacement du transducteur pendant les mesures,

- diminution de la perte de couplage lors du déplacement du transducteur et des frottements entre le coin et l'échantillon,

- utilisation d'une grille prédéfinie des points de mesures imprimée que le film,
- empêche le séchage du couplant pendant les mesures.

Théoriquement une couche très fine d'épaisseur $d << \lambda$ est transparente acoustiquement et n'affecte pas les paramètres de mesures de l'onde de surface.

Les paramètres d'analyse des critères de sélection sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Paramètre étudié	Critère de selection		
fréquence F _{max}	maximale		
largeur de bande <i>B</i>	maximale		
erreur sur la vitesse de groupe V_g	minimale		
erreur relative $\Delta V_g / V_g$	minimale		
erreur sur les caractéristiques de dispersion de la vitesse de phase $V_f(\omega)$	minimale		

Tableau II.3 : Paramètres utilisés pour les critères de sélection.

II.1.5 Résultats.

Comme vu précédemment, le choix du matériau pour le coin se fait indépendamment de celui du couplant. Nous travaillons sur un mortier sain de référence.

Le tableau II.4 présente la vitesse de groupe Vg et la fréquence Fmax comme fonction du matériau pour le coin. Les tests sont réalisés avec du couplant SWC et avec deux transducteurs de fréquence centrale 0,5 et 1MHz.

Mortier sain		Plexiglas	PVC dur	téflon
Fmax = f(matériau coin) (MHz)	0,5MHz	0,13	0,27	0,27
	1MHz	0,23	0,31	0,37
Vitesse = f(matériau coin) (m/s)	0,5MHz	2323	2026	1998
	1MHz	2118	2032	2005

 Tableau II.4 : Vitesse de groupe Vg et Fmax des signaux obtenus sur un mortier sain associé au couplant SWC à 0,5 et 1MHz.

L'évolution du paramètre Fmax montre clairement que le coin en plexiglas possède la plus grande absorption. Indépendamment, la vitesse de groupe Vg obtenue avec le coin en plexiglas montre une erreur significative : vitesse très différente à 0,5 et 1MHz.

Cette erreur résulte du décalage de fréquence Δf causé par l'absorption relativement élevée dans le plexiglas : en fait cette absorption, diminuant la fréquence du signal, limite la précision des mesures du temps de parcours Δt . En regardant tous les résultats confondus, cela montre que le téflon semble être le meilleur matériau pour la réalisation du coin.

Intéressons nous maintenant au choix du couplant.

Le couplant sera associé ou non à un film plastique très fin ou à un transparent pour améliorer le couplage.

Les essais sont réalisés sur un mortier dégradé, en utilisant des coins en téflon et des transducteurs de fréquence centrale 0,5MHz.

Les résultats présentés aux figures II.4 A II.7 montrent l'évolution des paramètres F_{max} , B, V_g

et $\frac{\Delta V_g}{V_g}$ en fonction de la nature du couplant.







Figure II.5 : Evolution du paramètre Fmax en fonction de la nature du couplant. (en gris : les valeurs les plus intéressantes)



Chapitre 2 : Dispositif expérimental du système de mesures ultrasonores

Figure II.6 : Evolution de la vitesse de groupe Vg en fonction de la nature du couplant. (en gris : les valeurs les plus intéressantes)



Figure II.7 : Variation de l'erreur relative de vitesse de groupe ΔVg/Vg en fonction de la nature du couplant. (en gris : les valeurs les plus intéressantes)
Intéressons nous dans un premier temps à la recherche du type de couplant donnant la meilleure valeur du paramètre B. Sur le graphique de la figure II.4, nous notons que la meilleure largeur de bande B est obtenue pour les gelD et Keratina. De plus, l'utilisation du transparent ou d'un fin film plastique augmente cette bande.

Regardons maintenant le type de couplant donnant la plus petite absorption, le gelD se distingue nettement des autres couplants (fig. II.5) qu'il soit associé ou non à un transparent ou film. De ces deux graphiques, nous notons que les couplants de type « gel » sont très peu absorbants. Ceci était à prévoir puisque le gelD est utilisé en contrôle non destructif à hautes fréquences et dans l'imagerie médicale. Les couplants plus visqueux comme le SWC et le miel semblent ne pas être adaptés à une utilisation à haute fréquence.

Concernant l'erreur sur la vitesse de groupe (fig. II.6) par comparaison à une vitesse de l'ordre de 1750 m/s dans ce mortier dégradé, ce sont le gelD et le gel Keratina associé à un transparent qui se distinguent le mieux. Notons également que l'utilisation d'un transparent diminue l'incertitude sur les mesures (fig. II.7), les plus petites erreurs relatives sont obtenues avec le gel D, le gel Keratina et le couplant SWC.

Afin d'analyser l'exactitude des résultats obtenus, le résultat exact de référence doit être connu. Pour cela, en se basant sur les conclusions précédentes et l'utilisation du gel D comme choix du couplant, la caractéristique de dispersion du gel D est prise comme référence.

II.1.6 Conclusion.

Le matériau utilisé pour la réalisation du coin et la nature du couplant utilisé influencent les paramètres des ondes de surface et les résultats des mesures. Parmi les trois matériaux testés pour le coin, le téflon a été choisi comme le meilleur et sera utilisé pour les expériences futures.

Les résultats montrent également que le type de couplant peut à travers l'absorption, la viscosité et d'autres propriétés physiques introduire des erreurs dans la mesure de la vitesse de groupe et de la vitesse de phase. Sa propre absorption limite la bande de fréquence et introduit une erreur dans la mesure de l'absorption. Les meilleurs couplants sont le gel D et le gel Keratina. Des couplants plus épais et plus visqueux comme la SWC sont les plus mauvais. La graisse généralement utilisé dans le contrôle non destructif (par exemple avec le PUNDIT) à de plus basses fréquences donne des résultats intermédiaires.



Figure II.8 : Evolution du paramètre Fmax en fonction de la nature du couplant sur un béton sain et dégradé (coin en téflon avec un transducteur à 0,5MHz). [Piwakowski, 2004.a]

Cette figure II.8 valide les conclusions précédentes en comparant le paramètre Fmax pour le bruit sur un béton dégradé avec deux couplants différents : le miel étant le plus mauvais et le gel Keratina le meilleur. Pour des raisons de coûts, le gel Keratina a été choisi pour les mesures futures aussi bien en laboratoire que in-situ.

Le dispersion de vitesse s'est avérée extrêmement sensible au type de couplant. Cette observation est de grande importance parce que la caractéristique de dispersion peut être utilisée pour estimer l'épaisseur de la couche dégradée. L'utilisation d'un film transparent augmente la largeur de bande et diminue les incertitudes de mesures mais introduit une petite erreur dans la caractéristique de dispersion la vitesse.

II.2. Dispositif expérimental du système de mesures.

Le système de mesures n'a cessé d'évoluer tout au long du travail de thèse. En effet, au cours de l'avancement du projet, le système a dû être modifié pour l'adapter à certaines conditions de mesures. Par exemple afin de pouvoir augmenter le nombre de mesures et leur répétition, l'acquisition des signaux a été automatisée ce qui entraîne un gain de temps considérable et un meilleur rendement. Le système de traitement de données a également évolué en même temps que le dispositif de mesures, ce qui a permis par la suite de corréler plusieurs méthodes de traitements entre elles. Dans les paragraphes qui vont suivre, nous présenterons donc l'évolution du système de mesures sous quatre versions en nous basant sur les résultats de la

partie précédente à savoir l'utilisation du téflon pour le coin et du gel Keratina comme couplant.

II.3. Version 1 COIN-COIN : émetteur et récepteur avec contact.II.3.1 Version 1 : description du système.

Les transducteurs émetteur et récepteur sont reliés à un générateur d'ondes comme présenté sur la figure II.9. Celui-ci est relié à un oscilloscope afin de visualiser le signal. Cet oscilloscope est ensuite relié à un ordinateur. Un logiciel d'acquisition des signaux a été réalisé afin de permettre l'enregistrement rapide des mesures. De plus, un PC de terrain équipé de ce logiciel spécifique d'acquisition des données de façon rapide et fiable, a été instrumenté et ceci afin de pouvoir l'utiliser sur site.



Figure II.9 : Système COIN-COIN d'acquisition des mesures d'onde de surface.

La figure II.10 présente le programme installé sur le PC de terrain au moment de l'acquisition d'un signal et une photo de la paire des transducteurs angulaires posée sur une plaque de béton lors des tests préliminaires en laboratoire.



Figure II.10 : Logiciel d'acquisition de signaux et paire des transducteurs angulaires pour l'onde de surface.

II.3.2 Version 1 : paramètres issus du traitement des données.

Les signaux enregistrés sur la surface de l'échantillon sont traités afin d'extraire les paramètres suivants :

- vitesse de groupe V_g (m/s),

- vitesse de phase en fonction de la fréquence V_{ph} (f) (m/s) (caractéristique de la dispersion),

- coefficient d'atténuation en fonction de la fréquence $\alpha(f)$ (dB/m).

Pour les procédures de mesure de vitesse et d'atténuation, l'intervalle fréquentiel de validité de la mesure, *B*, est déterminé automatiquement grâce au calcul du coefficient de cohérence des signaux [Goueygou, 2001] (courbe dans la partie basse des graphes dont un exemple est donné au bas de la fig.II.16).

II.3.2.1 Vitesse de groupe.

La vitesse de groupe est déduite comme vue précédemment au paragraphe I.7.3 au chapitre 1:

- par la mesure du temps de retard entre deux signaux enregistrés en des points différents,

- par la distance entre ces deux points (fig. II.11).



Figure II.11 : Exemple de signaux enregistrés pour la mesure de la vitesse de groupe des ondes de surface.

Nous retrouvons la formule (I.39) de la vitesse de groupe :

$$V_g = \frac{\Delta R}{\Delta t}$$
(II.7)

Une telle mesure donne la vitesse du signal "entier".En pratique, la vitesse de groupe est déterminée à partir des retards entre les deux premières arrivées du signal ou entre les maximas les plus faciles à distinguer. Il est facile de s'apercevoir que dans un milieu non dispersif la vitesse de phase et la vitesse de groupe sont égales.

II.3.2.2 Vitesse de phase.

Nous avons vu également au paragraphe 1.7.3 du chapitre 1 que la vitesse de phase peut donc être obtenue par la comparaison de phases ($\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$) de deux signaux observés à la distances R_1 et R_2 à partir de la relation :

$$\Delta \varphi(\omega, R) = \frac{\omega \Delta R}{V(\omega)} = k(\omega) \Delta R \qquad (II.8)$$

où ΔR est la distance entre R_i et R_j .

La phase est périodique avec une période de 2π c'est-à-dire :

$$\Delta \varphi(\omega, R) = 2n\pi + \Delta \varphi(\omega) \qquad (II.9)$$

par conséquent, il existe une infinité de solutions de l'équation (II.8).

Afin de trouver la solution exacte, le terme "périodique" modulo 2π doit être éliminé. La vitesse de phase peut alors être obtenue comme suit [Mathews, 1996], [Hassaim, 2001] et [Goueygou, 2001]:

$$V_{PH}(\omega) = \frac{\omega(R_2 - R_1)}{\Delta \varphi_0(\omega)}$$
(II.10)

La figure II.12 montre le résultat de la validation de la procédure de calcul de la vitesse de phase à l'aide d'une routine développée sous Matlab. Ceci permet de tester et de valider la procédure de calcul appliquée aux signaux réels.

Les signaux présentés sur cette figure ont été générés numériquement en utilisant le code de calcul Dream développé au laboratoire [Piwakowski, 1999].

La fonction de dispersion $V(\omega)$ introduite est liée au déphasage $k_d(\omega R$ (équation I.61). Elle a été prise sous la forme :

$$\frac{1}{V(\omega)} = \frac{1}{V_0(\omega_0)} - \frac{\alpha_0}{\pi^2} ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$$
(II.11)

Cette dispersion caractérise les milieux pour lesquels l'atténuation croit linéairement en fonction de la fréquence : $\alpha = \alpha_0 f$ [Azmi, 1968].



Figure II.12 : Illustration de la procédure de calcul de la caractéristique de phase par la mesure de la différence de phase [Ould Naffa, 2004] :

- (a) réponses h_{α} pour les distances R1 et R2 (équations I.59 et I.61)
- (b) les phases des deux signaux
- (c) la vitesse de phase obtenue selon l'équation II.8.

La partie (a) de cette figure présente les deux signaux d'entrée. Ces signaux représentent les réponses impulsionnelles h_{α} des transducteurs ponctuels calculées selon les équations I.54, I.55 et I.56. Leur décalage temporel résulte du retard de propagation et leur différence de forme est due à l'atténuation et la dispersion des vitesses.

La partie (**b**) présente les phases φ_1 et φ_2 de ces deux signaux.

La partie (c) présente la courbe de la vitesse de phase obtenue à l'aide de l'équation II.10. Cette courbe est identique à la courbe relative à l'équation II.11, confirmant ainsi la précision de l'approche de calcul et la validité du programme développé.

Nous allons appliquer cette procédure à des signaux mesurés sur un mortier sain dont le résultat est présenté à la figure II.13. Pour cela, nous enregistrons les signaux temporels à cinq positions différentes espacées chacune de 2cm.



Figure II.13 : Vitesse de phase estimée par la méthode de la différence de phase appliquée aux signaux obtenus sur le mortier. $\Delta R_{i, i+1} = 2$ cm. [Ould Naffa, 2004]

(a): signaux temporels.

(b) : vitesses de phase obtenues pour les différentes paires de signaux d'entrée. La courbe épaisse indique la courbe moyenne.

(c) : les spectres des signaux d'entrée, la flèche indique la zone fréquentielle de validité des résultats.

Ce résultat montre que chaque paire de signaux donne une courbe de phase différente. La courbe caractéristique est la moyenne des courbes individuelles (b). Nous remarquons également que la bande fréquentielle du signal d'entrée est limitée (c). Par conséquent, les résultats du calcul ne sont valables que dans cette bande fréquentielle, là où le rapport signal/bruit est élevé. La zone de validité des résultats correspond aussi à l'intervalle délimité

par deux lignes verticales sur la figure (c) dans lequel les courbes de dispersion sont quasihorizontales.

La différence entre les courbes de phase est due à l'inhomogénéité du béton, à la non répétitivité du couplage et aux effets du champ proche. Cette différence peut être diminuée en supprimant simplement les courbes aberrantes, mais ceci introduit une certaine non-objectivité de la mesure. Afin d'éliminer cette non-objectivité, nous avons testé et appliqué une deuxième méthode pour la détermination de la caractéristique de dispersion. Cette méthode est connue sous le nom de transformation $p-\tau$ appelée également "Slant Stack" ([Yilmaz, 1987], [Piwakowski, 2004.b]) également utilisée en géophysique dans la technique MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

II.3.2.3 Vitesse par la méthode Slant Stack.

Le traitement des signaux permet de déterminer la vitesse de groupe et la vitesse de phase en fonction de la fréquence en utilisant la transformée p- ω ou sommation oblique, « slant-stack » en anglais. Lors de l'acquisition des données, les signaux d'entrée sont enregistrés sur les positions R_1 ,, R_n et peuvent être considérés comme des signaux bidimensionnels s(t,R). La procédure « slant-stack » consiste à introduire un retard linéaire sur ces signaux $\tau = pR$:

$$x(\tau, R, p) = s(t - pR, R)$$
 (II.12)

le paramètre p est l'inverse de la vitesse, ou lenteur (slowness) :

$$p = \frac{1}{V} \qquad (\text{II}.13)$$

L'équation (II . 12) est écrite dans l'intervalle $[p_{min}; p_{max}]$ c'est-à-dire dans la zone couvrant l'ensemble des vitesses possibles.

L'addition de l'ensemble des signaux permet d'éliminer *R* et d'obtenir le *slant stack ST* qui représente, le signal d'entrée dans le plan temps-lenteur :

$$ST(\tau, R, p) = \sum_{i=1}^{n} x(\tau, Ri, p)$$
(II.14)

L'application de la transformée de Fourier au ST le transfère dans le domaine (p, ω) :

$$ST(\omega, p) = F[ST(\tau, p)]$$
(II.15)

En remplaçant *p* par 1/V, la grandeur obtenue peut être analysée dans le plan (*V*, ω). L'exemple d'une telle procédure est illustré sur la fig.II.14 Les cinq signaux d'entrée $S_1,...,S_5$ ont été générés par le code DREAM et les signaux ont une bande fréquentielle limitée. Alors :

$$Si(t, R_i) = h_{\alpha}(t, R_i) * g(t) \qquad (\text{II} . 16)$$

La partie (b) de la fig.II.14 présente le signal $ST(V, \omega)$. Le maximum du ST, tracé en fonction de la fréquence, donne la courbe caractéristique de la dispersion. Le graphe $ST(\omega, V)$ montre également l'étendue spectrale du signal, donc la zone fréquentielle à priori exploitable pour les mesures. Sur la fig.II.14 (b), la largeur du maximum sur l'axe des vitesses indique la précision de la résolution de la vitesse de phase.

La précision en terme de résolution de la vitesse augmente lorsque la distance R_n - R_1 augmente et lorsque le rapport $\Delta R/\lambda$ diminue. Pour ce dernier, le critère à respecter est (théorème d'échantillonnage spatial) :

$$\frac{\Delta R}{\lambda} \leq 0.5 \tag{II.17}$$

L'avantage de cette approche est que la courbe caractéristique de phase ainsi que sa précision résulte du traitement de l'ensemble de tous les signaux. Ceci permet donc d'éviter l'ambiguïté liée au choix d'une paire de signaux dans la méthode du décalage de phase. Bien évidement, comme le confirme les tests effectués, si le signal est de bonne qualité avec un bon rapport signal/bruit les deux méthodes convergent vers le même résultat.

La fig.II.14 (d) présente une comparaison entre les fig.II.14 (c) et (b).

En résumé, chacune de ces méthodes donne la vitesse de groupe V_g et la caractéristique de dispersion de la vitesse de phase $V_{ph}(f)$.





a) : données d'entrée simulées par le code Dream.

b) : signal d'entrée dans le plan vitesse de phase - fréquence, la courbe indique la caractéristique de dispersion pour un matériau dispersif.

c) : présente le même résultats que b) pour un matériau non dispersif.

d) : comparaison de la caractéristique de dispersion présentée sur b) avec le résultat analytique.

II.3.2.4 Atténuation.

Nous travaillons dans une zone de champ lointain de l'émetteur. Dans le cas général, la mesure de l'atténuation s'effectue par la comparaison de deux signaux enregistrés aux distances R_1 et R_2 par rapport à la position de l'émetteur (fig. II.15).

Soient les signaux S_1 et S_2 enregistrés aux distances R_1 et R_2 de l'émetteur comme l'indique la figure II.15 (équation I.58).



Figure II.15 : Configuration de la mesure de l'atténuation. [Ould Naffa, 2004]

Si les distances R_1 et R_2 se trouvent dans la zone du champ lointain (équation I.49) du transducteur c'est-à-dire (équation I.51) :

$$(R_1, R_2) \ge R_f \tag{II.18}$$

et si l'on considère que la mesure est réalisée sur l'axe du transducteur émetteur $(b(\theta)=1)$ avec un transducteur récepteur assimilable à une sonde ponctuelle (facteur de directivité en réception $b(\theta)=1$), alors les amplitudes spectrales des signaux, selon les formules I.65 (a) et (b), sont égales à :

$$S_{I}(R_{I},\omega) = \frac{qe^{-\alpha(\omega)R_{I}}}{2\pi R_{I}}$$
(II. 19)

et

$$S_2(R_2,\omega) = \frac{q_e^{-\alpha(\omega)R_2}}{2\pi R_2}$$
(II.20)

L'atténuation exprimée en dB/m peut être obtenue directement à partir du rapport S_1/S_2 :

$$\alpha(\omega)_{\text{[db/m]}} = \frac{1}{R_2 - R_1} [20 Log(\frac{S_1(R_1, \omega)}{S_2(R_2, \omega)}) + 20 Log(\frac{R_1}{R_2})] \qquad (\text{II} . 21)$$

Cette formule est communément utilisée pour la détermination de l'atténuation mais souvent le terme 20Log (R_1/R_2) dans le champ lointain (formule II.18) est ignoré. Ceci est justifié, dans le cas particulier où les points d'observation sont proches l'un de l'autre, mais à grande distance du transducteur, c'est-à-dire :

$$R_1 \approx R_2 = R \operatorname{et}(R_1, R_2) \gg R_f \qquad (\text{II} . 22)$$

Si l'onde est considérée comme une onde plane, la formule II.21 se simplifie et devient :

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{R_2 - R_1} [20 Log(\frac{S_1(R_1, \omega)}{S_2(R_2, \omega)})]$$
(II.23)

Le signal mesuré peut être harmonique ou impulsionnel. Dans le premier cas, les grandeurs S_1 et S_2 , qui représentent physiquement les amplitudes des signaux harmoniques, sont mesurées directement. En revanche, dans le second cas, c'est-à-dire, si le signal a une forme impulsionnelle de type s(t,R), alors son amplitude spectrale est obtenue par la transformée de Fourier. Elle est mesurée par comparaison des amplitudes spectrales de deux échos successifs. Soit $S_1(f)$ et $S_2(f)$ les spectres d'amplitude moyens des échos obtenus :

$$S(R,\omega) = |\Im(S(R,t))|$$
 (II. 24a) ou $S_{1,2}(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |FFT(S_{1,2}(t,i))|$ (II. 24b)

où n=36 le nombre de points de mesure et FFT représente la transformée de Fourier rapide.

Dans nos conditions de mesures, l'émetteur et le récepteur sont séparés de 3cm au minimum. La limite du champ proche pour les conditions de mesures étant de 3cm, le transducteur récepteur peut être considéré comme une sonde ponctuelle. Dans ces conditions les calculs sont effectués à l'aide de la formule (II.21) un peu modifiée :

$$\alpha(\omega)_{ldb/mj} = \frac{1}{R_2 - R_1} [20 Log(\frac{S_1(R_1, \omega)}{S_2(R_2, \omega)}) + 10 Log(\frac{R_1}{R_2})]$$
(II. 25)

La modification est due au fait que l'onde de surface est de type cylindrique. Par conséquent, la solution élémentaire prend la forme suivante (pour un milieu atténuant avec comme émetteur une source ponctuelle) :

$$G(\omega,R) = \frac{A}{\sqrt{R}} e^{-\alpha R} e^{-jkR}$$
(II.26)

ce qui explique le terme de $10log(R_1/R_2)$ au lieu de $20log(R_1/R_2)$ dans l'équation II.21.

Lorsque l'épaisseur de l'échantillon est inférieure ou égale à la longueur du champ proche des transducteurs, il est nécessaire de corriger les effets de diffraction. Dans les milieux fortement absorbants, comme le béton, viennent s'ajouter des erreurs de type aléatoire qui peuvent être corrélées ou non avec les signaux mesurés $s_1(t)$ et $s_2(t)$. Le bruit non corrélé est constitué essentiellement du bruit électronique et du bruit de quantification du système de mesure. Le bruit corrélé résulte de la diffusion de l'onde transmise à travers les inhomogénéités du matériau (entre autres les granulats). L'effet de ce bruit peut s'exprimer comme une convolution aléatoire avec les signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$. Une autre source de bruit est le bruit de phase qui se manifeste par une variation aléatoire du temps d'arrivée des signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$. A cause de ces différentes sources de bruit, l'atténuation estimée varie suivant le point où elle est mesurée. L'idée la plus simple pour réduire cette variance, est de moyenner les valeurs obtenues en différents points de mesure. Cependant, la moyenne donnera une estimation biaisée de la grandeur recherchée si le bruit qui se superpose à cette grandeur a une valeur moyenne non nulle.

Deux méthodes d'estimation de l'atténuation à partir de plusieurs signaux mesurés ont été comparées et évaluées en présence de bruit. De façon générale, la méthode dite du « spectre croisé » s'est montrée plus robuste qu'un simple moyennage des valeurs de l'atténuation obtenues en chaque point de mesure. Néanmoins, il est indispensable avec cette méthode de réaligner les signaux enregistrés sur une même référence temporelle afin de compenser l'erreur de phase. La méthode « SC » est couramment utilisée pour l'identification de systèmes linéaires, mais son application au domaine ultrasonore est, à notre connaissance, totalement originale. En particulier, elle permet d'estimer la fonction de cohérence γ qui indique une zone de fréquence de cohérence maximale, où l'estimation de l'atténuation est la plus précise :

$$\hat{\gamma}_{1\to 2}(f) = \frac{\left|\hat{G}_{s_1s_2}(f)\right|}{\sqrt{\hat{G}_{s_1s_1}(f)\hat{G}_{s_2s_2}(f)}}$$
(II.27)

où $\hat{G}_{s_1s_2}$ est l'interspectre des signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ et $\hat{G}_{s_1s_1}$ l'autospectre du signal $s_1(t)$, estimés à partir des *m* mesures.

La fiabilité de l'estimation de l'atténuation par la méthode « SC » est alors garantie lorsque la cohérence est proche de 1 (cette approche a été appliquée avec succès au suivi de l'endommagement de blocs de mortier ayant subi une dégradation d'origine chimique).

En résumé, afin d'illustrer l'obtention du coefficient d'atténuation, les graphes de la figure cidessous sont issus du traitement de programmes à partir du logiciel Matlab.



Figure II.16 : Détermination de l'atténuation en fonction de la fréquence. [Piwakowski, 2003]

Sur la figure II.16 (a), les courbes d'atténuation $\alpha(f)$ présentent la variation de l'atténuation sur un béton sain et à deux degrés de dégradation (15 et 30 jours). Le symbole *B* indique

l'intervalle fréquentiel de la validité des mesures, Δf indique le décalage spectral causé par l'atténuation (utilisé pour l'estimation de l'atténuation).

De plus, le traitement permet de tracer la pente (b) issue de la courbe d'atténuation en fonction de la fréquence. Il permet également de suivre le décalage (partie (c)) du spectre des signaux vers la droite au fur et à mesure de l'éloignement de la source et indique l'intervalle de confiance délimité par un indice de cohérence proche de 1.

Finalement, le coefficient d'atténuation $\alpha(f)$ fonction de la fréquence est déterminé également par deux approches analytiques :

- par approche « classique » : α_c ,
- par une méthode de régression linéaire : α_r [Goueygou, 2001].

II.3.3 Version 1 : conclusion.

Pour les procédures de mesure de vitesse et d'atténuation, l'intervalle fréquentiel de validité de la mesure, *B*, est déterminé automatiquement grâce au calcul du coefficient de cohérence des signaux [Goueygou, 2001] (courbe dans la partie basse des graphes dont un exemple est donné au bas de la fig.II.16).

Afin de pouvoir représenter avec une seule valeur les paramètres $\alpha(f)$ et V_{ph} (f) qui représentent des fonctions de la fréquence, la caractéristique de dispersion est représentée de façon simplifiée par la pente de sa caractéristique V_{phP} . De même l'atténuation est caractérisée par sa valeur $\alpha(f_o)$ dans le milieu f_o de l'intervalle de validité B et en même temps par la pente de sa caractéristique α_{cp} . De plus, afin de vérifier l'utilité et la pertinence des différents indices simplifiés utilisés par différents auteurs pour l'estimation de l'atténuation, celle-ci est caractérisée par le décalage du spectre Δf par le trajet du signal ΔR .

L'atténuation a montré son extrême sensibilité à la dégradation des structures en béton. Le problème spécifique de l'estimation de l'absorption du matériau béton non homogène et d'absorption très élevée a nécessité le développement d'une procédure adéquate.

Tous les paramètres définis pour la caractérisation acoustique de la dégradation du béton sont résumés dans les tableaux II.5 et 6.

Type de paramètre	Symbole	Méthode de mesure	Unité
Vitesse de groupe	V _g ^{DF}	Différence de phase	m/s
Pente de la caractéristique de dispersion	V_{phP}^{DF}	Différence de phase	m/s/MHz
Vitesse de groupe	V_g^{SS}	« Slant Stak »	m/s
Pente de la caractéristique de dispersion	V_{phP}^{SS}	« Slant Stak »	m/s/MHz

Tableau II.5 : Paramètres choisis pour étudier la vitesse acoustique.

Pour l'atténuation, un indice d'atténuation a été ajouté (intervalle de fréquence/pas de mesure):

$$I\alpha = \frac{\Delta f}{\Delta R} \tag{II.28}$$

		-
Type de paramètre	Symbole	Unité
Atténuation « classique »	$\alpha_c (f_{o})$	dB/m
Pente de l'atténuation « classique »	$\alpha_{cp}(B)$	dB/m/MHz
Atténuation par « régression »	$\alpha_r(f_o)$	dB/m
Pente de l'atténuation par régression	$\alpha_{rp}(B)$	dB/m/MHz
Indice de l'atténuation	Ια	MHz/cm

Tableau II.6 : Paramètres choisis pour étudier l'atténuation acoustique.

II.4. Version 2 CHARIOT: émetteur avec contact et récepteur sans contact sur chariot. II.4.1 Version 2 : description du système.

L'onde de Rayleigh est toujours générée de manière semblable à la méthode précédente, au moyen d'un transducteur incliné, couplé à un coin en téflon. L'angle d'inclinaison de 42° correspond à l'angle critique de l'onde de cisaillement à l'interface téflon béton. La fréquence centrale de l'onde émise est 0,5 MHz, mais l'atténuation dans le coin et le béton ramènent cette fréquence autour de 0,2 MHz pour le signal reçu.

La nouveauté ici réside dans le choix de travailler avec un transducteur récepteur sans contact afin de limiter les pertes et les erreurs liés au couplage. L'absence de couplage au niveau récepteur élimine en effet en grande partie les problèmes de non-répétivité.

Le récepteur utilisé est un capteur capacitif sans contact (mBAt-1 de Microacoustic Instruments) à large bande passante (40kHz à 2.5MHz). Celui-ci est placé sur un chariot mobile. Il est incliné à un angle critique d'environ 11-12°.

La procédure d'acquisition consiste à enregistrer une série de signaux (profil) dans l'axe de l'émetteur. Une photographie du dispositif de mesure est montrée (fig.II.17).



Figure II.17 : Vue du système CHARIOT d'émission et de réception des ondes de surface.

Les ondes ultrasonores sont générées à l'aide d'un générateur d'onde de type SOFRANEL modèle 5005 FR (photo 1 fig. II.18). Ces ondes sont ensuite visualisées sur un oscilloscope de type TEKTRONIX TDS 3012B (photo 2 fig. II.18) lui-même relié à un ordinateur. Le développement du logiciel d'acquisition des signaux a été développé sous Labview (photo 3 fig. II.18) par Mr Arkadiusz Kosecki. Ce logiciel permet entre autres de visualiser le signal, de suivre la décroissance des pics des signaux enregistrés en fonction de leur éloignement de la source, de moyenner le signal,...



Figure II.18 : Vue d'ensemble et détaillé du matériel nécessaire à l'acquisition des signaux.

II.4.2 Version 2 : paramètres issus du traitement des données.

Des paramètres issus de la version 1, nous avons abandonné la pente issue de la courbe d'atténuation et le paramètre Δf au profit de nouveaux paramètres définis à la suite.

Afin d'augmenter la fiabilité des mesures et en même temps de tester les méthodes ellesmêmes, les paramètres liés à la vitesse sont mesurés en utilisant la méthode de différence de phase et la méthode slant-stack comme le résume la figure II.19.



Figure II.19 : Illustration de la procédure de mesure des paramètres de la vitesse acoustique par deux méthodes.

De plus, avant de commencer le traitement des données, les signaux enregistrés sont visualisés dans leur ensemble afin d'écarter un ou plusieurs signaux mal enregistrés, un pic ou une atténuation importante. Pour cela, dans le programme de chargement des signaux, se trouve une routine permettant d'écarter le(s) signal(ux) incriminé(s) comme le montre la figure II.20.



Figure II.20 : Exemple de visualisation de signaux enregistrés sur le pont OA1202A.

Ensuite après traitement des signaux, le programme donne parmi les fenêtres de calculs disponibles entre autre :

- la vitesse de groupe Vg et son écart-type,
- la vitesse de groupe obtenue par slant-stack,

- le graphe de la vitesse en fonction de la fréquence en y repérant les maximums d'énergie ; avec une option permettant de zoomer autour de la fréquence dominante et par suite obtenir la courbe de dispersion des vitesses (fig. II.21),

- les courbes d'atténuation en prenant le maximum de chaque signal, le maximum de la valeur absolue de la crête du signal positive ou négative, en 1/ \sqrt{r} et en (1/ \sqrt{r}) *e^(- αr) (fig. II.21)

Un exemple de fenêtres de calculs issues du traitement de signaux est donné en exemple à la figure II.21.



Figure II.21 : Exemple de fenêtres de calculs issues du traitement de signaux enregistrés sur le pont OA1202A.

D'autre part, le programme permet d'approcher et d'affiner au mieux le coefficient d'atténuation par rapport à la version 1 (atténuation moyenne en fonction de la fréquence, intervalle de confiance délimitant la zone de fréquence où la cohérence est égale à 1). A l'aide de l'intervalle de confiance, il suffit de rentrer cet intervalle dans la routine du programme et celui-ci trace une courbe des atténuations dans l'intervalle de fréquences choisies et termine par la détermination du coefficient d'atténuation moyen et par régression.

II.4.3 Version 2 : conclusion.

Les signaux « perturbateurs » sont dorénavant éliminés dans le traitement afin de diminuer les risques d'erreur. Cette version 2 diminue énormément la perte d'énergie due au couplage au niveau du transducteur récepteur. D'autre part, le logiciel d'acquisition des signaux permet de gagner un temps considérable et permet d'augmenter le nombre de mesures.

La possibilité de « zoomer » autour de la zone où se situe la fréquence dominante (maximum d'énergie) est très intéressante dans le calcul de la vitesse et du coefficient d'atténuation. Cette version 2 améliore la précision du coefficient d'atténuation.

Les paramètres issus du traitement sont les même que ceux de la version 1 (tableaux II.5 et 6) avec une bien meilleure précision en éliminant la pente issue de la courbe de l'atténuation en fonction de la fréquence et de l'indice I α .

Type de paramètre	Symbole	ole Méthode de mesure	
Vitesse de groupe	V_g^{DF}	Différence de phase	m/s
Pente de la caractéristique de dispersion	${ m V_{phP}}^{ m DF}$	Différence de phase	m/s/MHz
Vitesse de groupe	V_g^{SS}	« Slant Stak »	m/s
Pente de la caractéristique de dispersion	V_{phP}^{SS}	« Slant Stak »	m/s/MHz
Vitesse à la fréquence dominante	V(f=max énergie)	« Slant Stak »	m/s

Tableau II.7 : Paramètres choisis pour étudier la vitesse acoustique.

Type de paramètre	Symbole	Unité
Atténuation « classique »	$lpha_c (f_{o})$	dB/m
Pente de l'atténuation « classique »	$\alpha_{cp}(B)$	dB/m/MHz
Atténuation par « régression »	$\alpha_r(f_o)$	dB/m
Pente de l'atténuation par régression	$\alpha_{rp}(B)$	dB/m/MHz

Tableau II.8 : Paramètres choisis pour étudier l'atténuation acoustique.

II.5. Version 3 ROBOT: émetteur avec contact et récepteur sans contact motorisés. II.5.1 Version 3 : description du système.

Cette nouvelle version du système d'acquisition a été réalisée à l'aide d'un robot motorisé (fig. II.22 et 23) développé par le laboratoire d'acoustique de l'école centrale de Lille par Pawel Safinowski, Arkadiusz Kosecki, Marc Goueygou et Bogdan Piwakowski.



Figure II.22 : Schématisation du robot. [Piwakowski, 2005]

L'onde de Rayleigh est toujours générée et reçue à l'aide d'une paire de transducteurs (fig. II.22), un émetteur associé à un coin de téflon et un récepteur sans contact fonctionnant dans l'air, de fréquence centrale 0,5 MHz et se déplaçant à l'aide d'un bras denté. Le couplage entre l'association émetteur transducteur-coin et la surface du béton se fait par l'intermédiaire d'un gel. Le récepteur mobile sans contact est à une distance minimale de l'échantillon pour éviter de frotter et d'endommager le transducteur.

Le transducteur émetteur est équipé d'un moteur permettant de régler l'angle optimal de génération de l'onde de surface. De même, le transducteur récepteur est équipé de trois moteurs pour régler l'inclinaison optimale, la hauteur minimale et le déplacement pas à pas lors des mesures. Les moteurs sont pilotés par un logiciel qui permet également de visualiser les signaux, de les enregistrer et de suivre l'évolution des signaux au fur et à mesure de l'éloignement de la source.



Figure II.23 : Vue du robot : le transducteur émetteur piloté par le moteur C et le transducteur récepteur piloté par le moteur D.



Figure II.24 : Vue du robot avec les boîtiers de commande des moteurs et du logiciel de pilotage et d'acquisition des signaux.

Ce robot permet de gagner beaucoup de temps et diminue le bruit, en effet l'appareil permet d'augmenter la qualité de l'enregistrement par l'augmentation du nombre de mesures N et par le positionnement du transducteur récepteur lors du déplacement qui se traduit par la réduction de l'erreur de position Δx .





Figure II.25 : Principe de fonctionnement du robot et ses paramètres. [Piwakowski, 2005]

La figure II.25 résume le fonctionnement du robot. Le robot ajuste automatiquement les angles des transducteurs émetteur et récepteur pour obtenir le signal le plus puissant possible (meilleure énergie) et de belle qualité. Ensuite il suffit de rentrer la distance minimale entre les deux transducteurs X_{min} , le pas de mesure Δx , le nombre de points de mesures N et le robot se charge automatiquement du déplacement du transducteur récepteur et de l'enregistrement instantané des signaux.

Afin d'éviter d'endommager le transducteur récepteur lors de du déplacement de celui-ci au cours de mesures, ce transducteur récepteur est précédé d'un petit bras muni d'un rouleau blanc et d'un ressort qui lève celui-ci lorsqu'il rencontre une aspérité (figure II.26).



Figure II.26 : Photo du bras de levier évitant de frotter le récepteur sur l'échantillon.

D'autres photos de cette version 3 du système d'acquisition motorisé sont présentées au chapitre 4 des essais in situ.

II.5.2 Version 3 : paramètres issus du traitement des données.

Les données sont traitées de la même manière que la version 2 précédente à savoir :

- la vitesse de groupe Vg par les méthodes temporelles basées sur le maximum de corrélation entre les signaux reçus et par la méthode fréquentielle,

- la vitesse de phase V_{ph} est obtenue par méthode fréquentielle à partir de la courbe de dispersion de la vitesse de phase obtenue par la transformation p- τ .

Les valeurs du coefficient de l'atténuation α (dB/m) sont obtenues :

- par les méthodes de régression linéaire et non linéaire.

- à partir de la caractéristique fréquentielle du coefficient de l'atténuation $\alpha(f)$.

De plus, les valeurs de vitesse et atténuation sont données pour une fréquence choisie f_o (la même pour tout les points), minimale Fmin, maximale Fmax et centrale Fcentr. Ainsi, chaque point donnera respectivement (tableaux II.9 à 11) :

- 8 valeurs de vitesse V_i (i=1..8),
- 8 valeurs d'atténuation α_i (i=1..8).

.Type de paramètre	Symbole
Fréquence minimale	Fmin
Fréquence maximale	Fmax
Fréquence centrale	Fcentr
Fréquence choisie	Fchoisie

Tableau II.9 : Paramètres choisis pour étudier la fréquence.

Type de paramètre	Symbole	Unité
Vitesse maximale et minimale par régression linéaire + facteur de	V_r_L_min	m/s
corrélation	V_r_L_max	
Vitesse + facteur de corrélation	V_r_L_abs	m/s
Vitesse + facteur de corrélation	V_r_L_corr	m/s
Vitesse moyenne de groupe par slant stack	V_gr_SL	m/s
Vitesse à la fréquence centrale par slant stack	V(f_centrale)SL	m/s
Vitesse à la fréquence choisie par slant stack	V(f_choisie)SL	m/s
Vitesse à la fréquence maximale par slant stack	V(f_max_corr)SL	m/s
Vitesse moyenne de groupe + écartype	V_moy	m/s
Vitesse moyenne + ecartype	V moyen total	m/s
Vitesse + facteur de corrélation Vitesse + facteur de corrélation Vitesse moyenne de groupe par slant stack Vitesse à la fréquence centrale par slant stack Vitesse à la fréquence choisie par slant stack Vitesse à la fréquence maximale par slant stack Vitesse à la fréquence maximale par slant stack Vitesse moyenne de groupe + écartype Vitesse moyenne + ecartype	V_r_L_abs V_r_L_corr V_gr_SL V(f_centrale)SL V(f_choisie)SL V(f_max_corr)SL V_moy V moyen total	m/ m/ m/ m/ m/ m/ m/

Tableau II.10 : Paramètres choisis pour étudier la vitesse acoustique.

	I	
Type de paramètre	Symbole	Unité
Atténuation à la fréquence choisie + écartype	a_moy_(f_choisie)	dB/m
Atténuation à la fréquence centrale	a_moy_(f_centr)	dB/m
Atténuation maximale et minimale par régression linéaire +	a_r_L_min	dB/m
facteur de corrélation	a_r_L_max	
Atténuation + facteur de corrélation	A_r_L_abs	dB/m
Atténuation maximale et minimale par régression non linéaire	a_r_NL_min	dB/m
	a_r_NL_max	
Atténuation par régression non linéaire	a_r_NL_abs	dB/m
Indice d'atténuation	indice_a_dF/dx	
Facteur de qualité	Q	
Atténuation moyenne totale + écartype	alfa tot moy	dB/m

Tableau II.11 : Paramètres choisis pour étudier l'atténuation acoustique.

Le programme affiche tout d'abord tous les signaux (fig.II.27 (a)). Il suffit ensuite de cliquer avec la souris le début et la fin du signal (fenêtre du signal) et ceci pour chaque mesure. Après validation de ces signaux, le programme continue les calculs. Sur une même fenêtre apparaît dans un premier temps les quatre premières valeurs de vitesse parmi les huit (fig.II.27 (b)). On retrouve également l'évolution de la vitesse en fonction de la fréquence avec les mêmes quatre premières valeurs (fig.II.27 (c)).



Figure II.27 : Exemple d'illustration de la dernière version de traitement avec affichage de tous les signaux et des résultats de la vitesse.

Pour l'atténuation, le programme trace l'allure des courbes classiques (en $1/\sqrt{r}$ et en $(1/\sqrt{r})$ * $e^{(-\alpha r)}$ avec $\alpha=25,50,100,200$ et 400), par régression linéaire et non linéaire (fig.II.28).





Figure II.28 : Exemple d'obtention des coefficients d'atténuation avec tracé des courbes.

De plus, la routine du programme permet de choisir la fréquence centrale dominante et de la comparer avec celle obtenue par calcul.

A l'aide du logiciel Excel, il est ensuite facile de tirer la vitesse moyenne de groupe ainsi que l'atténuation moyenne. En effet, le programme enregistre automatiquement les différentes valeurs des paramètres obtenus dans des tableaux ce qui permet de tracer des courbes facilement.

Un exemple de courbes obtenues illustre les possibilités de résultats possibles en vitesse à la figure II.29 et en atténuation à la figure II.30.



Figure II.29 : Exemple de courbes de vitesses. [Piwakowski, 2005]

Avec huit valeurs de vitesse et d'atténuation différentes, théoriquement toutes les valeurs en vitesse ou atténuation devraient être identiques ou assez proches. Et la moyenne et l'ecartype permettent de juger de la précision de la mesure mais aussi d'écarter les valeurs aberrantes. Ainsi en regardant cet exemple de résultats en vitesse, nous pouvons conclure qu'ils sont acceptables au vu du faible écartype.



Figure II.30 : Exemple de courbes d'atténuations. [Piwakowski, 2005]

Par contre pour cet exemple de résultats en atténuation, nous pouvons éliminer les valeurs d'atténuation sur le profil sain car elles ne sont pas fiables au regard de l'écartype très important.

Un exemple d'informations enregistrées est présenté au tableau suivant II.12. Le premier rappelle la date et le lieu des essais, l'échantillon testé ainsi que la géométrie des transducteurs au départ et le pas utilisé.

Site	objet_testé	Zone	Signal	=======	x0_(mm)	dx_(mm)
Saint_Remy-28-10-2004	421-supplement	Zone1	profil1	========	110,4	5
Saint_Remy-28-10-2004	421-supplement	Zone1	profil2		110,4	5
Saint_Remy-28-10-2004	421-supplement	Zone1	profil3	=======	110,4	5
Saint_Remy-28-10-2004	421	Zone1	profil4	=======	110,4	5
Saint_Remy-28-10-2004	421	Zone1	profil5	========	110,4	5
Saint_Remy-28-10-2004	421	Zone1	profil6	========	110,4	5
	dx_(mm)	nsig	No_sig_min	No_sig_max	xmin_(mm)	xmax_(mm)
Profil1	5	15	1	15	11	18
Profil2	5	15	2	13	11,5	17
Profil3	5	15	1	15	11	18
Profil4	5	15	1	15	11	18
Profil5	5	15	6	11	13,5	16
Profil6	5	15	1	15	11	18

Tableau II.12 : Exemple d'informations et de géométrie de mesures automatiquement

enregistrées sous Excel. [Piwakowski, 2005]

II.5.3 Version 3 : conclusion.

Cette version présente les avantages suivants :

- un gain de temps énorme : réalisation des mesures dix fois plus rapide,

- le positionnement des émetteur et récepteur très précis,

- l'augmentation du nombre de points de mesures : amélioration de la précision, de la qualité des essais et traitement statistiques,

- une méthode « multi-approche » d'analyse des paramètres vitesse et atténuation pour en donner une bonne précision par l'écartype,

- un programme convivial et clair de mesures et de traitements,

- un enregistrement automatique.

Le programme enregistre automatiquement l'ensemble des paramètres acoustiques sous forme de tableaux sous Excel et résume dans un petit tableau les principales données qui sont :

- la vitesse moyenne totale et son écartype,
- l'atténuation totale moyenne et son écartype,
- l'atténuation à la fréquence centrale,
- la fréquence choisie,
- la longueur d'onde,
- le facteur de qualité.

<u>II.6. Version 4 ROBOT SANS CONTACT : émetteur et récepteur sans contact motorisés .</u> <u>II.6.1 Version 4 : description du système et paramètres.</u>

Cette version est la dernière en cours de réalisation qui permet de s'affranchir du couplage au transducteur émetteur. Une photo (a) de la figure II.31 présente la version au stade actuel. De plus, il n'y a plus besoin de couplant pour lier le transducteur émetteur au coin de téflon. Un moteur permet d'incliner le transducteur émetteur sans contact à l'angle idéal permettant un signal fort avec un maximum d'énergie (fig. II.31 (b)). Ainsi, même sur les surfaces les plus poreuses, il n'y aura pas de risque de « mouiller » l'échantillon en surface.

Dans la version actuelle en cours de test, il est même possible de réaliser les mesures avec le transducteur émetteur avec contact inclinable automatiquement et le transducteur émetteur sans contact inclinable manuellement.

Le transducteur émetteur sans contact peut aussi bien se placer à l'intérieur du châssis du robot ou à l'extérieur (fig. II.31 (d)). Le transducteur récepteur peut aussi bien pivoter à droite et à gauche en fonction de l'emplacement de l'émetteur (fig. II.31 (c)).

Le boîtier de commande des moteurs est relié au robot par des câbles. Le robot est lui-même piloté par un logiciel qui permet de tester les moteurs, de paramétrer les mesures, de suivre et d'enregistrer les mesures.



Figure II.31 : Version 4 du Robot sans contact : (a) vue générale du robot (b) transducteur émetteur avec contact motorisé (c) transducteur récepteur sans contact motorisé tteur sans contact inclinable manuellement (motori

(d) transducteur émetteur sans contact inclinable manuellement (motorisé quand il est monté sur le châssis du robot).

Les paramètres issus du traitement des données sont les même que ceux de la version 3.

II.6.2 Version 4 : conclusion et perspectives.

Le travail sans contact permet d'éviter la modification des paramètres du béton par le gel et permet de gagner encore du temps.



Figure II.32 : Procédure par inversion de l'estimation de l'épaisseur de la couche dégradée. [Piwakowski, 2005]

A partir des caractéristiques de la vitesse et de l'atténuation, il est possible de tracer les courbes de vitesse et atténuation en fonction de la longueur d'onde. La phase suivante en cours d'étude est par inversion de remonter à l'épaisseur de la couche dégradée, aux paramètres mécaniques et voir la porosité par le tracé de ces mêmes courbes en fonction de la profondeur.

II.7. Conclusion.

Ce chapitre nous a permis de distinguer les différents systèmes de mesure ainsi que les paramètres acoustiques issus des traitements. Ce qui constitue les outils qui seront exploités dans les chapitres suivants concernant les essais en laboratoire et sur site.

Les programmes utilisés pour l'estimation des paramètres acoustiques ont été testés, validés et étalonnés en utilisant des simulations numériques. D'autre part, la formulation analytique de la mesure de l'atténuation nous a permis d'évaluer l'effet de l'emplacement du transducteur émetteur vis-à-vis du transducteur récepteur (champ proche ou champ lointain,...).
Les méthodes de mesure de la vitesse montrent que la méthode Slant Stack permet une détermination précise de la caractéristique de la dispersion. L'exploitation de l'atténuation et de la caractéristique de dispersion des ondes de surface ainsi que l'extension de la zone fréquentielle d'investigation vers les fréquences plus élevées présente une certaine originalité. La dernière version de traitement des données permet de conclure avec huit valeurs de vitesse et d'atténuation.

D'autre part, le dernier dispositif acoustique à savoir le robot émetteur-récepteur sans contact est adapté à nos types de mesure de caractérisation de la couche dégradée ce qui permettra :

- de gagner énormément de temps lors des essais,
- de répéter les mesures sur une même zone,
- de s'affranchir de la perte d'énergie due au couplage,
- d'augmenter la précision des mesures.

Nous sommes passés au début de la thèse d'un système manuel de mesures à un système entièrement automatisé à la fin de la thèse.

CHAPITRE 3 : Essais sur des corps d'épreuve de laboratoire

<u>III.1. Introduction.</u> <u>III.1.1. Objectifs.</u>

Le béton d'enrobage assure la protection des éléments de structure et notamment des armatures du béton armé. Son état de dégradation est donc un indicateur général de l'état de l'ouvrage. Comme nous l'avons signalé précédemment, l'utilisation du mode de propagation surfacique est le mieux adaptée pour l'inspection de la peau du béton.

Dans ce chapitre, nous réaliserons une étude de sensibilité de la méthode acoustique vis à vis de paramètres de dégradation identifiés et contrôlés, en s'affranchissant ou en maîtrisant certains effets parasites comme les effets de bords ou la présence des armatures. Ainsi, nous pourrons définir la sensibilité de la méthode acoustique vis à vis des différentes dégradations. La technique devrait alors être plus facilement exploitable sur site pour analyser les différents types de dégradation.

III.1.2 Présentation des pathologies choisies pour les corps d'épreuve de laboratoire.

Nous avons retenu des paramètres essentiels en accord avec les gestionnaires ou les experts qui participent au projet.

Ces paramètres sont :

- la fissuration d'origine mécanique,
- la teneur en eau,
- la contamination par les chlorures,
- la carbonatation.

III.2. Présentation générale des corps d'épreuve de laboratoire.

Les dalles de dimension 60x60x12 cm constituent la majorité des corps d'épreuve réalisés. Cette géométrie a été retenue pour limiter au maximum les effets de bord pour toutes les techniques. La présence du ferraillage pouvant perturber la mesure sur ouvrages, ce paramètre a été intégré pour les études de sensibilité. Par conséquent pour toutes les conditions de dégradation retenues (hors mécanique pour laquelle toutes les dalles sont armées) on dispose d'une dalle sans ferraillage et d'une dalle avec ferraillage. Le ferraillage est composé de 4 barres HA12 espacées de 12,5 cm avec un enrobage de 2,5 cm. Pour la réalisation des dalles, trois compositions de béton ont été retenues, un B25, un B40 et un B60. La mise en œuvre d'un B60 a été motivée par le nombre de plus en plus important d'ouvrages réalisés en BHP. Les corps d'épreuve, fabriqués au LERM et au LMDC, ont ensuite été répartis sur les sites des différentes équipes (Toulouse, Lille, Bordeaux, Nantes et Arles).

III.2.1. Dalles non altérées

Deux dalles témoin (avec et sans ferraillage) non altérées et placées en condition de vieillissement naturel sont mises à la disposition de chaque équipe. Elles servent principalement pour le recalage des techniques, et pour la prise en compte des biais comme par exemple la présence des armatures.

III.2.2. Dalles dégradées.

Deux types de dégradations sont mis en œuvre sur ces dalles, sur deux sites où auront lieu les essais croisés :

- au LMDC de Toulouse : paramètres de dégradations chimiques (carbonatation, pénétration de chlorures, variation de la teneur en eau),

- au LML de Lille : fissuration d'origine mécanique.

III.2.3. Répartition des corps d'épreuve.

Les corps d'épreuve sont classés suivant quatre grandes séries :

- série A : variation de la teneur en eau et corps d'épreuve témoins destinés à être conservés dans l'ambiance du laboratoire.,
- série B : contamination par les chlorures,
- série C : carbonatation accélérée,
- série D : fissuration d'origine mécanique.

Pour les séries A, B et C, nous disposons de deux dalles, une ferraillée et l'autre non.

La répartition des corps d'épreuve au sein des différentes équipes est présentée en annexe au tableau 1. Les corps d'épreuve représentent un total de 64 dalles : 35 B25, 18 B40 et 11 B60.

III.3. Composition des bétons.

Les bétons ont été réalisés avec les matériaux locaux des deux sites de fabrication. Les trois formulations sont des formulations de chantier.

Constituant	Dosage
Ciment CEM I 52.5 (Beaucaire) (kg/m ³)	320
Sable $0/4$ (kg/m ³)	754
Gravillon 6.3/16 (kg/m ³)	1019
$E_{efficace} (kg/m^3)$	195
$\rm E_{eff}/C$	0,61
G/S	1,35

Tableau III.1 : Formulation du béton B25 [RGC&U, 2003].

Constituant	Dosage
Ciment CEM I 52.5 (Martres) (kg/m ³)	385
Sable 0/4 Roulé (kg/m ³)	660
Gravillon 4/10 Roulé (kg/m ³)	415
Gravillon 10/20 Roulé (kg/m ³)	750
$E_{efficace} (kg/m^3)$	185
$\rm E_{eff}/C$	0,48
G/S	1,77

Tableau III.2 : Formulation du béton B40 [RGC&U, 2003].

Constituant	Dosage
Ciment CEM I 52.5 (Beaucaire) (kg/m ³)	400
Sable 0/4 (kg/m ³)	778
Gravillon 6.3/16 (kg/m ³)	1052
$E_{efficace} (kg/m^3)$	142
Adjuvant Adagio 2018 (kg/m ³)	7,2
E _{eff} /C	0,36
G/S	1,35

Tableau III.3 : Formulation du béton B60 [RGC&U, 2003].

III.4. Fabrication et caractérisation des corps d'épreuve.III.4.1. Conditions de cure et fabrication.

Deux sites de fabrication ont été retenus :

- le LMDC de Toulouse pour les dalles B40,

- le LERM en Arles pour les dalles B25 et B60.

Au LERM avec chaque gâchée, une dalle et trois éprouvettes de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm (16-32) pour la mesure de la résistance en compression à 28 jours ont été fabriquées.

Au LMDC pour chaque gâchée, deux dalles et trois éprouvettes 16-32 ont été fabriquées. La mesure systématique de la résistance à 28 jours est destinée à vérifier l'homogénéité des bétons fabriqués.

Après 2 jours de cure (protection contre la dessiccation), les dalles sont conservées en ambiance de laboratoire jusqu'à 28 jours minimum, date à laquelle les dalles ont été amenées sur les sites.

Les dalles sont référencées comme suit :

Série (tableau III.1) - Ville de destination (Toulouse, Lille, Nantes, Bordeaux, Arles) - classe du béton (B25, B40, B60)- n° d'ordre

Exemple :

A2 – B (Bordeaux) – B25 – 1

III.4.2. Caractérisation des bétons à l'état frais.

Le tableau III.5 donne les moyennes pour chaque gâchée des valeurs de l'affaissement, de la teneur en air occlus et de la masse volumique du béton frais.

Béton	Affaissement moyen	Teneur en air occlus	Masse volumique
	au cône d'Abrams	moyenne	moyenne du béton frais
	(cm)	(%)	(t/m3)
B25	19,0	1,3	2,34
B40	9,9	1,3	2,40
B60	22,9	1,0	2,43

Tableau III.4 : Caractérisation des bétons à l'état frais [RGC&U, 2003].

III.4.3. Résistances en compression à 28 jours.

Le tableau III.6 donne la moyenne des résistances pour chaque gâchée en compression sur 3 éprouvettes 16x32 après 28 jours de conservation dans l'eau.

Béton	Résistance moyenne en compression à 28 jours (MPa)	Ecart Type (MPa)	Dispersion (%)	Nombre de Gâchées
B25	31,8	2,4	7,4	35
B40	35,1	0,7	1,9	9
B60	70,7	6,9	9,7	11

Tableau III.5 : Résistance en compression à 28 jours [RGC&U, 2003].

III.4.4. Caractérisation physique à 28 et 90 jours.

Les propriétés physiques du béton sont caractérisées directement sur des dalles prévues à cet effet conservées en ambiance de laboratoire. Les caractérisations sont réalisées sur cinq échantillons prélevés par carottage sur la hauteur de la dalle. Deux échéances ont été prévues, 28 et 90 jours.

Sont caractérisées (tableaux III.6 à III.8) :

- la teneur en eau libre,
- la porosité ouverte accessible à l'eau,
- la perméabilité à l'oxygène,
- la répartition porométrique par intrusion de mercure (non disponible).

	B2	:5	B	60		B	40
Profondeur de carottage (cm)	28 ј	90 j	28 ј	90 j	Profondeur de carottage (cm)	28 j	90 j
0-2	6,4	5,4	4,7	3,8	1,2	5,8	3,7
2-4	5,5	5,2	4,2	3,8	3,6	5,2	3,7
4-6	5,5	5,3	4,5	3,9	6,0	5,3	3,8
6-8	5,6	5,0	4,3	4,0	8,4	5,4	3,5
8-10	5,4	4,9	4,3	4,0	10,8	4,5	2,8
10-12	5,1	4,5	3,7	3,5			

Tableau III.6: Résultats de mesures de teneur en eau libre (séchage à 105°C)

[RGC&U, 2003].

	B25		B60			B	40
Profondeur de carottage (cm)	28 ј	90 j	28 ј	90 j	Profondeur de carottage (cm)	28 ј	90 j
0-2	19,0	16,6	12,8	10,4	1,2	18,8	15,1
2-4	16,0	15,8	11,0	9,6	3,6	15,4	14,2
4-6	15,2	15,7	11,4	9,7	6,0	16,0	14,1
6-8	15,6	15,1	11,0	10,2	8,4	14,7	13,9
8-10	15,4	15,3	11,0	10,3	10,8	13,9	12,8
10-12	15,7	15,5	10,2	10,3			

Tableau III.7 : Résultats de mesures de porosité accessible à l'eau (séchage à 105°C)

[RGC&U, 2003].

		Âge : 28	3 jours	Âge : 90 jours		
Type béton	Profondeur	Séchage	Taux de saturation (%)	Perméabilité (m ²)	Taux de saturation (%)	Perméabilité (m ²)
	1-6		10.3	1,5 10 ⁻¹⁷	16,2	1,1 10 ⁻¹⁷
	3,5-8,5	6 jours à 80°C	9,3	1,2 10 ⁻¹⁷	17,1	1,1 10 ⁻¹⁷
	6-11	00 0	9,4	1,2 10 ⁻¹⁷	16,3	1,2 10 ⁻¹⁷
	1-6		3,1	1,8 10 ⁻¹⁷	4,9	1,3 10 ⁻¹⁷
B25	3,5-8,5	26 jours à 80°C	3,5	1,3 10 ⁻¹⁷	5,4	1,3 10 ⁻¹⁷
	6-11	00 0	3,4	1,4 10 ⁻¹⁷	5,1	1,5 10 ⁻¹⁷
	1-6	105 °C	0,0	2,3 10 ⁻¹⁷	0,0	1,8 10 ⁻¹⁷
	3,5-8,5		0,0	1,7 10 ⁻¹⁷	0,0	2,0 10 ⁻¹⁷
	6-11		0,0	1,7 10 ⁻¹⁷	0,0	1,9 10 ⁻¹⁷
	1-6		28,4	1,2 10 ⁻¹⁸	35,2	1,2 10 ⁻¹⁸
	3,5-8,5	6 jours à 80°C	36,0	9,0 10 ⁻¹⁹	39,7	9,8 10 ⁻¹⁹
	6-11		38,3	8,1 10 ⁻¹⁹	33,8	1,2 10 ⁻¹⁸
	1-6		6,0	2,5 10 ⁻¹⁸	7,8	3,1 10 ⁻¹⁸
B60	3,5-8,5	26 jours à 80°C	5,2	2,8 10 ⁻¹⁸	7,9	2,5 10 ⁻¹⁸
	6-11		5,8	2,4 10 ⁻¹⁸	6,8	1,6 10 ⁻¹⁸
	1-6		0,0	3,8 10 ⁻¹⁸	0,0	4,8 10 ⁻¹⁸
	3,5-8,5	105 °C	0,0	4,4 10 ⁻¹⁸	0,0	4,0 10 ⁻¹⁸
	6-11		0,0	3,5 10 ⁻¹⁸	0,0	3,9 10 ⁻¹⁸

Tableau III.8 : Résultats de mesures de	perméabilité à l'oxygène [RGC&U, 2	2003]
---	------------------------------------	-------

III.5. Procédure de fissuration.

Pour chaque béton, une dalle est mise à part pour servir de référence. L'autre dalle est soumise à une flexion 3 points au moyen d'un montage comprenant un système de serrage par tige filetée et un appui central.

Le montage initial (fig. III.1) devait permettre de charger simultanément deux dalles de même composition et d'amorcer l'ouverture d'une fissure principale, perpendiculaire aux armatures, à peu près au milieu de la dalle. Mais des premiers tests préliminaires ont montré que dés qu'une dalle se fissurait, sa fissure continuait à s'ouvrir et l'autre dalle ne se fissurait pas ou peu. Le montage final (fig. III.2) permet de charger une seule dalle à la fois mais la fissuration est mieux contrôlée.



Figure III.1 : Vue du montage initial du bâti de chargement.



Figure III.2 : Vue du montage final du bâti de chargement.

Trois niveaux d'ouvertures sont fixés par un serrage progressif des boulons, correspondant à 50%, 80% et 110% de l'état limite de service (ELS). Dans la suite, nous désignerons ces trois niveaux par 1, 2 et 3, et l'état non fissuré par 0. Notons que pour la dalle B60, la rigidité du bâti s'est avérée insuffisante, de sorte que le niveau de fissuration 3 n'a pu être atteint.

Les largeurs des fissures sont mesurées en surface à l'aide d'une loupe. Etant donné la difficulté de reproduire un même état de fissuration sur plusieurs dalles, toutes les techniques non destructives développées dans le cadre du projet RGCU ont été mises en œuvre simultanément sur chaque corps d'épreuve. Certaines techniques nécessitent un mouillage ou l'application d'un gel de couplage susceptibles de modifier l'état de surface, ce qui peut s'avérer gênant pour les autres techniques. Pour pallier cet inconvénient, chaque dalle est divisée en 3 zones correspondant à l'espace entre deux armatures (fig. III.3), celles-ci ayant été repérées au préalable au moyen du radar. La zone 2 (au centre de la dalle) a été auscultée par notre technique acoustique ultrasonore à haute fréquence.



Figure III.3 : Zone de mesure des profils acoustiques.

III.6. Procédure des dégradations physico-chimiques. III.6.1 Variation de la teneur en eau [RGC&U, 2003].

Elle concerne les dalles de la série A :

- A1 (sans armatures) : 6 dalles B25 et 4 dalles B40,
- A4 (avec armatures) : 2 dalles B25.

Les degrés de saturation ont été fixés comme suit :

- dalles A1-T-B25-1 à 6 : 0, 10, 30, 50, 70 et 90 %,
- dalles A1-T-B40-1 à 4 : 20, 40, 60 et 80 %,
- dalles A4-T-B25-1 et 2 : 40 et 80 %.

La procédure de conditionnement des dalles est la suivante (fig.III.4) :

- saturation jusqu'à masse constante,
- pesée,
- séchage à 80°C jusqu'à masse constante,
- imprégnation jusqu'à obtention du degré de saturation souhaité,
- imperméabilisation des faces par application de papier aluminium auto-adhésif,
- étuvage à 80°C pendant 2 mois pour homogénéisation du volume d'eau.



Figure III.4 : Conditionnement des dalles [RGC&U, 2003].

Comme pour les essais croisés précédents, trois zones de mesures seront délimitées sur la surface des dalles et affectées à chaque technique. Les essais croisés seront réalisés en aveugle sur des corps d'épreuve anonymes.

III.6.2 Variation de la teneur en chlorures [RGC&U, 2003].

Elle concerne les dalles de la série B :

- B1 (sans armatures) : 5 dalles B25,

- B2 (avec armatures) : 2 dalles B25.

Les dalles sont conditionnées à divers degrés de saturation dans une solution à 30g/l de NaCl. Les teneurs volumique en solution de NaCl ont été fixés comme suit :

- 5 dalles B1-T-B25-1 : 4, 6, 8, 12 et 14%,

- 2 dalles B2-T-B25-1 : 6 et 11 %.

La procédure de conditionnement est la suivante :

- saturation en eau jusqu'à masse constante,
- pesée,
- séchage à 80°C jusqu'à masse constante,
- imperméabilisation des faces par application de papier aluminium auto-adhésif,
- absorption de la solution à 30 g/l de NaCl jusqu'à obtention du volume souhaité,
- imperméabilisation complète du corps d'épreuve,
- conservation de l'échantillon imperméabilisé pendant 1 mois avant les mesures.

III.6.3 Variation de la profondeur carbonatée [RGC&U, 2003].

La carbonatation est accélérée dans une enceinte contenant 50% de CO_2 et 50% d'air. L'hygrométrie de l'enceinte est fixée à 70% d'humidité relative (HR).

Elle concerne les dalles de la série C :

- C1-T-B25-1 (sans ferraillage) : 1 dalle B25,

- C2-T-B25-2 (avec ferraillage) : 1 dalle B25.

La profondeur carbonatée sera mesurée à chaque échéance, par carottage directement sur les corps d'épreuve. Les dalles ont été découpées en quatre afin de les faire tenir dans l'enceinte.

III.7. Protocole des mesures sur les dalles fissurées mécaniquement.

L'objectif est d'évaluer la capacité de la technique ultrasonore haute fréquence à détecter et à caractériser un endommagement mécanique, et plus précisément la fissuration du béton. Les critères d'évaluation portent sur la capacité :

- à distinguer les différents types de béton,
- à détecter la présence de fissures,
- à localiser ces fissures,
- à distinguer les différents degrés de fissuration (ouverture des fissures),
- à estimer la profondeur de fissuration.

III.7.1 Système de mesures.

L'onde de surface est générée par le système de la version 2 CHARIOT à savoir le transducteur émetteur avec contact et le récepteur sans contact mobile sur un chariot présenté au paragraphe II.4 du chapitre 2.

III.7.2 Organisation des mesures.

La dalle est de longueur 60cm. Au bord supérieur et inférieur de la dalle se trouvent les deux profilés métalliques (de largueur 7cm) nécessaires à la fissuration de la dalle. Il reste alors une zone d'environ 46cm pour les mesures. La première position de l'émetteur est à 14cm du bord de la dalle, ceci en tenant compte de l'encombrement du coin, du transducteur émetteur et du câblage. La première position du récepteur est à 2cm pour éviter les phénomènes de champ proche et de propagation d'onde dans l'air.

Pour chaque profil de mesure, l'émetteur est fixe et le signal reçu est enregistré tous les 0,5 cm, sur à peu près 10 à 15 cm dans la plupart des cas. Il a même été possible de réaliser des profils de 18 à 20 cm, notamment pour les dalles B25 et B60 à l'état sain.

L'émetteur est déplacé de 7 cm et l'on enregistre un nouveau profil. L'acquisition de 4 profils permet de couvrir presque toute la longueur de la dalle. Un exemple de feuille de notes est présenté en annexe III.1.

III.7.3 Organisation du chargement des dalles.

Trois niveaux d'ouverture de fissure ont été fixés par un serrage progressif des boulons, correspondant à des charges de 50%, 80% et 110% de l'état limite de service (ELS). Cela se traduit par les ouvertures de fissure suivantes mesurées à l'aide d'un fissuromètre.

		Niveau de fissuration				
		Fissuration 1Fissuration 2Fissuration				
ton	B25	0.1 mm	0.4 mm	1.2 mm		
e de bé	B40	0.08 mm	0.3 mm	0.8 mm		
Typ	B60	0.09 mm	0.8 mm	-		

Tableau III.9 : Ouvertures des fissures à chaque niveau de chargement.

III.7.4 Méthode de localisation des fissures.

Un traitement original développé par Mr Piwakowski est appliqué pour repérer automatiquement la position des fissures. Il s'agit de repérer les discontinuités de l'amplitude de l'onde reçue en fonction de la distance source-récepteur (fig. III.6). Nous ne tenons pas compte des premiers points de réception (fig. III.6 (b)) où la crête du signal est proche de la courbe rouge sans atténuation.

Pour cela, on calcule la différence en valeur absolue entre la courbe d'amplitude normalisée de l'onde reçue A(x) et une courbe de référence $A_{ref}(x)$ d'équation :

$$A_{\text{ref}}(\mathbf{x}) = e^{-\alpha_{\text{ref}} \mathbf{x}} / \sqrt{\mathbf{x}} \qquad (\text{III} . 1)$$

où α_{ref} est l'atténuation mesurée à l'état non fissurée de la dalle (fig. III.6 (b)).

Puis, on calcule la dérivée F(x) de cette différence par rapport à la distance.

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \frac{d}{dx} |\mathbf{A}(\mathbf{x}) - \mathbf{A}_{\text{ref}}(\mathbf{x})| \qquad (\text{III} . 2)$$

Le graphe obtenu présente des pics à l'endroit où des fissures sont présentes (fig. III.6 (c)).

Le mode de balayage utilisé permet de distinguer trois modes :

- Scan-A : le signal est enregistré en un seul point,

- Scan-B : plusieurs signaux sont enregistrés suivant une ligne (points alignés),

- Scan-C : plusieurs signaux enregistrés dans deux directions perpendiculaires pour visualiser les dimensions latérales d'un (des) objet(s).

La zone de mesure est illustrée à la figure III.3 du paragraphe III.5.



Figure III.5 : Exemple de Scan-B : a) profil sans fissure et b) profil avec fissure.



Figure III.6 (a) et (b) : Procédure de localisation automatique de fissure : a) scan-B des signaux reçus,

b) en bleu : valeur crête du signal reçu en fonction de la position du récepteur A(x), En noir : valeur absolue du maximum de la crête du signal reçu, En rouge : courbe sans atténuation, En vert : courbe de référence avec atténuation A_{ref}(x).



Figure III.6 (c) : Procédure de localisation automatique de fissure : c) F(x) dérivée de la fonction précédente : une fissure est repérée autour de la position 6.

III.8. Résultats des mesures sur les dalles fissurées.

Les paramètres issus du traitement sont ceux de la version 2 : tableaux II.7 et 8 du paragraphe II.4.3 du chapitre 2 et plus particulièrement :

Type de paramètre	Symbole	Unité
Vitesse de groupe par Slant Stack	V_g^{SS}	m/s
Atténuation « classique »	$lpha_c (f_{o})$	dB/m

Tableau III.10 : Paramètres acoustiques choisis pour l'étude.

III.8.1 Vitesse.

Nous commençons par regarder la capacité de la méthode acoustique à faire la distinction entre les différents types de béton à l'aide des vitesses sur les quatre profils en l'absence de fissuration.

Vitesses (m/s)	B25	B40	B60
Profil 1	2272	2339	2598
Profil 2	2303	2330	2580
Profil 3	2271	2318	2571
Profil 4	2256	2373	2581

Tableau III.11 : Vitesses obtenues sur les différentes dalles à l'état sain.



Figure III.7 : Evolution de la vitesse en fonction des profils à l'état sain.

La figure III.7 montre les vitesses mesurées sur les quatre profils pour chaque type de dalle. Nous distinguons nettement la dalle B60 des deux autres par des valeurs de vitesse plus élevées. Les vitesses doivent normalement permettre de classer les bétons du moins résistant B25 (vitesses les plus petites) au plus résistant B60 (vitesse les plus élevées). Nous remarquons que les valeurs de vitesse mesurées sur la dalle B40 sont un peu plus dispersées. Il convient de rappeler que le béton B40 utilise deux classes de graviers dont un 10/20, qui pourrait expliquer ces dispersions. Regardons maintenant les valeurs de vitesse en fonction du stade de fissuration.





La figure III.8 montre l'évolution de la vitesse en fonction du stade de la fissuration. Les valeurs présentées correspondent à une moyenne sur les quatre profils. Nous observons une diminution de la vitesse pour tous les types de béton avec la fissuration. Cette diminution de la vitesse notamment au stade 2 et 3 serait plus accentuée en l'absence de présence de gel issue des mesures précédentes au stade 1.

Dés le premier stade de fissuration, la dalle B60 présente une chute importante de la vitesse alors que les deux autres dalles présentent une chute modérée. Ceci est un résultat très encourageant pour les mesures futures puisqu'il serait très intéressant de travailler avec des transducteurs sans contact afin d'éliminer les problèmes de couplage et donc de changement de l'aspect du béton à la surface. De plus, on pourra mettre en évidence la profondeur et l'ouverture de la fissure.



III.8.2 Atténuation.

Figure III.9 : Evolution de l'atténuation en fonction des profils à l'état sain

En l'absence de fissuration (état sain), la dalle B40 présente la plus forte atténuation (à cause de la taille des granulats) et présente des valeurs de vitesses plus dispersées. La dalle B60 présente l'atténuation la plus faible. Normalement, nous devrions avoir l'atténuation qui diminue (atténuations les plus petites) en fonction de l'augmentation de la classe de résistance (augmentation de la résistance du béton).Nous remarquons également que les valeurs d'atténuation sur la dalle B25 et B40 sont très variables d'un profil à l'autre.

Coefficient d'atténuation (dB/m)	Sain	Fissuration 1	Fissuration 2	Fissuration 3
B25	41	330	442	490
B40	164	231	322	416
B60	20	278	317	/

Intéressons nous maintenant à l'évolution de l'atténuation en fonction du stade de fissuration.

 Tableau III.12 : Atténuations moyennes obtenues sur les différentes dalles à l'état sain et aux



trois stades de fissuration.

Figure III.10 : Evolution de l'atténuation en fonction des stades de fissuration.

La figure III.10 montre l'évolution de l'atténuation en fonction de la fissuration. Les valeurs présentées correspondent à une moyenne sur les quatre profils. Nous observons une augmentation très sensible et monotone de l'atténuation pour tous les types de béton avec la fissuration. Dés le premier stade de fissuration, la dalle B25 devient la plus atténuante, alors que les deux autres dalles ont des atténuations comparables. Cela peut s'expliquer par le fait qu'à l'état sain, l'atténuation est sensible à l'hétérogénéité du matériau, et c'est précisément la dalle B40 qui est la plus hétérogène. Ensuite, l'atténuation devient sensible à la fissuration du matériau. Or la dalle B25, ayant la résistance mécanique la plus faible, présente aussi la fissuration la plus importante à un état donné.

III.8.3 Localisation des fissures.

La figure III.6 (c) résume un résultat du traitement visant à localiser les fissures. La présence d'une fissure est repérée par un pic dont l'amplitude traduit la chute de transmission liée à l'ouverture de la fissure. L'axe des abscisses indique soit la position du récepteur soit la distance par rapport au bord de la dalle.

Nous allons présenter les résultats détaillés pour la dalle B25 et les résultats finaux pour les dalles B40 et B60.

III.8.3.1 Dalle B25.

Le profil 1 n'est pas présenté car il ne recouvre aucune fissure. Les fissures sont apparues dans les zones couvertes par les profils 2, 3 et 4.

Les figures suivantes présentent l'analyse aux trois stades de fissuration.

Dans un premier temps, il faut regarder le Scan-B (fig. III.11). Sur celui-ci, un commentaire apporte des précisions :

- sur la où les fissure(s) visible(s) à l'œil nu,

- sur la position du récepteur où se situe la ou les fissure(s), position donnée au cours de l'enregistrement du signal par une chute de son amplitude.

Cette précision se retrouve ensuite après traitement à l'aide du logiciel Matlab sur les courbes d'atténuation. Quand une fissure apparaît, elle se distingue immédiatement par une augmentation de l'atténuation. La méthode de localisation présentée au paragraphe III.7.4 de ce chapitre donne la localisation de fissures.

Le premier stade de fissuration (courbe noire) nous montre la présence de trois fissures (points 4, 9 et 15 correspondants à des pics de 0,2, 0,5 et 0,8) alors qu'à l'œil nu une seule fissure était visible au point 16.

Quand la fissuration augmente (stade2), la fissure détectée au point 9 (pic de 0,5) devient visible (courbe verte), mais se retrouve au point 6-7 (pic de 1,3), décalage de point dû au décalage de l'émetteur et du récepteur de quelques millimètres. Cette fissure a une ouverture importante (pic de 1,3) pour atténuer le signal et empêcher de distinguer la fissure qui se trouve juste derrière au point 16 (pic proche de 0).



Figure III.11 : Localisation de fissures sur le profil 2.

En augmentant la fissuration (stade 3), c'est la fissure détectée au point 4 (pic de 0,2 au 1^{er} stade sur la courbe noire) qui devient la plus dominante (pic de 1,1 sur courbe rouge point 3-4) et atténue fortement le signal, faisant que les fissures se trouvant derrière deviennent masquées.

Notons que ce traitement des mesures permet de détecter des fissures avant même qu'elles ne soient visibles à l'œil nu. Intéressons nous maintenant au profil 3.



Figure III.12 : Localisation de fissures sur le profil 3.

Le profil 3 (fig. III.12) au premier stade de fissuration (courbe noire) montre une fissuration importante (pic de 1,5) avec une ouverture de 0.1mm dés les premiers points de réception. Pour bien mettre en évidence cette fissure, aux stades suivants, l'émetteur et le récepteur sont décalés de 3cm. La fissure présente au premier stade (point 2-3) se retrouve alors au point 7-8.

Ainsi, au stade2 (courbe verte), deux fissures apparaissent : une visible à l'œil nu au point 7 (pic de 0,4) (ouverture de 0.4mm) et une autre invisible au point 10 (pic de 0,4). Mais un problème de couplage n'a pas permis de mettre en évidence les fissures du stade 2. Au stade 3 (courbe rouge), la première fissure visible à l'œil nu devient si importante (pic de 1,5) avec une ouverture de 1.2mm qu'elle masque complètement la possibilité de détecter la fissure suivante invisible au point 10. Encore une fois, il a été possible de détecter une fissure invisible à l'œil nu. Intéressons-nous maintenant au profil 4.



Figure III.13 : Localisation de fissures sur le profil 4.

Aucune fissure sur le profil 4 (fig. III.13) au premier stade de fissuration n'est visible à l'œil nu. Par contre le traitement nous signale la présence de plusieurs fissures : points 3-4 (pic de 0,2), 6 (pic de 0,3), 9-10 (pic de 0,14)et 13 (pic de 0,1). Au stade 2 de fissuration, la première fissure devient visible à l'œil nu mais est tellement importante (pic de 0,9) qu'elle masque les fissures se trouvant derrière. Il en est de même pour le stade 3 (pic de 1,3). Par contre ici, nous ne pouvions pas décaler l'émetteur et le récepteur car l'émetteur se serait alors retrouvé sur une fissure.

La figure III.14 résume l'ensemble des fissures obtenues sur les trois profils.



Figure III.14 : Dalle B25 : localisation des fissures 1,2 et 3 sur la dalle et sur le graphe en fonction de des profils aux trois stades de fissuration.

Regardons maintenant la dalle B40.

III.8.3.2 Dalle B40.

Le profil 1 n'est pas présenté comme précédemment. Les fissures sont apparues dans les zones couvertes par les profils 2, 3 et 4. Les résultats détaillés sont présentés de la même manière, et par souci de clarté et de volume les figures se trouvent en Annexe III.2 à 4. Les signaux sont plus « bruités » que sur la dalle B25. Ceci est dû à la taille des granulats. Cette grande dimension des granulats se traduit aussi par une augmentation importante du signal quand le(s) granulat(s) se trouve(nt) près de la surface. En effet, sur la courbe (courbe bleue au dessus de la courbe verte théorique figure de l'annexe III.2), cela se traduit par :

- un dépassement de la courbe théorique d'absorption, ce qui veut dire qu'il n'y a pas d'atténuation,

- un faux pic (dans la dérivée de la détermination des fissures) qui signale la présence d'une fissure alors qu'elle n'existe pas (cercle bleu figure Annexe III.2).

En fait, l'onde ultrasonore est « trappée » et accélérée dans le granulat. C'est pourquoi pour les stades 2 et 3 de fissuration, un profil bis supplémentaire a été ajouté pour mettre en évidence la fissuration.

Sur les profils 2 et 2bis (Annexe III.2), le premier stade de fissuration (courbe noire) nous montre la présence d'une fissure visible à l'œil nu au point 8-12 (pic de 0,05) qui se retrouve ensuite après traitement et la naissance d'une autre fissure invisible au point 16 (pic de 0,01). Quand la fissuration augmente (stade2 et 3), il y a apparition d'une nouvelle fissure invisible au point 2 dès le $2^{\text{ème}}$ stade avec un pic de 0,06 et de 0,04 au $3^{\text{ème}}$ stade. Quand à la fissure visible du point 8-12, elle s'est transformée en deux petites fissures aux points 6 (pic de 0,08) et 9-12 (pic de 0,045). Ainsi au stade3, l'ouverture de la fissure au point 2 a diminué (pic de 0,04), celle du point 6 a augmenté (pic de 0,22) et masque alors celle qui est derrière au point 9-12 (pic proche de 0).

Il est aussi intéressant de se concentrer sur les profils bis puisque les pics de fissures deviennent plus importants. En effet, au stade 2, la fissure visible du point 8-12 (pic de 0,05) s'est découpée en deux petites fissures dont les pics sont plus importants : 0,3 au lieu de 0,08 au point 6 ; 0,4 au lieu de 0,045 au point 9-12 et 0,1 au point 16. Par contre aucune trace de la fissure invisible du point 2.

Au stade 3, c'est la fissure invisible du point 2 avec un pic de 0,2 qui devient la plus importante et masque les fissures se trouvant derrière : pic de 0,12 au point 6, pic de 0,15 au point 9-12 et pic proche de 0 au point 16.

Il est aussi intéressant de noter qu'une fissure invisible a été détectée, qui s'est confirmée au stade de fissuration suivant. Regardons maintenant le profil 3.

Le profil 3 (Annexe III.3) est malheureusement « faussé » par les granulats se trouvant en surface. Au stade 1 de fissuration, l'émetteur se trouvant sur une fissure dont l'ouverture est de 0,08mm a dû être reculé de 2cm pour éviter les pertes d'énergie et une absorption importante dès le départ. Une fissure invisible à l'œil nu au point 3 est signalée. Mais ensuite, le signal ne peut pas être pris en compte du fait de l'augmentation de son amplitude (cercle bleu) à cause des granulats en surface.

Aux stades 2 et 3 de fissuration, le signal (courbe bleue) se retrouve au dessus de la courbe de référence (courbe verte), ce qui signifie qu'il y a très peu ou pas d'absorption. Juste avant que le signal ne soit amplifié, le traitement confirme la présence de la fissure détectée précédemment et qui est devenue visible à l'œil nu. Derrière cette fissure, l'amplification du signal donne des résultats faussés. Intéressons-nous maintenant au dernier profil 4.

Le profil 4 (Annexe III.4) au premier stade de fissuration ne présente aucune fissure visible à l'œil nu. Par contre le traitement nous signale la présence de plusieurs fissures : points 3-4 (pic de 0,16), 7-11 (pic de 0,1) et 16-18 (pic de 0,03). Du fait de la présence de granulats proches de la surface, nous ne nous intéresserons qu'à la première fissure au point 3-4. Celleci se retrouve lors des stades suivants 2 et 3 puisqu'elle devient même visible à l'œil nu et sa présence est repérée par un pic de 0,8 au stade 2 et 0,3 au stade 3. Par contre, le pic du stade 2 est plus important que celui du stade 3, ce qui normalement devrait être le contraire. Ceci est probablement dû à la présence d'un granulat qui augmente fortement le signal. Cela se confirme sur le Scan-B puisque un autre type d'onde semble se manifester autour de 180 microsecondes.

La figure III.15 résume les fissures obtenues sur les différents profils.



Figure III.15 : Dalle B40 : localisation des fissures 1,2 et 3 sur la dalle et sur le graphe en fonction de des profils aux trois stades de fissuration.

De même que pour la dalle B25, malgré les mauvais résultats dus aux granulats, il a été possible de mettre en évidence une fissure invisible à l'œil nu. Intéressons nous maintenant à la dalle B60.

III.8.3.3 Dalle B60.

La dalle B60 présente la résistance mécanique la plus importante et des valeurs de vitesse élevées. Coté fissuration, il n'a pas été possible de la charger pour atteindre le stade 3 de fissuration. De plus, les quatre profils sont présentés puisqu'il y a de la fissuration sur chacun d'eux et les résultats détaillés sont présentés de la même manière et se trouvent sur les figures en Annexe III.5 à 8.

Le profil 1 (Annexe III.5) montre la présence de plusieurs fissures au stade 1 alors que seule la fissure au point 14 était visible :

- point 6 pic de 0,4 ;
- point 10-11 pic de 0,3 ;
- point 14 pic de 1,6 ;
- point 17 pic de 0,6.

Malheureusement au stade suivant de fissuration, une fissure est apparue entre l'émetteur et le récepteur, ce qui a fortement atténué le signal. Du coup après traitement, il n'est plus possible de mettre en évidence les fissures. Les pics correspondants aux fissures du stade 2 sont nettement plus faibles que ceux du stade 1, par exemple pour la fissure visible du point 14 pic de 0,25 au stade 2 alors que nous avions un pic de 1,6 au stade 1.

Regardons maintenant le profil 2.

Le profil 2 (Annexe III.6) présente au stade 1 de fissuration deux fissures visibles (points 5 et 14) qui se retrouvent dans le traitement :

- pic de 1,6 au point 5,

- pic de 0,3 au point 14.

Au stade 2 suivant, nous retrouvons les mêmes fissures visibles aux mêmes points. Seulement leurs ouvertures ne sont pas assez importantes pour créer des pics bien distincts (courbes noire et verte) :

- pic de 1,7 au point 5,

- pic de 0,2 au point 14.

N'oublions pas que la dalle B60 présente la résistance mécanique la plus importante. Le traitement est néanmoins assez positif puisqu'il repositionne bien les deux fissures visibles aux deux stades de fissuration. Regardons maintenant le profil 3.

Le profil 3 (Annexe III.7) présente une fissure visible d'ouverture 0,09mm au point 2-3 qui se retrouve aux deux stades de fissuration :

- pic de 1,5 au stade 1,
- pic de 1,2 au stade 2.

Le traitement met bien en évidence la présence de cette fissure, mais il n'y a pas assez de points avant la fissure pour bien mettre en évidence les pics (courbes noire et verte) correspondants aux deux stades de fissuration. Il aurait été intéressant ici d'avancer l'émetteur et les premiers points de réception pour avoir une bonne dizaine de points avant la fissure. Regardons maintenant le dernier profil 4.

A première vue, le profil 4 (Annexe III.8) ne présente pas de fissure visible à l'œil nu alors que le traitement nous signale la présence de fissures aux points 8-12 (pic de 0,25) et 16 (pic de 0,4). Ceci se confirme au stade 2 de fissuration puisque la première fissure invisible signalée précédemment devient visible et présente une ouverture assez importante avec un pic de 1,2. Cette ouverture assez importante masque complètement les fissures suivantes du fait de l'atténuation importante du signal.

La figure suivante résume les différentes fissures obtenues sur les différents profils.



Figure III.16 : Dalle B60 : localisation des fissures 1,2,3 et 4 sur la dalle et sur le graphe en fonction de des profils aux deux stades de fissuration.

III.8.4 Conclusion.

Dans un premier temps, nous avons mis en évidence, à l'état sain, que les vitesses permettent de classer les bétons du moins résistant B25 (vitesses les plus petites) au plus résistant B60

(vitesse les plus élevées). Ceci est un résultat encourageant puisque Gudra (1999) présente un modèle qui permet à partir des ondes de surface de remonter aux valeurs de résistance du béton. Nous avons remarqué que les valeurs de vitesse mesurées sur la dalle B40 étaient un peu plus dispersées à cause de l'utilisation de deux classes de graviers.

Nous avons également observé une diminution de la vitesse pour tous les types de béton avec la fissuration. Cette diminution de la vitesse notamment au stade 2 et 3 serait plus accentuée en l'absence de présence de gel issue des mesures précédentes au stade 1. Dés le premier stade de fissuration, la dalle B60 présente une chute importante de la vitesse alors que les deux autres dalles présentent une chute modérée.

En l'absence de fissuration (état sain), la dalle B40 présente la plus forte atténuation (à cause de la taille des granulats). La dalle B60 présente l'atténuation la plus faible. L'atténuation diminue (atténuations les plus petites) en fonction de l'augmentation de la classe de résistance (augmentation de la résistance du béton). Nous avons remarqué également que les valeurs d'atténuation sur la dalle B25 et B40 sont très variables d'un profil à l'autre.

Ensuite, ces atténuations nous ont permis de distinguer les trois stades de fissuration.. Nous avons observé une augmentation très sensible et monotone de l'atténuation pour tous les types de béton avec la fissuration. Dés le premier stade de fissuration, la dalle B25 devient la plus atténuante, alors que les deux autres dalles ont des atténuations comparables. Cela peut s'expliquer par le fait qu'à l'état sain, l'atténuation est sensible à l'hétérogénéité du matériau, et c'est précisément la dalle B40 qui est la plus hétérogène. Ensuite, l'atténuation devient sensible à la fissuration du matériau. Or la dalle B25, ayant la résistance mécanique la plus faible, présente aussi la fissuration la plus importante à un état donné.

Mais le plus important ici est que la technique ultrasonore haute fréquence permet de détecter et de localiser l'amorçage d'une fissure avant qu'elle ne soit visible, ainsi lorsque cela est possible, de mettre en évidence l'ouverture d'une fissure sur un même profil par l'augmentation des pics des courbes issues de la dérivée.

Finalement, nous avons remarqué, que pour bien mettre en évidence une fissure, elle doit se trouver au milieu d'un profil de points pour avoir assez d'informations sur le signal avant et après sa traversée par l'onde. Ceci est un résultat très encourageant pour les mesures futures puisqu'il serait très intéressant de travailler avec des transducteurs sans contact afin d'éliminer les problèmes de couplage et donc de changement de l'aspect du béton à la surface.

Une exploitation systématique ne pourra s'affranchir de cet aléa qu'en rendant automatique et donc sans contact les déplacements du récepteur et de l'émetteur.

Pour le futur, il sera également intéressant de pouvoir estimer la profondeur de la fissure.

III.9 Résultats des mesures sur la teneur en eau.

Le protocole de mise en place d'une teneur en eau variable a été présenté au paragraphe III.6.1. Nous disposons de :

- 6 dalles B25 et 4 dalles B40 sans armatures,

- 2 dalles B25 avec armatures.

Afin de tester de façon objective la sensibilité de la technique ultrasonore haute fréquence et des autres techniques, les essais ont été réalisés en aveugle sur des dalles anonymées. Comme pour les dalles fissurées, il s'agit de distinguer les dalles B25 des dalles B40 mais également de suivre l'évolution de la vitesse et de l'atténuation en fonction de la teneur en eau.

III.9.1 Organisation des mesures.

L'onde de surface est générée par le système de la version 2 CHARIOT à savoir le transducteur émetteur avec contact et le récepteur sans contact mobile sur un chariot présenté au paragraphe II.4 du chapitre 2.

Les paramètres issus du traitement sont ceux de la version 3 : tableaux II.10 et 11 du paragraphe II.5.2 du chapitre 2 et plus particulièrement la vitesse moyenne de groupe et l'atténuation moyenne totale issues de :

Type de paramètre	Symbole	Unité
Vitesse moyenne de groupe par slant stack	V_gr_SL	m/s
Vitesse à la fréquence centrale par slant stack	V(f_centrale)SL	m/s
Vitesse à la fréquence choisie par slant stack	V(f_choisie)SL	m/s
Vitesse à la fréquence maximale par slant stack	V(f_max_corr)SL	m/s
Vitesse moyenne de groupe	V_moy	m/s

Tableau III.13 : Vitesses acoustiques choisies pour l'étude.

Type de paramètre	Symbole	Unité			
Atténuation à la fréquence choisie	a_moy_(f_choisie)	dB/m			
Atténuation à la fréquence centrale	a_moy_(f_centr)	dB/m			
Atténuation maximale et minimale par régression linéaire	a_r_L_min	dB/m			
	a_r_L_max				
Atténuation	A_r_L_abs	dB/m			
Atténuation maximale et minimale par régression non linéaire	a_r_NL_min	dB/m			
	a_r_NL_max				
Atténuation par régression non linéaire	a_r_NL_abs	dB/m			
Atténuation moyenne totale	alfa tot moy	dB/m			

Tableau III.14 : Atténuations acoustiques choisies pour l'étude.

Les dalles ont été étudiées selon deux profils (fig. III.17) sauf la dalle 16 selon quatre profils. Pour les dalles à deux profils, chaque profil comporte entre 40 et 70 points de mesures. La figure suivante illustre la géométrie de mesures.



Figure III.17 : Situation des profils de mesures sur la dalle.

III.9.2 Détermination du type de dalle.

Au paragraphe III.8.1 et III.8.2, nous avons pu distinguer les différentes résistances mécaniques du béton à l'aide de la vitesse et de l'atténuation. Mais ici à cause de la teneur en eau, nous ne pouvons pas différencier les résistances à l'aide des vitesses ou des atténuations du fait que la saturation en eau accélère la vitesse de propagation des ondes acoustiques.

Nous allons alors revenir à une « ancienne méthode » en utilisant l'amplitude du signal visualisé sur la fenêtre de l'oscilloscope, car ce paramètre est lié au module du matériau et donc à sa résistance. En effet, plus un béton est résistant, plus l'amplitude du signal sera importante ainsi que sa qualité. D'autre part, la présence de granulats en surface impose d'ausculter la dalle en profil de longueur plus petite car l'atténuation est beaucoup plus importante. C'est pourquoi dans notre cas, la dalle B40 a donné de plus faibles amplitudes de signal par rapport à la B25.

Mais à cause de la forte hétérogénéité de la dalle B40 (présence de granulats en surface) et de l'atténuation plus importante, les amplitudes du signal les plus petites seront attribuées à la dalle B40.

Amplitude du signal (mV)	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4	Dalle assimilée à une	Détermination réelle de la dalle
Dalle 1	500	500			B25	B25
Dalle 2	400	400			B40	B25
Dalle 3	500	500			B25	B25
Dalle 4	500	500			B25	B25
Dalle 5	420	500			B25	B25
Dalle 6	460	200			B40	B40
Dalle 7	500	540			B25	B25
Dalle 9	500	500			B25	B40
Dalle 10	400	500			B25	B40
Dalle 12	600	400			B25	B25
Dalle 15	500	400			B40	B25
Dalle 16	500	500	220	100	B40	B40

Le tableau III.15 ci-dessous présente les différentes amplitudes obtenues sur toutes les dalles.

Tableau III.15: Détermination du type de dalle comparée à la détermination réelle.(en gris les déterminations correctes)

Les dalles en B40 sont les dalles numérotées : 6, 9, 10 et 16 ; les autres sont en B25.

Nous avons donc juste 2 dalles sur 4 en B40 et 6 dalles sur 8 en B25. Le classement est donc assez correct (75%) pour les dalles en B25 et moyen (50%) pour les B40. Rappelons pour les dalles B40 la difficulté induite par les tailles des granulats. Cette « ancienne méthode » par l'amplitude est limitée par la taille des granulats qui faussent les résultats.

Intéressons nous maintenant à l'évolution de la vitesse et de l'atténuation en fonction de la teneur en eau.

III.9.3 Résultats en terme de vitesse et d'atténuation.

Nous commençons par regarder la capacité de la méthode acoustique à faire la distinction entre les différentes teneurs en eau à l'aide des vitesses sur les dalles B25 et B40. La vitesse moyenne de groupe présentée est issue de la moyenne des vitesses définies au tableau III.13.


Figure III.18 : Evolution de la vitesse en fonction de la teneur en eau croissante sur les dalles

B25.



Figure III.19 : Evolution de la vitesse en fonction de la teneur en eau croissante sur les dalles B40.

Les écartypes ne sont pas ici présentés car ils sont très faibles (< 5%). Les vitesses déterminées par les différentes méthodes sont assez semblables pour les deux profils de mesures et nous conduit à de bonnes mesures fiables.

La figure III.18 des dalles B25 montre une bonne évolution croissante de la vitesse en fonction de la teneur en eau avec un coefficient de régression linéaire de 0,82. Seule la première valeur de vitesse est élevée (2200 m/s) pour une teneur en eau très faible de 1,85%. La figure III.19 des dalles B40 montré également une bonne évolution croissante de la vitesse en fonction de la teneur en eau avec un coefficient de régression linéaire de 0,94. Ces résultats sont très encourageants car ils montrent bien la sensibilité de la vitesse des ondes acoustiques à la teneur en eau. Regardons maintenant les résultats en terme d'atténuation.

Un calcul de l'atténuation n'a pas été possible sur une dalle B25 à cause une augmentation de l'amplitude importante du signal dés les premiers points de réceptions sur les deux profils de mesures. Les mesures d'atténuation sont déterminées à partir de plusieurs méthodes qui donnent des valeurs assez proches d'où la non représentation des écartypes. De plus, ces valeurs sont assez fiables.

L'atténuation moyenne présentée est issue de la moyenne des atténuations définies au tableau III.14.



Figure III.20 : Evolution de l'atténuation en fonction de la teneur en eau croissante sur les dalles B25.

La figure III.20 des dalles B25 montre des résultats très dispersés en terme d'atténuation. Les atténuations ne suivent pas de décroissance particulière, au contraire elles fluctuent. Ceci est due à l'augmentation de l'amplitude du signal dés les premiers points de réception ce qui perturbe ensuite le calcul de l'atténuation. Cet effet néfaste ne gène aucunement les vitesses car les points de mesures sont très nombreux suivant les profils entre 40 et 70 points. Par contre pour l'atténuation malgré le nombre important de points de mesures, l'atténuation ne reflète pas l'évolution attendue suivant la croissance de la teneur en eau.



Figure III.21 : Evolution de l'atténuation en fonction de la teneur en eau croissante sur les dalles B40.

Cette fois-ci, la figure III.21 montre une décroissance de l'atténuation en fonction de la teneur en eau croissante à partir de 50% avec un coefficient de régression linéaire de 0,70. Mais la régression linéaire sur l'ensemble de la plage en teneur en eau n'a pas de sens. Ceci reste quand même un résultat encourageant pour la suite puisque malgré les mauvais résultats sur les dalles B25, l'atténuation reste sensible à la teneur en eau.

III.9.4 Conclusion.

Nous avons vu qu'il n'est pas possible de distinguer du point de vue classe du béton les dalles à différentes teneurs en eau du fait de la perturbation des signaux par la modification de la vitesse des ondes ultrasonores par la teneur en eau.

Par contre pour les dalles B25 et B40, il a été tout à fait possible de classer les dalles en fonction de leur teneur en eau à l'aide de la vitesse des ondes acoustiques. Seules les dalles B40 ont réagi en terme d'atténuation par une diminution de l'atténuation en fonction de la teneur en eau croissante.

Ces résultats sont très encourageants car ils montrent bien la sensibilité de la vitesse et de l'atténuation des ondes acoustiques à la teneur en eau.

Regardons maintenant dans la partie suivante l'influence de la teneur en chlorures.

III.10 Résultats des mesures sur la teneur en chlorures.

Le protocole de mise d'une teneur en chlorures variable a été présenté au paragraphe III.6.2. Nous disposons de :

- 5 dalles B25 sans armatures aux teneurs en chlorures de 4, 6, 8, 12 et 14%,

- 2 dalles B25 avec armatures aux teneurs en chlorures de 6 et 11 %.

De nouveau, les essais ont été réalisés en aveugle sur des dalles anonymes. Comme pour la teneur en eau contrôlée, il s'agit ici de suivre l'évolution de la vitesse et de l'atténuation en fonction de la teneur en chlorures.

III.10.1 Organisation des mesures.

L'onde de surface est générée par le système de la version 2 CHARIOT à savoir le transducteur émetteur avec contact et le récepteur sans contact mobile sur un chariot présenté au paragraphe II.4 du chapitre 2.

Les paramètres issus du traitement sont ceux de la version 2 : tableaux II.7 et 8 du paragraphe II.4.3 du chapitre 2 et plus particulièrement :

Type de paramètre	Symbole	Unité
Vitesse de groupe par Slant Stack	V_g^{SS}	m/s
Vitesse à la fréquence centrale par slant	V(f_centrale)SL	m/s
stack		
Vitesse à la fréquence maximale par	V(f_max_corr)SL	m/s
slant stack		
Vitesse moyenne + écartype	Vg	m/s

Tableau III.16 : Vitesses acoustiques choisis pour l'étude.

Type de paramètre	Symbole	Unité
Atténuation « classique »	$\alpha_c (f_o)$	dB/m
Atténuation à la fréquence centrale	a_moy_(f_centr)	dB/m
Atténuation moyenne	$lpha_{moyen}$	dB/m

Tableau III.17 : Atténuations acoustiques choisis pour l'étude.

Chaque dalle a été auscultée à l'aide de deux profils de 30 à 35 points de mesures, couvrant la dalle dans son entier. Les essais ont pour but de mettre en évidence une sensibilité ou non à la teneur en chlorures des ondes de surface à haute fréquence.

Teneur en chlorures (%)	3,29	6,04	7,34	11,60	14,14	5,94	10,44
Porosité ouverte (%)	12,52	14,68	14,22	14,93	15,57	-	-
Numéro de dalle	B1-1	B1-2	B1-3	B1-4	B1-5	B2-1	B2-2
Vitesse (m/s)	2420	2230	2261	2138	2183	2340	2241
écartype (%)	(4%)	(6%)	(5%)	(4%)	(7%)	(6%)	(5%)
Atténuation dB/m)	69	133	53	89	125	105	90

III.10.2 Résultats	en terme	de vitesse	et d'atténuation.

Tableau III.18 : Résultats obtenues sur les dalles avec variation de teneur en chlorures.



Figure III.22 : Evolution de la vitesse en fonction de la teneur en chlorures croissante.

La vitesse et l'atténuation sont issues de la moyenne des paramètres définis aux tableaux III.16 et 17.



Figure III.23 : Evolution de l'atténuation en fonction de la teneur en chlorures croissante.

Les écartypes ne sont pas ici présentés car ils sont très faibles. Les vitesses déterminées par les différentes méthodes sont assez semblables pour les deux profils de mesures et nous conduit à de bonnes mesures fiables.

La figure III.22 montre une évolution décroissante de la vitesse en fonction de la teneur en chlorures avec un coefficient de régression linéaire de 0,70. Mais cette décroissance n'est pas du tout cohérente car pour des valeurs de teneur en chlorures assez proches, deux mesures donnent des vitesses très différentes : 2340 m/s pour 5,94% et 2230 m/s pour 6,04%.

D'autre part, la figure III.23 donnent des résultats très dispersés en terme d'atténuation. Aucune tendance ne se dégage de cette évolution de la teneur en chlorures.

Au vu de ces résultats, aucun des deux paramètres vitesse ou atténuation ne met en évidence clairement l'effet de la teneur en chlorures. Ce qui signifie que les ondes de surface ne sont pas sensibles à la teneur en chlorures.

Comme cette teneur en chlorures varie selon la quantité d'eau interne, regardons ce qu'il en est en terme de porosité.



Figure III.24: Variation de la vitesse en fonction de la porosité.

La figure III.24 met en évidence une relation entre la vitesse des ondes de surface et la porosité avec un coefficient de régression linéaire de 0,88. Si les ondes de surface sont sensibles à la porosité, indirectement elles vont être liées à la teneur en eau puisque cette eau pénètre dans cette porosité ouverte pour l'essentiel. Comparons alors les résultats obtenus pour la teneur en eau (paragraphe III.9) avec ceux-ci.



Figure III.25: Variation de la vitesse en fonction de la teneur en eau ou en eau chlorée.

La figure III.25 met en évidence une sensibilité de la vitesse à la teneur en eau plutôt qu'à la teneur en eau chlorée avec une bonne courbe de régression linéaire avec un coefficient de 0,86. Les vitesses donnent des résultats très dispersés vis-à-vis de l'eau chlorée.

Cette courbe confirme la relation entre la vitesse des ondes de surface et la teneur en eau comme montré précédemment au paragraphe III.9, et l'insensibilité à la teneur en chlorures.

III.10.3 Conclusion.

Nous remarquons que la technique ultrasonore à haute fréquence n'est pas capable de distinguer la teneur en chlorures pour une teneur en eau donnée. Il paraît d'ailleurs normal que la présence de chlorures dans la solution interstitielle ne modifie pas la vitesse de propagation ou k'atténuation des ondes de surface. Encore une fois, la technique a été sensible à la porosité et donc indirectement à la teneur en eau comme pour les dalles à teneur en eau contrôlée.

Nous allons voir par la suite la sensibilité de la technique à la variation de la profondeur carbonatée.

III.11 Résultats des mesures sur les dalles carbonatées.

Le protocole de mise en place d'une profondeur de carbonatation variable a été présenté au paragraphe III.6.3. Seules des dalles en B25 sans armatures ont été utilisées avec des profondeurs de carbonatation de 5, 10, 20 et 30-35mm. Cette profondeur carbonatée a été mesurée par carottage directement sur les corps d'épreuve.

III.11.1 Organisation des mesures.

L'onde de surface est générée par le système de la version 2 CHARIOT à savoir le transducteur émetteur avec contact et le récepteur sans contact mobile sur un chariot présenté au paragraphe II.4 du chapitre 2. Les paramètres issus du traitement sont ceux de la version 2 : tableaux II.7 et 8 du paragraphe II.4.3 du chapitre 2 et plus particulièrement :

Type de paramètre	Symbole	Unité
Vitesse de groupe par différence de phase + écartype	V _g ^{DF}	m/s
Vitesse de groupe par Slant Stack	V_g^{SS}	m/s
Vitesse moyenne	Vg	m/s

Tableau III.19 : Vitesses acoustiques choisis pour l'étude.

Type de paramètre	Symbole	Unité
Atténuation « classique »	$lpha_c (f_{o)}$	dB/m
Atténuation à la fréquence centrale	a_moy_(f_centr)	dB/m
Atténuation moyenne	$lpha_{moyen}$	dB/m

Tableau III.20 : Atténuations acoustiques choisis pour l'étude.

Chaque dalle a été auscultée à l'aide d'un seul profil de 30 points de mesures vu les dimensions réduites de la dalle (30cm au lieu de 60cm). Nous avons utilisé deux types de transducteurs émetteurs de fréquence centrale 0,5 et 1Mhz pour pouvoir jouer sur la profondeur. En effet, nous voulons essayer de déterminer les profondeurs carbonatées et si possibles les transitions entre la partie carbonatée et non carbonatée. Pour cela, il faut travailler à des longueurs d'onde différentes. Les résultats de ces mesures devraient montrer une dispersion des vitesses en fonction de la fréquence, caractéristique d'un milieu stratifié, qui après traitement devrait permettre de trouver la vitesse dans la couche carbonatée et dans la couche saine plus profonde (la différence relative de ces 2 vitesses peut être considérée comme une estimation du niveau de carbonatation).

III.11.2 Résultats en terme de vitesse et d'atténuation.

A priori, la présence d'une zone carbonatée est de nature à augmenter la vitesse de propagation et à diminuer l'atténuation par remplissage de la porosité par un matériau consistant.

Profondeur	5mm	10mm	20mm	30-35mm
Vitesse (m/s)				
0,5Mhz	2380	2506	2308	2570
écartype	143	150	185	180
0,5Mhz (slant)	2375	2540	2300	2522
1 Mhz	2418	2496	2327	2512
écartype	121	100	163	151
1Mhz (slant)	2400	2668	2306	2495
Atténuation (dB/m)	5mm	10mm	20mm	30-35mm
0,5Mhz	80	66	54	40
1Mhz	200	100	140	200

 Tableau
 III.21 : Vitesses et atténuations obtenues sur les dalles carbonatées.





La figure III.26 montre que les deux méthodes donnent des vitesses assez identiques quelle que soit la profondeur de carbonatation aussi bien à 0,5 qu'à 1Mhz. La seule différence est observée à 1Mhz pour une épaisseur de 10mm. En regardant de plus prés le signal à 1Mhz, nous avons remarqué que les premiers points de réception semblent accélérer en comparaison à ceux à 0,5Mhz.

Pour l'épaisseur de 20mm, la vitesse décroît alors que nous devions avoir une vitesse de l'ordre de 2500m/s. La cause est difficile à établir car l'atténuation n'est pas affectée.

Il se peut aussi que sur cette dalle carbonatée sur 10mm, les ondes ultrasonores soient « trappées » dans des granulats ou du béton plus dur et soient donc accélérées.

Intéressons nous maintenant aux atténuations.



Figure III.27 : Evolution de l'atténuation en fonction de profondeur de carbonatation croissante.

A priori, la présence d'une zone carbonatée est de nature à diminuer l'atténuation puisqu'il y a remplissage de la porosité par la formation de carbonates. La figure III.27 vérifie cette affirmation pour les ondes ultrasonores de fréquence 0,5Mhz où les ondes ultrasonores se propagent à la fois dans la couche carbonatée et non carbonatée, jusqu'à la profondeur 30-35mm où elles se propagent seulement dans la couche carbonatée. La courbe de régression linéaire affiche un très bon coefficient de 0,95.

Par contre pour la fréquence 1Mhz, cela n'est plus vérifié. La longueur d'onde est plus petite et l'onde se propage dans le premier centimètre. C'est pourquoi à 20 et 30-35mm de profondeur carbonaté, l'onde n'est plus influencée par la profondeur de carbonatation. Dans un premier temps, l'atténuation diminue à cause du milieu puis augmente à cause de la fréquence : c'est l'effet dispersif usuel qui l'emporte et alors la courbe d'atténuation en fréquence aura une forme avec un minimum comme constaté à 1MHz.

III.11.3 Conclusion.

La présence d'une zone carbonatée est de nature à augmenter la vitesse de propagation. En effet les vitesses obtenues sur :

- les dalles en B25 de référence sont en moyenne de 2300 m/s,

 les dalles B25 carbonatées sont en moyenne de 2445 m/s quand l'onde se propage à la fois dans la couche carbonatée et la saine et de 2505 m/s quand l'onde se propage uniquement dans la couche carbonatée.

L'atténuation diminue également du fait du remplissage de la porosité par les carbonates. Pour les hautes fréquences, l'atténuation diminue à cause du milieu puis augmente à cause de la fréquence (effet dispersif usuel qui l'emporte) et la courbe d'atténuation en fréquence aura une forme avec un minimum comme constaté à 1MHz.

Les résultats de ces mesures montrent une dispersion des vitesses en fonction de la fréquence, caractéristique d'un milieu stratifié, qui après traitement permettent de trouver la vitesse dans la couche carbonatée et dans la couche saine plus profonde (la différence relative de ces 2 vitesses peut être considérée comme une estimation du niveau de carbonatation).

En utilisant des transducteurs de fréquences différentes, il sera possible de retrouver les propriétés du milieu sain et du milieu carbonaté ainsi que la profondeur du front en analysant le spectre d'investigation en fréquences (estimation de la profondeur par inversion).

III.12 Conclusion du chapitre.

Dans un premier temps, nous avons mis en évidence la possibilité de distinguer les différentes classes de résistance de béton à l'aide des vitesses mesurées sur les dalles saines. Dans un second temps, les mesures de l'atténuation ont permis de distinguer les trois niveaux de fissuration imposés.

Mais le plus important est que la technique ultrasonore haute fréquence permet de :

- détecter une fissure,
- de localiser l'amorçage d'une fissure avant qu'elle ne soit visible,
- de mettre en évidence l'ouverture d'une fissure.

Pour cela, la fissure doit se trouver au milieu d'un profil de points afin d'avoir assez d'informations sur le signal avant et après la fissure. Cette limitation pourra être levée en utilisant des capteurs émetteur et récepteur sans contact et un système automatisé. Une autre solution consiste à inverser l'émetteur et le récepteur et de réaliser un nouveau profil.

Il est difficile de distinguer la classe de résistance du béton pour les dalles avec différentes teneurs en eau en raison de la dépendance entre la vitesse de l'onde ultrasonore et la teneur en eau. D'autre part, la technique n'est pas capable de distinguer la différence entre un remplissage de la porosité par une eau chlorée ou non. En effet, la présence de chlorures dans la solution interstitielle ne modifie pas la vitesse de propagation des ondes acoustiques. La technique est seulement sensible à la porosité et donc indirectement à la teneur en eau.

La présence d'une zone carbonatée est de nature à augmenter la vitesse de propagation, la porosité étant remplie de carbonate. L'atténuation diminue donc du fait de la diminution de la porosité. Et en jouant sur la fréquence, la profondeur de carbonatation peut être approchée. Après avoir étudié un certain nombre de paramètres et leur influence sur la propagation des ondes ultrasonores en laboratoire, nous allons nous intéresser à des ouvrages réels. Ceci est l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 4 : Evaluation de la peau du béton sur des ouvrages

<u>IV.1. Introduction.</u> <u>IV.1.1. Objectifs.</u>

Les résultats de laboratoire obtenus au chapitre précèdent ont permis de valider la technique pour plusieurs types de dégradation comme la carbonatation, la fissuration,...Nous étudierons dans ce chapitre la sensibilité de la technique ultrasonore et son exploitation sur différents sites soit pour un type de dégradation connu soit dans le cas contraire, la technique sera utilisé en aveugle.

IV.1.2 Présentation des pathologies choisies pour les études in-situ d'ouvrages.

Nous avons vu au chapitre 1 que les pathologies du béton d'enrobage peuvent avoir une origine chimique, mécanique ou physique. De nombreux ouvrages anciens peuvent également être alors sous-dimensionnés au regard de leurs sollicitations actuelles. Les conséquences sont des macro-fissures pouvant altérer le comportement mécanique de l'ouvrage mais également favoriser la pénétration d'agents agressifs.

Les attaques physiques sont essentiellement dus à l'environnement et au climat extérieur : le gel-dégel, l'érosion, les abrasions,...Les conséquences sont de la fissuration microscopique ou macroscopique dans certaines parties de l'ouvrage.

Les ouvrages sont exposés à la pluie, à la neige, à l'eau de mer,...les dégradations résultent de la pénétration d'agents agressifs ou d'une réaction interne. La corrosion (sous l'effet de la carbonatation ou en présence de chlorures), la formation de gels gonflants ou la lixiviation (eaux de ruissellement ou eaux acides) sont des exemples de ces dégradations.

Quatre ouvrages seront étudiés :

- ouvrages de l'A21 : la pathologie particulièrement étudiée sera la carbonatation,

- dalles de La Rochelle : la pathologie étudiée sera l'attaque par les chlorures de l'eau de mer,

- pont de La Marque : plusieurs pathologies plus ou moins identifiées se superposent,

- tranché couverte de Guéthary : même cas.

IV.2. Etude des ouvrages de l'A21. IV.2.1 Présentation des ouvrages.

Parmi les ouvrages de l'Etat, ceux de l'autoroute A 21, appelée « rocade minière », ont été retenus car ils avaient fait en 1999-2000 l'objet d'un bilan systématique, après 20 années de service, de l'état des parements des ouvrages d'art. Cette étude avait été conduite par le LRPC de Lille, partenaire du projet sous la direction de Bernard Tonnoir.

La SOA du LRPC de Lille a établi à la demande de la CDOA du Pas de Calais un bilan de l'état de dégradation des parements des ouvrages de l'A21. L'étude a porté sur 48 ouvrages, comprenant un effectif comparable de ponts inférieurs et supérieurs. En plus d'un simple constat, l'étude avait pour objectif de mettre en évidence d'éventuelles relations entre les caractéristiques des bétons, les paramètres environnementaux et l'endommagement des parements.

Sur chacun des 48 ouvrages, chaque zone a fait l'objet d'un examen visuel. Un prélèvement d'un prisme par sciage a été fait au centre de chaque zone. Ce sont en tout 259 zones qui ont été analysées. La masse volumique apparente, la porosité et la profondeur de carbonatation ont été mesurées sur chaque prisme.

IV.2.2 Sélection de 4 ouvrages.

Le choix des quatre ouvrages (tableau IV.1) parmi les 48 de l'étude antérieure s'est fait selon les critères suivants. Tout d'abord sur leur accessibilité, tous les ouvrages sélectionnés étant des Passages Inférieurs et les zones auscultées des piédroits et des murs (fig. IV.1). De plus, ces ouvrages sont facilement accessibles par les accès autoroutiers (fig. IV.1).



Figure IV.1 : Vue générale et situation des quatre ouvrages sélectionnés de l'A21.

Numéro de l'ouvrage	OA 1204B	OA 1202A	OA 1247	OA 1249
Profondeur de carbonatation maximale (mm)	13	17	25	40
Porosité maximale (%)	20	15	16	15
Fissuration structurelle	Importante	Faible	Importante	Faible
Fissuration locale	Importante	Faible	Faible	Importante
Nombre de prélèvements	7	5	8	7
Nombre de zones de mesure retenues	7	4	7	7

 Tableau IV.1 : Profondeur de carbonatation, porosité maximum et critères de choix des quatre ouvrages.

Le second critère de choix est le contraste de profondeur de carbonatation. En effet sur un même ouvrage, la profondeur de carbonatation varie de quelques mm à quelques cm. Enfin, le dernier critère de choix est la présence de fissuration locale ou structurelle principalement sur les parements (tableau IV.1).

IV.2.3 Définition des zones de mesure.

Pour chaque ouvrage ne sont prises en considération que les zones situées en mur ou en piédroit (fig. IV.1). Les mesures se font sur une ligne d'un mètre de long passant par le point de prélèvement de la gauche vers la droite (fig. IV.2).



Figure IV.2 : Exemple de zone de prélèvement rebouchée et profil de mesure.

Le détail des différentes zones de mesure des quatre ouvrages sont présentées en annexe IV.1 à 4.



Figure IV.3 : Exemples de zones auscultées sur les ponts de l'A21.

IV.2.4 Bilan effectué par le LRPC de Lille.

Chaque zone porte un numéro, qui est sans rapport avec la numérotation donnée par le LRPC dans l'étude antérieure. Pour pouvoir mener le travail en aveugle, les correspondances entre

numéros sont restées inconnues jusqu'à la fin de l'étude. Les figures IV.4 et IV.5 reprennent le bilan effectué par le LRPC de Lille au niveau de l'exposition, de l'ensoleillement, de la fissuration, de la porosité et de la carbonatation.



Figure IV.4 : Bilan sur le OA 1202A et le OA1204B.



Figure IV.5 : Bilan sur le OA 1247 et le OA 1249.

Afin de tirer un maximum de ces mesures, les méthodes de traitement du signal ont été perfectionnées dans un premier temps et un dispositif autonome rapide d'acquisition des données sur le terrain a été développé.

IV.2.5 Système et organisation des mesures.

Le système utilisé est la version 1 COIN-COIN à savoir l'émetteur et le récepteur avec contact (couplage). Un PC de terrain équipé d'un programme spécifique permettant l'acquisition des données de façon rapide et fiable, a été instrumenté. Le couplage entre l'association transducteur-coin et la surface du béton se fait par l'intermédiaire d'un gel et d'un film transparent sur lequel une grille repère les positions successives du récepteur Les zones retenues sont au nombre de sept pour les ouvrages OA1247, OA 1204B, OA 1249 et de quatre pour le OA 1202A. La géométrie de mesure appliquée pour tous les ponts est illustrée sur la figure IV.12 (a) et (b). Chaque zone est marqué : 1...k...N. Une ligne de mesures de longueur 1m est matérialisée dans chacune des zones avec un espacement entre les points de $\Delta x = 10$ cm soit au total dix profils. Sur chaque profil, la distance entre le coin émetteur et le coin récepteur est de 5cm pour éviter les phénomènes de champ proche. Ensuite, un premier signal est enregistré puis le coin récepteur est déplacé de 1cm jusqu'au bout du profil soit 5cm équivalent à 5 points de mesure. En résumé, il y a 50 points de mesure sur une ligne de 1m découpée en 10 profils.



Figure IV.6 : Géométrie de mesure appliquée pour tous les ponts de l'A21.

IV.2.6 Résultats.

Les résultats de mesures sont présentés à partir des paramètres définis dans les tableaux II.5 et II.6 du paragraphe II.3.3 au chapitre 2 et plus particulièrement la vitesse moyenne de groupe et l'atténuation moyenne totale issues de :

Type de paramètre	Symbole	Unité
Vitesse de groupe	V _g ^{DF}	m/s
Pente de la caractéristique de dispersion	V _{phP} ^{DF}	m/s/MHz
Vitesse de groupe	V_g^{SS}	m/s
Pente de la caractéristique de dispersion	V_{phP}^{SS}	m/s/MHz
Vitesse moyenne	Vg	m/s

 Tableau IV.2 : Vitesses choisies pour étudier la vitesse acoustique.

Type de paramètre	Symbole	Unité
Atténuation « classique »	$lpha_c (f_{o})$	dB/m
Pente de l'atténuation « classique »	$\alpha_{cp}(B)$	dB/m/MHz
Atténuation par « régression »	$\alpha_r(f_o)$	dB/m
Pente de l'atténuation par régression	$\alpha_{rp}(B)$	dB/m/MHz
Indice de l'atténuation	Ια	MHz/cm
Atténuation moyenne	α_{moyen}	dB/m

Tableau IV.3 : Atténuations choisies pour étudier l'atténuation acoustique.

Les paramètres extraits sont présentés pour chacun des ouvrages de la même façon, sur deux figures au format suivant :

- 1^{ère} figure : les paramètres sont exprimés en fonction de la position de la mesure et pour toutes les zones consécutives,

- 2^{eme} figure : les paramètres moyennés par zone.

Ces figures nommées Annexe IV.5 à IV.16 sont présentées en annexe.

Les résultats sont résumés sous forme de tableaux (IV.4 et 5).

Vitesse moyenne (m/s) et écart-type	OA 1202A	OA 1204B	OA 1247	OA 1249
Zone1	2205 (2%)	2210 (2%)	2230 (3%)	2372 (3%)
Zone2	2150 (6%)	2162 (2%)	2178 (3%)	2348 (3%)
Zone 3	2271 (5%)	2201 (2%)	2242 (3%)	2311 (5%)
Zone 4	2191 (2%)	2181 (2%)	2125 (4%)	2527 (2%)
Zone5		2202 (2%)	2103 (2%)	2414 (2%)
Zone 6		2193 (3%)	2125 (2%)	2172 (3%)
Zone 7		2207 (2%)	2196 (3%)	2371 (4%)
Toutes les zones	2204	2194	2171	2359

Tableau IV.4 : Vitesses moyennes obtenues sur les ponts de l'A21.

Atténuation moyenne (dB/m) et écart-type	OA 1202A	OA 1204B	OA 1247	OA 1249
Zone1	365 (8%)	276 (7%)	352 (6%)	186 (5%)
Zone2	328 (17%)	257 (6%)	310 (9%)	232 (4%)
Zone 3	316 (28%)	300 (5%)	334 (13%)	256 (7%)
Zone 4	136 (30%)	355 (3%)	362 (18%)	174 (8%)
Zone5		277 (9%)	313 (8%)	253 (3%)
Zone 6	-	379 (5%)	362 (6%)	290 (5%)
Zone 7		245 (7%)	287 (6%)	192 (10%)
Toutes les zones	286	298	332	226

Tableau IV.5 : Atténuations moyennes obtenues sur les ponts de l'A21.

De cette première étape, nous pouvons constater (à partir des graphes des Annexes IV.5 à 16) que :

- la méthode « slant stack » semble être la plus précise pour la détermination de la caractéristique de dispersion de la vitesse de phase et de la vitesse de groupe lorsque les donnés ont un faible rapport signal/bruit,

- l'atténuation exprimée par la valeur du coefficient d'atténuation au centre de l'intervalle fréquentiel de validité semble le mieux représenter la qualité du matériau. La pente de la caractéristique d'atténuation et l'indice de décalage de la fréquence donnent des résultats plutôt erronés.

Toutes les mesures des paramètres liés à l'atténuation de l'onde acoustique affichent un écart type considérable. Ceci est causé par l'effet de non répétitivité du couplage des transducteurs. Au moment de la campagne de mesures sur les ponts de l'A21, le système de mesure sans contact n'était pas encore prêt.

Les valeurs de vitesse obtenues sont relativement homogènes d'une zone à l'autre. Sur une même zone, elles présentent néanmoins une dispersion importante comparable à la différence entre zones. Une différenciation entre zones basée sur la vitesse semble donc difficile. Toutes les valeurs de vitesse se situent autour de 2200 m/s, sauf pour l'ouvrage OA1249 où elles sont sensiblement plus élevées.

Les valeurs d'atténuation sont généralement situées entre 250 et 350 dB/m, sauf pour l'ouvrage OA 1249 où elles sont inférieures à 300 dB/m. Par ailleurs les différences d'atténuation d'une zone à l'autre sont plus importantes que pour la vitesse.

IV.2.7 Conclusion.

Comme pour l'étude sur les dalles à carbonatation contrôlée en laboratoire (chapitre précédent), l'onde de surface se propage dans le milieu ausculté à une profondeur de l'ordre de la moitié de sa longueur d'onde, soit environ 1cm pour une fréquence de 0,2 MHz. Cela veut dire que pour des profondeurs de carbonatation supérieures au centimètre, les valeurs mesurées sont essentiellement celles du matériau carbonaté, alors que pour des profondeurs inférieures au centimètre, l'onde ausculte principalement le matériau sain. Ainsi, il peut être difficile de distinguer entre elles des zones avec des épaisseurs carbonatées faibles (quelques millimètres), ou grandes (quelques centimètres).

Une différenciation entre zone basée sur la vitesse ou l'atténuation semble donc difficile. De plus, les valeurs de vitesse obtenues sont relativement homogènes d'une zone à l'autre avec une dispersion importante et les différences d'atténuation d'une zone à l'autre sont plus importantes que pour la vitesse. Ces résultats en vitesse ou atténuation ne permettent pas de distinguer les zones entre elles.

Cependant au regard des résultats obtenus en laboratoire au paragraphe III.11 au chapitre 3, en principe, la carbonatation entraîne une diminution de la porosité par colmatage ce qui devrait entraîner :

- une augmentation de la vitesse avec la profondeur de carbonatation,
- une diminution de l'atténuation avec la profondeur de carbonatation.

On peut donc avancer que l'ouvrage OA 1249, où les vitesses sont les plus grandes et les atténuations les plus faibles, présente la profondeur de carbonatation la plus grande. Le classement des autres ouvrages, où les valeurs obtenues sont semblables, semble plus hasardeux.

Nous allons essayer de classer les zones d'un même ouvrage dans la section suivante afin de peut être valider des hypothèses et distinguer les zones selon leur profondeur de carbonatation.

IV.3. Synthèse globale des résultats des auscultations sur les ponts de l'A21. IV.3.1 Classement des ouvrages.

Toutes les zones	OA 1202A	OA 1204B	OA 1247	OA 1249
Vitesse moyenne (m/s)	2204	2194	2171	2359
Atténuation moyenne (dB/m)	286	298	332	226

Tableau IV.6 : Synthèse des résultats obtenus sur les ponts de l'A21.

Les ouvrages ne se distinguent pas par les valeurs des vitesses ou atténuations mesurées sauf le OA 1249, classé comme le plus carbonaté. Mais cette différence peut tout aussi bien être liée aux caractéristiques du béton. Etant donné que les ouvrages présentent des différences importantes de profondeur de carbonatation selon les zones, travailler sur les valeurs moyennes n'est pas représentatif. Nous avons donc préféré à un classement entre ouvrages un classement par zones au sein de chaque ouvrage.

IV.3.2 Correspondance des zones de mesure avec celles du LRPC.

Les tableaux IV.7 et 8 présentent les correspondances entre appellations des zones de mesures.

		OA 1202A	OA 1204B			
pied droit	zone	front de carbonatation (mm)	pied droit	zone	front de carbonatation (mm)	
182	2	17	166	2	13	
183	3	0	167	5	12	
184	1	10	168	7	9	
mur	zone	front de carbonatation (mm)	169	6	12	
186	4	1	mur	zone	front de carbonatation (mm)	
			170	4	3	
			171	3	0	
			172	1	0	

 Tableau IV.7 : Correspondance des zones : OA 1202A (Montigny-en-Gohelle) et OA 1204B (Dourges).

			-			
		OA 1247	OA 1249			
pied droit	zone	front de carbonatation (mm)	pied droit	zone	front de carbonatation (mm)	
150	3	5	175	3	30	
151	4	25	176	4	14	
			177	2	40	
mur	zone	front de carbonatation (mm)	mur	zone	front de carbonatation (mm)	
152	1	2	178	1	3	
153	1	1	179	5	3	
154	5	3	180	7	9	
155	6	5	181	6	5	
156	7	12				

Tableau IV.8 : Correspondance des zones : OA 1247 (Sallaumines) et OA 1249

(Fouquières-les-lens).

IV.3.3 Classement des zones et évolution de la vitesse et de l'atténuation.

Le tableau IV.9 présente, pour chaque ouvrage, les classements des zones par profondeur de carbonatation croissante, sur la base des mesures réalisées par le LRPC. Ils serviront de référence pour les graphes d'évolution de la vitesse et de l'atténuation en fonction de la profondeur de carbonatation et de la porosité. Les valeurs de vitesse et d'atténuation ne sont pas présentées ici dans les tableaux par souci de clarté mais à la suite sur des graphiques suivant l'évolution de la carbonatation et de la porosité.

Le tableau IV.10 présente un classement analogue des zones par porosité décroissante. Il a été ajouté afin de voir si la méthode est également sensible à la porosité.

Carbonatation	1 (minimum)	2	3	4	5	6	7 (maximum)	Épaisseur carbo min/max (mm)
OA 1202A	3	4	1	2	-	-	-	0-17
OA 1204B	1/3	3/1	4	7	5/6	6/5	2	0-13
OA 1247	2	1	5	6/3	3/6	7	4	1-25
OA 1249	1/5	5/1	6	7	4	3	2	3-40

Tableau IV.9 : Classement des zones pour chaque ouvrage par épaisseur de carbonatation

croissante.

Porosité	1 (maximum)	2	3	4	5	6	7 (minimum)
OA	4	1	2	3	-	-	-
OA 1204B	5	3	1	6	2	7/4	4/7
OA 1247	1	7	2	5	6	4	3
OA 1249	1	7/2	2/7	5	6	4	3

Tableau IV.10 : Classement des zones pour chaque ouvrage par porosité décroissante.

Nous remarquons que les deux classements ne sont pas identiques, c'est-à-dire que la zone la plus carbonatée n'est pas toujours la moins poreuse. Cela montre que le lien entre la carbonatation et la porosité n'est pas simple.

De plus, les différences de carbonatation observées entre zones ne se retrouvent pas pour la porosité, qui apparaît sensiblement plus uniforme.

Les figures IV.7 à 10 présentent pour chaque ouvrage l'évolution de la vitesse et de l'atténuation suivant la profondeur de carbonatation et de la porosité. Nous remarquerons que certaines régressions linéaires n'ont aucun sens du fait de la dispersion de certaines valeurs en vitesse ou en atténuation.



Figure IV.7 : Evolution de la vitesse et de l'atténuation suivant la profondeur de carbonatation et de la porosité sur l'ouvrage OA 1202A.



Figure IV.8 : Evolution de la vitesse et de l'atténuation suivant la profondeur de carbonatation et de la porosité sur l'ouvrage OA 1204B.



Figure IV.9 : Evolution de la vitesse et de l'atténuation suivant la profondeur de carbonatation et de la porosité sur l'ouvrage OA 1247.



Figure IV.10 : Evolution de la vitesse et de l'atténuation suivant la profondeur de carbonatation et de la porosité sur l'ouvrage OA 1249.

A priori, la présence d'une zone carbonatée est de nature à augmenter la vitesse de propagation et à diminuer l'atténuation par remplissage de la porosité par un matériau consistant et inversement pour la porosité.

Sur l'ouvrage 1202A (fig. IV.7), la vitesse et l'atténuation évoluent dans le sens opposé en fonction de la profondeur de carbonatation croissante. Une légère tendance positive se dégage si on élimine la valeur de vitesse de la zone2 dans la diminution de la vitesse en fonction de la porosité croissante (R^2 =0,88 au lieu de 0,23). Il en est de même pour l'atténuation si on élimine la valeur de l'atténuation pour la zone4 (R^2 =0,7 au lieu de 0,4).

Sur l'ouvrage 1204B (fig. IV.8), la vitesse et l'atténuation évoluent dans tous les sens que se soit en fonction de la croissance de la profondeur de carbonatation ou de la porosité. Aucune tendance ne se dégage des zones de cet ouvrage.

Sur l'ouvrage 1247 (fig. IV.9), la vitesse et l'atténuation évoluent dans tous les sens en fonction de la croissance de la profondeur de carbonatation. Une légère tendance positive se dégage si on élimine les valeurs de vitesse de la zone2, 7 et 1 dans la diminution de la vitesse en fonction de la porosité croissante (R^2 =0,72 au lieu de 0,05). Il en est de même pour

l'atténuation si on ne prend que les valeurs des trois premières zones (zones3, 4 et 6) (R^2 =0,75 au lieu de 0,15).

Sur l'ouvrage 1249 (fig. IV.10), la vitesse et l'atténuation évoluent dans tous les sens en fonction de la croissance de la profondeur de carbonatation. Une légère tendance positive se dégage si on élimine les valeurs de vitesse de la zone 7 et 4 dans la diminution de la vitesse en fonction de la porosité croissante (R^2 =0,77 au lieu de 0,53). Il en est de même pour l'atténuation si on ne prend pas la zone 4 : une augmentation de l'atténuation avec la croissance de la porosité (R^2 =0,82 au lieu de 0,07).

Sur aucun des ouvrages, aucun des deux paramètres vitesse ou atténuation ne donne une évolution « correcte » dans le bon sens avec un bon coefficient de régression suivant la profondeur de carbonatation croissante. Les coefficients de régression linéaires sont très mauvais en profondeur de carbonatation ou en porosité. Ces coefficients sont améliorés en éliminant les valeurs inadéquates de vitesse ou d'atténuation suivant la porosité croissante. Finalement, la méthode ne donne aucune tendance bien visible. De plus, les différences de carbonatation observées selon les zones ne se retrouvent pas pour la porosité.

IV.3.4 Conclusion.

L'objectif des essais sur les ouvrages de l'A21 était d'évaluer la sensibilité de la méthode d'auscultation ultrasonore à haute fréquence à la carbonatation. Plus précisément, il s'agissait de classer correctement les ouvrages entre eux, ainsi que les zones d'un même ouvrage, en fonction de leur profondeur de carbonatation ou de leur porosité.

Etant donné la variabilité des profondeurs de carbonatation sur un même ouvrage, un classement des ouvrages entre eux ne semble pas pertinent. La méthode distingue quand même l'ouvrage OA1249 comme le plus carbonaté, ce qui est confirmé globalement par les essais du LRPC. En revanche, la méthode ne donne pas de tendance correcte d'évolution de la vitesse ou de l'atténuation des zones pour un ouvrage suivant la croissance de la profondeur de carbonatation ou de la porosité.

La capacité de la méthode, démontrée en laboratoire, n'est pas confirmée par l'étude de terrain. Les grandeurs acoustiques mesurées présentent une dispersion significative sur une même zone, dispersion qui est comparable à la différence des valeurs moyennes d'une zone à l'autre. L'imprécision des mesures peut être liée à la non répétitivité du couplage du récepteur. La version actuelle du dispositif, qui est équipé d'un récepteur sans contact, pourrait permettre d'éliminer cet inconvénient.

La carbonatation était le paramètre plus particulièrement étudié dans les ouvrages de l'A21, mais d'autres grandeurs sont susceptibles d'influer sur les mesures, comme : la porosité et la résistance du béton. En ce qui concerne la porosité, il apparaît qu'elle varie peu d'une zone à l'autre d'un ouvrage et qu'elle n'est pas toujours inversement proportionnelle à la carbonatation. De plus, il est probable que les caractéristiques du béton ne soient pas identiques pour tous les ouvrages, et peut-être aussi sur un même ouvrage. Ainsi, ces deux paramètres peuvent interférer dans la mesure. Notons enfin que les valeurs de référence de profondeur de carbonatation mesurée sur prélèvement ont été obtenues plusieurs années auparavant. Nous n'avons pas d'informations sur l'évolution de ces valeurs, ni la certitude que cette évolution est uniforme à l'échelle de l'ouvrage.

IV.4. Présentation des corps d'épreuve BHP 2000 de La Rochelle. IV.4.1 Introduction.

Cette partie fait état des résultats issus de la campagne de mesures sur les corps d'épreuve du projet BHP 2000 mis à disposition du projet RGCU. Ils ont été auscultés au cours de la campagne d'essais de mars 2004. Ces corps d'épreuve se situent à La Rochelle au pied de la Tour Saint-Nicolas dans une zone de marnage : les corps d'épreuve sont à sec à marée basse et immergés à marée haute.



Figure IV.11 : Vue des corps d'épreuve dans le port.

Durant cette campagne il était convenu entre les équipes liées au projet, de réaliser des mesures sur différents corps d'épreuve communs afin de pouvoir comparer les résultats des techniques. Les techniques et les corps d'épreuve retenus sont présentés au tableau IV.11.
	Capacité	Ra	dar	résis	stivité	potentiel	acoustique
	10*70 / 40*70	Cst diélec. et/o	u atténuation	Wenner	Q5 & Q10	Ucorr	Vson
	W%	W% e	t [sels]	W% e	et [sels]	corrosion	W%
	LCPC	LCPC	LMDC	LMDC	CDGA	LMDC	Eudil/ECL
M25-17	X	X	х	Х	X	Х	х
M50-17	X	X	х	x	x	х	x
M75-17	X	X	X	x	x	X	x
M75-17-E30	Х	Х	х	х		Х	х
M75-17-E15	х	Х	х	х		х	
M25CV					х		
M30CV					х		
M50CV					х		х
M75FS					х		
M75FS-E30					х		
M100FS					x		
M120FS					x		

Tableau IV.11 : Corps d'épreuve retenus et techniques utilisées.

Dans la première ligne sont données les différentes techniques utilisées, la deuxième ligne porte le type de mesure effectuée, la troisième ligne donne l'information a priori accessible et enfin les équipes concernées sont indiquées dans la quatrième ligne. Les croix indiquent que les mesures ont été faites sur ces corps d'épreuve.

IV.4.2 Présentation des corps d'épreuve et géométrie des mesures.

Les valeurs 25, 30, 50, 75, 100, et 120 sont les valeurs de définition des résistances en compression du béton. Rappelons que plus un béton est résistant et moins il est poreux. Les indications en E (E15 ou E30) sont des indications sur les enrobages (dans les zones à enrobages constants). Enfin CV indique une formulation avec Cendres Volantes et FS avec Fumée de Silice. Seuls trois éprouvettes ont été testées par toutes les méthodes M25-17, M50-17 et M75-17.

Les mesures sont réalisées au droit des profil P1 et P5 (fig. IV.13), pour deux positions de l'émetteur : respectivement aux intersections des profils P1 et P5 avec PB et PC. Nous nous sommes aussi intéressés aux zones où il y a présence de fissuration. Le profil P1 se situe dans une zone non fissurée. Par contre, les profils P5 et tranche se trouvent dans la zone de fissuration pour mettre en évidence l'influence éventuelle des fissures.



Figure IV.13 : Géométrie des corps d'épreuve BHP 2000 [RGC&U, 2005].

Les mesures ont été réalisées sur les faces orientées vers le large, sur la zone non armée, ainsi que sur la zone à enrobage variable et sur la tranche des corps d'épreuve.

Vu le temps disponible entre les marées et celui nécessaire à la réalisation des mesures, il n'a pas été possible de réaliser tous les profils souhaités. Pour certaines zones, il n'a pas été possible de mettre en position l'émetteur correctement à cause de trous ou de « traces » laissés par les coquillages lorsqu'ils ont été grattés.

Les mesures sont réalisées suivant deux lignes (fig. IV.13):

- la ligne 1 : émetteur au point C (intersection de P1 et P_C) et fin de réception au point B (intersection de P1 et P_B),

- la ligne 2 : émetteur au point B et fin de réception au point A (intersection de P1 et P_A).

Nous disposons également d'une zone avec fissuration et nous avons testé la sensibilité de la méthode à la fissuration sur corps d'épreuves immergés.

IV.4.3 Système de mesures.

L'onde de surface est générée par le système de la version 2 CHARIOT à savoir le transducteur émetteur avec contact et le récepteur sans contact mobile sur un chariot présenté au paragraphe II.4 du chapitre 2.

Les paramètres issus du traitement sont ceux de la version 2 : tableaux II.7 et 8 du paragraphe II.4.3 du chapitre 2 et plus particulièrement :

Type de paramètre	Symbole	Unité
Vitesse de groupe	V_g^{DF}	m/s
Vitesse de groupe par Slant Stack	V_g^{SS}	m/s
Vitesse moyenne + écartype	Vg	m/s

Tableau IV.12 : Vitesses acoustiques choisies pour l'étude.

Type de paramètre	Symbole	Unité
Atténuation « classique »	$\alpha_c (f_{o})$	dB/m
Atténuation à la fréquence centrale	a_moy_(f_centr)	dB/m
Atténuation moyenne	$lpha_{moyen}$	dB/m

Tableau IV.13 : Atténuations acoustiques choisies pour l'étude.



Figure IV.14 : Exemple de profil P1et de profil sur la tranche avec une fissure surlignée en blanc sur la dalle M50-17.

La détermination d'une vitesse est faite sur la base de 50 mesures : distances émetteur – récepteur variant sur 25cm avec un pas de 0,5cm, selon la direction du profil.

IV.4.4 Résultats.

Dans le cadre de cette étude il s'agit de tester la sensibilité de la méthode à la teneur en eau des bétons, ou à la présence de sels. Le raisonnement repose ici sur le fait que plus la porosité du béton contient de l'eau plus la vitesse dans le matériau est élevée. En terme d'atténuation, plus il y a d'eau moins le signal est atténué.

D'autre part, l'interprétation des résultats peut aussi être menée en terme de vitesse (plus la vitesse de propagation est élevée, plus le matériau est compact et présente de bonnes caractéristiques mécaniques) et en terme d'atténuation (moins il y a d'atténuation, plus le matériau est compact et homogène).

Vitesses (m/s)	M25-17	M50-17	M50CV-17	M75-17	M75-17E15
Ligne 1	2500 (3%)	2700 (3%)	2800 (4%)	3080 (3%)	3020 (2%)
Ligne 2	2160 (5%)	2600 (3%)	2600 (3%)	3000 (4%)	*
Moyenne	2330	2650	2700	3040	3020

Tableau IV.14 : Vitesses obtenues sur P1 pour les différents corps d'épreuve.

(* : mesures impossibles)



Figure IV.15 : Evolution de la vitesse en fonction de la résistance du béton.

La figure IV.15 montre une augmentation de la vitesse des ondes de surface avec la résistance du béton et l'on distingue bien les différentes classes de résistance M25, M50 et M75. En comparant maintenant les vitesses obtenues pour les lignes 1 et 2 (tab. IV.14), une légère tendance montre une décroissance des vitesses de A (ligne 2) vers C (ligne1). Cela doit traduire une teneur en eau plus importante à la base des corps d'épreuve. Comme les corps d'épreuve sont noyés dans l'eau de mer, dès que la marée se retire, l'eau commence à partir dans la partie haute. Signalons toutefois qu'il ne s'agit que d'une tendance qu'il est prudent de ne pas généraliser trop vite étant donné le petit nombre de profils (deux sur la hauteur).

Atténuation (dB/m)	M25-17	M50-17	M50CV-17	M75-17	M75-17E15
Ligne 1	69	35	**	32	*
Ligne 2	**	23	40	22	**
moyenne	69	29	40	27	**

Tableau IV.15 : Atténuations obtenues sur P1 pour les différents corps d'épreuve.

(* : mesures impossibles), (** : calcul impossible)



Figure IV.16 : Evolution de l'atténuation en fonction de la résistance du béton.

La figure IV.16 montre une diminution de l'atténuation avec la résistance du béton mais cette diminution est moins marquée pour les classes de résistance M50 et M75. En comparant maintenant les atténuations obtenues pour les lignes 1 et 2 (tab. IV.15), une légère tendance montre une décroissance des vitesses de A (ligne 2) vers C (ligne1) pour les corps d'épreuve M50-17 et M75-17 traduisant là encore une dé-saturation plus importante ou plus rapide entre deux marées. Ceci ne peut pas être vérifié pour les autres corps d'épreuve à cause de la mesure ou du calcul impossible de l'atténuation.

IV.4.5 Conclusion.

Les mesures dans des conditions aussi difficiles n'ont pas pu être possibles à chaque fois. Cela explique les profils manquants dans les résultats présentés ci-dessus, illustrant la sensibilité aux conditions de surface de la technique à ce stade du développement.

La perturbation des mesures par l'état de surface n'a pas permis de déterminer l'atténuation pour chaque ligne de mesures sur 3 corps d'épreuve.

L'étude a été motivée par la possibilité d'étudier l'influence de l'eau et des chlorures. Mais les mesures ultrasonores ne sont pas sensibles à la teneur en chlorures, mais présentent une dépendance à l'état de saturation du matériau et à la résistance du béton.

La technique a permis de distinguer les trois compositions de bétons M25, M50 et M75. De plus, les mesures ultrasonores font ressortir l'existence d'un gradient de propriétés sur la

hauteur des corps d'épreuve : vitesse plus lente et atténuation acoustique plus élevée en partie haute, plus vite séchée que la base.



IV.4.6 Fissuration.

Figure IV.17 : Situation des fissures pour tous les corps d'épreuve (tranche, P5).

Pour détecter la présence de fissures, nous utilisons la même procédure que celle utilisée pour les dalles à fissuration contrôlée de laboratoire vues au chapitre 3, paragraphe III.7.4. Le détail du traitement de localisation des fissures est présenté en Annexe IV.17 à 21.



Figure IV.18 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M25-17.

Sur la tranche du corps d'épreuve M25-17 (fig. IV.18), une fissure est visible à l'œil nu au point de réception 2 que l'on retrouve dans le traitement de localisation de fissure. Ce traitement signale aussi une autre fissure au point 7 invisible à l'œil nu (cercle bleu). Pour le

P5, une fissure est visible au point 5, que l'on retrouve aussi par traitement. De même le traitement signale deux autres fissures invisibles aux points 10 et 16 (cercle bleu).



Figure IV.19 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M50-17.

Sur la tranche du corps d'épreuve M50-17 (fig. IV.19), une fissure est visible à l'œil nu au point de réception 16 que l'on retrouve dans le traitement de localisation de fissure. Pour le P5, une fissure est visible aux points 6 et 13, que l'on retrouve aussi par traitement. Il n'y a pas de fissure invisible ici.



Figure IV.20 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M75-17.

Sur la tranche du corps d'épreuve M75-17 (fig. IV.20), une fissure est visible à l'œil nu au point de réception 11 que l'on retrouve dans le traitement de localisation de fissure. Pour le P5, une fissure est visible au point 15 que l'on retrouve aussi par traitement. De plus, le traitement nous signale la présence d'une fissure au point 10 invisible à l'œil nu (cercle bleu). Encore une fois, le traitement nous signale la présence d'une fissure d'une fissure invisible.



Figure IV.21 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M50CV-17.

Sur la tranche du corps d'épreuve M50CV-17 (fig. IV.21), deux fissures sont visibles à l'œil nu aux points de réception 22 et 24 que l'on retrouve dans le traitement de localisation de fissure. Ce même traitement nous signale la présence de trois autres fissures invisibles aux points 7, 14 et 19 (cercle bleu). Pour le P5, une fissure importante est visible au point 7, que l'on retrouve aussi par traitement. Le traitement met bien en évidence l'importante ouverture de cette fissure.



Figure IV.22 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M75-17E15.

Sur la tranche du corps d'épreuve M75-17E15 (fig. IV.22), deux fissures sont visibles à l'œil nu aux points de réception 22 et 25, que l'on retrouve dans le traitement de localisation de fissure. Ce même traitement nous signale la présence de deux autres fissures invisibles aux points 11 et 16 (cercle bleu). Pour le P5, aucune fissure visible ou invisible n'est signalée.

IV.4.7 Conclusion.

Cette campagne de mesure sur corps d'épreuve peut être aisément rapprochée de mesures sur ouvrage, étant donné le mode de conservation des éprouvettes (totalement identique à celui d'un ouvrage en bord de mer dans la zone de marnage).

Les mesures dans des conditions aussi difficiles n'ont pas pu être possibles à chaque fois. Cela explique les profils manquants dans les résultats présentés ci-dessus, illustrant la sensibilité aux conditions de surface de la technique à ce stade du développement.

Les mesures ultrasonores ne sont pas sensibles à la teneur en chlorures, mais présentent une dépendance à l'état de saturation du matériau et à la résistance du béton. En effet, la technique a en effet permis de distinguer les trois compositions de bétons M25, M50 et M75.

Les mesures ultrasonores font ressortir l'existence d'un gradient de propriétés sur la hauteur des corps d'épreuve : vitesse plus lente et atténuation acoustique plus élevée en partie haute, plus vite séchée que la base.

Il apparaît que les résultats sont en partie liés à la résistance du béton, mais aussi et surtout à la quantité totale d'eau contenue dans la porosité. Plus le béton est poreux, plus la quantité d'eau dans le matériau saturé est importante (et donc la quantité de chlorures aussi).

Cette hypothèse sur l'effet de la porosité est appuyée par les observations sur la « dynamique de désaturation » observée sur les trois classes de résistance considérées. Le M25 (porosité plus ouverte) va sécher en surface plus rapidement que le M50, et encore plus que le M75 (le plus compact). C'est un moyen indirect d'accéder à la porosité.

La technique nous a permis également de mettre en évidence la fissuration présente sur les corps d'épreuve, qui avaient été conçus dans ce sens dans le projet BHP 2000. Sur certaines zones, le traitement a permis de détecter un certain nombre de fissures invisibles à l'œil nu. Cela est donc très encourageant pour la détection de fissures sur ouvrage réel.

IV.5. Présentation de la tranchée couverte ASF (A63) à Guéthary (64). IV.5.1 Présentation de l'ouvrage.

Il s'agit d'une tranchée couverte de 96 m de long, située sur l'autoroute A63 (deux fois deux voies de circulation) au niveau de la commune de Guéthary (64) (fig. IV.23).



Figure IV.23 : Localisation de la tranchée couverte de Guéthary.

Des éclatements du béton ont été relevés à la base du piédroit central de l'ouvrage (fig. IV.24) et cette pathologie a fortement évolué depuis 2000.



Figure IV.24 : Exemples d'éclatements de béton.

IV.5.2 Organisation et géométrie de mesures.

Une première investigation visuelle et radar, réalisé par le LMDC de Toulouse, a consisté en la mesure de trois profils radar horizontaux à 60, 100 et 140cm de hauteur avec une antenne centrée sur 1,5 GHz sur toute la longueur du piédroit de la travée centrale (sens Espagne – Bordeaux). Le traitement in situ a porté sur le calcul de l'amplitude de la première demialternance de l'onde directe (choix des bornes 1,4 à 1,83 ns).

L'objet de ces premières mesures était de cibler quelques zones tests, présentant différentes réponses radar (zones plus ou moins atténuantes).

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Atténuation de	Faible en haut	Zone homogène à	Zone homogène à	Forte en haut
l'onde EM	Forte en bas	forte atténuation	faible atténuation	Faible en bas
Défaut visuel	/	/	Eclatement en bas	/

Tableau IV.16 : Présentation préliminaire des zones [RGC&U, 2005].

Ce tableau IV.16 présente les conclusions tirées en première approche des variations de l'atténuation de l'onde radar et la figure IV.25 situe les différentes zones de mesure sur le mur de la tranchée.



Figure IV.25 : Vue de la zone 0, photos du transducteur récepteur et du système d'acquisition de mesures.

Des premières mesures de référence ont été réalisées sur une zone nommée 0, supposée « saine », qui ne présente aucune altération visible et qui se trouve à 1m de l'entrée de la tranchée dans le sens Espagne-France.

Sur cet ouvrage, nous cherchons à caractériser une altération inconnue en supposant qu'elle est plus probable dans les zones humides. Pour cela nous cherchons à caractériser les variations, liées à cette présence d'eau, de propriétés à l'intérieur d'une même zone et entre zones. A priori, plus la quantité d'eau dans la porosité du béton est importante et plus la vitesse de l'onde de surface est grande, et son atténuation est faible. On peut donc penser que des défauts seront révélés par des vitesses plus lentes.

Nous avons réalisé les mesures sur les zones définies dans le tableau IV.16 suivant deux lignes horizontale et verticale. Chaque ligne a été découpée en trois profils (fig. IV.26). Après avoir placé l'émetteur, le récepteur est placé à 5cm de l'émetteur puis déplacé d'un pas de 0,5cm jusqu'à terminer le profil. Ensuite l'émetteur est déplacé et l'enregistrement des signaux redémarre.



Figure IV.26 : Situation des trois profils de mesures sur la ligne verticale et horizontale pour toutes les zones.

L'onde de surface est générée par le système de la version 2 CHARIOT à savoir le transducteur émetteur avec contact et le récepteur sans contact mobile sur un chariot présenté au paragraphe II.4 du chapitre 2.

Les paramètres issus du traitement sont ceux de la version 2 : tableaux II.7 et 8 du paragraphe II.4.3 du chapitre 2 et plus particulièrement :

Type de paramètre	Symbole	Unité
Vitesse de groupe	V _g ^{DF}	m/s
Vitesse de groupe par Slant Stack	V_g^{SS}	m/s
Vitesse moyenne + écartype	Vg	m/s

Tableau IV.17 : Vitesses acoustiques choisis pour l'étude.

Type de paramètre	Symbole	Unité
Atténuation « classique »	$lpha_c (f_{o})$	dB/m
Atténuation à la fréquence centrale	a_moy_(f_centr)	dB/m
Atténuation moyenne	$lpha_{moven}$	dB/m

Tableau IV.18 : Atténuations acoustiques choisis pour l'étude.

IV.5.3 Résultats.

Sur chaque zone, trois profils acoustiques verticaux et horizontaux ont été réalisés (profil 1, profil 2 et profil 3). Pour chaque profil, nous calculons la vitesse moyenne de l'onde à partir des vitesses obtenues à partir des positions successives. Nous avons alors trois mesures de vitesses par zone. Puis, à partir de ces trois valeurs de vitesse, on calcule une valeur moyenne pour l'ensemble de la zone. Pour la zone 4, il n'a pas été possible de réaliser les mesures au profil 1 à cause de l'éclatement du béton.

Profils verticaux	Vitesses (m/s) et écart-type				
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	
Profil 1	2353 (2%)	2748 (2%)	2385 (2%)	*	
Profil 2	2860 (2%)	2688 (2%)	2655 (2%)	3268 (2%)	
Profil 3	2646 (3%)	2770 (3%)	2539 (2%)	2697 (2%)	
Moyenne	2620	2735	2526	2983	
Profils horizontaux	V	/itesses (m/s)) et écart-type	e	
Profils horizontaux	Zone 1	Vitesses (m/s) Zone 2) et écart-type Zone 3	e Zone 4	
Profils horizontaux Profil 1	Zone 1 2473 (4%)	Vitesses (m/s) Zone 2 2344 (5%)) et écart-type Zone 3 2546 (4%)	e Zone 4 2409 (3%)	
Profils horizontaux Profil 1 Profil 2	Zone 1 2473 (4%) 2492 (5%)	Vitesses (m/s) Zone 2 2344 (5%) 2427 (4%)) et écart-type Zone 3 2546 (4%) 2399 (2%)	e Zone 4 2409 (3%) 2378 (4%)	
Profils horizontaux Profil 1 Profil 2 Profil 3	Zone 1 2473 (4%) 2492 (5%) 2354 (4%)	Vitesses (m/s) Zone 2 2344 (5%) 2427 (4%) 2451 (5%)) et écart-type Zone 3 2546 (4%) 2399 (2%) 2587 (5%)	e Zone 4 2409 (3%) 2378 (4%) 2640 (4%)	

 Tableau IV.19 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux et horizontaux (* : mesures impossibles).



Zone 2

Zone 3

2511

□ profil 1 ■ profil 2 □ profil 3 □ moyenne

Figure IV.27 : Vitesses obtenues sur les profils verticaux.

Zone 4

2476

Zone 4

2000

1800

3400

3200

3000

2800

2400

2200

2000

1800

vitesse (m/s)

Zone 1

2440

Zone 1

Figure IV.28 : Vitesses obtenues sur les profils horizontaux.

Zone 2

2407

I

Zone 3

Pour les profils verticaux, nous constatons que seule la zone 2 apparaît homogène en terme de vitesse, avec une vitesse moyenne de 2735 m/s. Les trois autres zones sont hétérogènes et ne font pas apparaître clairement de gradient horizontal continu.

Si l'on tient compte des faibles écart-types des profils verticaux et horizontaux, on peut considérer que toutes les zones sont homogènes en terme de vitesses sauf la zone 4 pour les profils verticaux. Si nous classons maintenant les différentes zones des profils horizontaux selon leur vitesse en valeur croissante, nous avons l'ordre suivant : 2, 1, 4, 3. En d'autres termes, la zone 3 est la plus humide, alors que la zone 2 apparaît comme la plus sèche. Ces observations sont en contradiction avec les observations visuelles.

Il faut de plus remarquer que l'ordre de grandeur des vitesses moyennes est assez différent selon que le profil soit vertical ou horizontal, à l'exception de la zone 3.

Intéressons nous maintenant à l'atténuation.

Profils verticaux	Atténuation (dB/m)				
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	
Profil 1	50	50	**	*	
Profil 2	86	**	36	28	
Profil 3	**	**	50	77	
Moyenne	68	50	43	53	
Profils horizontaux	1	Atténuatio	on (dB/m))	
Profils horizontaux	Zone 1	Atténuatio Zone 2	on (dB/m) Zone 3) Zone 4	
Profils horizontaux Profil 1	Zone 1 133	Atténuatio Zone 2 50	on (dB/m) Zone 3 100) Zone 4 65	
Profils horizontaux Profil 1 Profil 2	Zone 1 133 60	Atténuatio Zone 2 50 60	on (dB/m) Zone 3 100 110) Zone 4 65 67	
Profils horizontaux Profil 1 Profil 2 Profil 3	Zone 1 133 60 55	Atténuatio Zone 2 50 60 40	on (dB/m) Zone 3 100 110 100) Zone 4 65 67 71	

Tableau IV.20 : Atténuations obtenues sur les profils verticaux et horizontaux(* : mesures impossibles, ** : calculs impossibles).



Figure IV.29 : Atténuations obtenues sur les profils verticaux.



Figure IV.30 : Atténuations obtenues sur les profils horizontaux.

La figure IV.29 montre que les résultats sur les profils verticaux ne comportent pas suffisamment de valeurs pour être exploitables. Les sept valeurs restantes ne sont pas représentatives. La figure IV.30 montre que les résultats sur les profils horizontaux présentent une bonne homogénéité pour les zones 2, 3 et 4. La zone 2 se distingue par une atténuation moyenne plus faible et la zone 3 par une atténuation moyenne plus importante. Le profil 1 de la zone 1 signale la présence d'une partie plus atténuante ce qui pourrait être du à la dégradation du béton.

En comparant les atténuations moyennes des profils verticaux et horizontaux en excluant la valeur du profil 1 de la zone 1, nous obtenons : 2, 1, 4 et 3. Ce classement est le même que celui établi précédemment avec les résultats des vitesses acoustiques sur les profils horizontaux.

IV.5.4 Conclusion.

Les résultats des mesures acoustiques font apparaître des valeurs de vitesses assez proches selon les zones pour l'orientation horizontale et plus dispersées pour l'orientation verticale. En termes d'atténuations, les résultats sont plus dispersés.

En tenant compte de l'homogénéité des résultats des mesures effectuées dans le sens horizontal, on peut classer les zones de la façon suivante (vitesse croissante ou atténuation décroissante) : 2, 1, 4, 3...La zone 2 apparaît comme étant la plus humide, alors que la zone 3 apparaît comme étant la plus sèche. Cela valide les observations visuelles faites lors des mesures.

Seule la zone 2 donne des résultats homogènes sur toute sa surface. C'est également une zone peu atténuante. Pour les autres zones, il est difficile de relever la présence d'un gradient vertical continu, comme l'avaient suggéré les premières investigations radar.

Pour cet ouvrage, les mesures avaient été réalisées dans le but de caractériser une altération inconnue. Il a été supposé, au vu des observations de terrain, que les altérations sont plus probables dans les zones humides. Pour améliorer l'interprétation des mesures ultrasonores, il aurait été nécessaire de les corréler avec des mesures de porosité, de teneur en eau, de scléromètre,...

IV.6. Pont de la Marque. IV.6.1 Introduction.

Cette campagne de mesures s'est déroulée sur le pont de la Marque (59) situé en périphérie de Lille (fig. IV.31) et a porté sur un des chevêtres et sur une pile du pont.

Sur ce site, ont été testés :

- l'aptitude des différents appareils utilisés à la réalisation de mesures sur site dans des conditions difficiles,

- la capacité à qualifier l'état d'altération d'un matériau, et notamment la détection d'une zone siège d'une réaction alcali granulat.



Figure IV.31 : Situation du pont de la Marque.

IV.6.2 Présentation de l'ouvrage.

Le pont de la Marque est un pont biais en béton comprenant deux piles et deux culées qui portent un tablier en béton armé large de 13,40m. Celui-ci a trois travées de 10 m - 14,20 m - 10 m. Le pont a été construit fin 1984, début 1985. Il a été réceptionné le 14/10/85.

Des désordres, flèche importante et fissures anormales, ont été constatés dès 1995 et ont entraîné une action en justice du CG 59 contre les entreprises et bureaux d'étude constructeurs. Une série d'expertises et d'études ont permis de conclure que la flèche excessive était due à un manque de contre flèche initiale et que les fissurations étaient dues dans le tablier à une réaction sulfatique en profondeur d'origine endogène, et dans le chevêtre à de la réaction alcali-granulat, activées par les infiltrations d'eau.

Cet ouvrage n'a pas donné lieu à des réparations particulières autres que la réfection de l'enrobé. Il est donc particulièrement intéressant car il présente une fissuration de type gonflement contrastée sur l'ouvrage, et que les expertises ont induit des carottages et des analyses précieux pour l'interprétation des résultats.

IV.6.3 Définition des zones de mesures.

Le pont est un pont biais franchissant un cours d'eau La Marque (fig. IV.32) selon les repères suivants :

- rive gauche = rive Ouest = côté Villeneuve d'Ascq,
- rive droite = rive Est = côté Lannoy,
- la rivière coule du Sud vers le Nord.

La zone investiguée est le chevêtre Ouest ou rive Gauche dont une partie située entre 9,8 m et 12,4 m à partir du bord aval est le siége d'une réaction alcali-granulat avérée. Il a été étudié selon un profil horizontal positionné à mi-distance de deux niveaux d'armatures longitudinales. Les distances sont comptées en mètres à partir du bord droit, c'est à dire aval. Il a été décidé d'effectuer une mesure tous les 20 cm sur une longueur de chevêtre de 12,60 m, au milieu entre les armatures transversales.



Figure IV.32 : Vue générale du pont de La Marque depuis l'aval.

IV.6.4 Système et géométrie de mesures.

L'onde de surface est générée à l'aide du système de la version 3 ROBOT émetteur avec contact automatisé et récepteur sans contact automatisé présenté au paragraphe II.5 du chapitre 2. Le couplage entre l'association émetteur transducteur-coin et la surface du béton se fait par l'intermédiaire d'un gel.

La figure IV.33 présente le maillage réalisé sur le chevêtre du pont. Le chevêtre est découpé en douze zones de 1m chacune. Chaque zone est découpée en cinq petites zones de 20cm délimitées par les armatures. Le robot est placé entre les armatures.



Figure IV.33 : Maillage de mesure sur le chevêtre.

Les paramètres de traitement des signaux sont issues des tableaux II.9 à 11 du paragraphe II.5.2 du chapitre 2 et plus particulièrement :

	Type de paramètre	Symbole	Unité	
	Vitesse moyenne de groupe par slant stack	V_gr_SL	m/s	
Tab	leau IV.21 : Paramètres choisis pour étudier	r la vitesse	acousti	que.

Type de paramètre	Symbole	Unité
Atténuation à la fréquence choisie + écartype	a_moy_(f_choisie)	dB/m
Atténuation à la fréquence centrale	a_moy_(f_centr)	dB/m
Atténuation maximale et minimale par régression linéaire +	a_r_L_min	dB/m
facteur de corrélation	a_r_L_max	
Atténuation + facteur de corrélation	A_r_L_abs	dB/m
Atténuation maximale et minimale par régression non linéaire	a_r_NL_min	dB/m
	a_r_NL_max	
Atténuation par régression non linéaire	a_r_NL_abs	dB/m
Atténuation moyenne + écartype	alfa moy	dB/m
	,• ,•	

Tableau IV.22 : Paramètres choisis pour étudier l'atténuation acoustique.

Chaque point de mesure sur le chevêtre est constitué de l'analyse d'une série de dix signaux. L'enregistrement de ces dix signaux s'effectue pour une position fixe de l'émetteur et dix positions de récepteur espacées de 1 cm à partir d'une distance émetteur récepteur de 5 cm. Il y a ainsi une soixantaine de points de mesures sur le chevêtre espacés en moyenne de 20cm.

IV.6.5 Résultats.

A priori, la réaction alcali granulat provoque une altération mécanique du béton qui devrait se traduire par une diminution de la vitesse de propagation des ondes de surfaces ultrasonores.

Les résultats présentés en figure IV.34 représentent la vitesse de l'onde de surface le long du chevêtre. Ces valeurs de vitesse ont été calculées en combinant les signaux reçus pour une position d'émetteur et dix positions de récepteur sur chaque zone délimitée par deux lits verticaux d'armatures. Il faut noter qu'il y a une très faible variation de ces valeurs de vitesse quel que soit le traitement utilisé. C'est pourquoi nous avons choisi de ne présenter ici que les valeurs de vitesses obtenues par la méthode de slant-stack. Pour les vitesses obtenues par les autres méthodes de traitement, un exemple de graphe est présenté en Annexe IV.23.

Pour mettre en évidence les tendances de ces mesures d'amplitudes nous avons tracé la moyenne mobile de ces résultats pour une période égale à 3 (courbe noire fig. IV.34). Une zone de plus faible amplitude se situe entre 9,8 et 12,60m sur cette partie du chevêtre correspondant à la zone de réaction alcali-granulat avérée.

Compte tenu de la dispersion des mesures présentées figure IV.34, il est difficile de détecter la zone de réaction alcali granulat avérée. Il faut rappeler savoir qu'une augmentation de la teneur en eau dans un béton entraîne une augmentation de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Il est donc probable que la diminution de la vitesse de propagation des ondes de surface causée par l'alcali-réaction soit compensée par la présence d'eau dans les fissures internes du béton dégradé.



Figure IV.34 : Vitesse (slant stack) et moyenne mobile de période égale à 3 (courbe noire).

Ceci se confirme visuellement par la présence de fissures et par en plus deux carottages rebouchés (fig. IV.35). Un autre graphe de résultats en vitesse est présenté en Annexe IV.22.



Figure IV.35 : Vues des carottages et des fissure sur la zone d'alcali-réaction.

Il est également intéressant de suivre l'atténuation qui devrait augmenter en présence d'alcaliréaction générant de la fissure.



Figure IV.36 : Atténuation moyenne obtenue sur les zones du chevêtre.

La figure IV.36 montre que l'atténuation permet de distinguer la zone d'alcali-réaction de façon plus nette que la vitesse. En effet, les zones 10 à 12 présentent une atténuation beaucoup plus importante.

IV.6.6 Conclusion.

De façon générale, la vitesse d'onde de surface ultrasonore est influencée par deux phénomènes ayant des conséquences opposées : l'endommagement mécanique ou fissuration ayant pour effet de diminuer la vitesse de propagation alors que la forte teneur en eau dans les fissures a pour effet d'augmenter cette vitesse. Il en est de même pour l'atténuation, l'endommagement mécanique ayant pour effet d'augmenter l'atténuation alors que la teneur en eau a pour effet de la diminuer.

Des études en laboratoire sont nécessaires pour quantifier les effets respectifs de ces deux phénomènes. Cette quantification pourrait permettre de pousser le couplage de ces techniques en vue d'une détection indirecte d'une zone de réaction alcali granulat comme cela a été tenté dans cette étude par la soustraction de l'effet de l'eau sur la vitesse de propagation des ondes de surface ultrasonores. Le même principe pourrait être utilisé pour l'atténuation.

IV.7 Conclusion du chapitre.

Les essais de laboratoire présentés au chapitre précèdent ont permis de valider la technique pour plusieurs types de dégradation comme la carbonatation, la fissuration,...

Nous avons constaté que :

- la méthode « slant stack » semble être la plus précise pour la détermination de la caractéristique de dispersion de la vitesse de phase et de la vitesse de groupe lorsque les données ont un faible rapport signal/bruit,

- l'atténuation exprimée par la valeur du coefficient d'atténuation au centre de l'intervalle fréquentiel de validité semble la plus représentative. La pente de la caractéristique d'atténuation et l'indice de décalage de la fréquence donnent par contre des résultats plutôt erronés.

L'objectif des essais sur les ouvrages de l'A21 était d'évaluer la sensibilité de la méthode d'auscultation ultrasonore à haute fréquence à la carbonatation du béton. Plus précisément, il s'agissait de classer correctement les ouvrages entre eux, ainsi que les zones d'un même ouvrage, en fonction de leur profondeur de carbonatation ou de la porosité.

Etant donné la variabilité des profondeurs carbonatées selon les zones d'un même ouvrage, un classement des ouvrages entre eux ne semble pas pertinent. La méthode distingue néanmoins l'ouvrage OA1249 comme le plus carbonaté, ce qui est confirmé globalement par les tests sur prélèvement. En revanche, la méthode ne donne pas de classement correct des zones d'un même ouvrage.

Ce constat fait apparaître les limites de la méthode ultrasonore in situ. La capacité de la méthode, démontrée en laboratoire, n'est pas confirmée par l'étude de terrain. Les grandeurs acoustiques mesurées présentent une dispersion significative sur une même zone, dispersion qui est comparable à la différence des valeurs moyennes d'une zone à l'autre. L'imprécision des mesures peut être liée à la non répétitivité du couplage du récepteur. On peut penser que la version actuelle du dispositif, qui est équipé d'un récepteur sans contact, permettrait d'éliminer cet inconvénient.

La carbonatation est la pathologie particulièrement étudiée dans les ouvrages de l'A21, mais d'autres paramètres ont pu influer sur les mesures, comme la porosité et la résistance du béton.

La vitesse de l'onde de surface est influencée par deux facteurs ; l'endommagement mécanique ou l'augmentation de porosité qui diminue la vitesse de propagation alors que la teneur en eau l'augmente. Il en est de même mais de façon inverse pour l'atténuation.

Sur les corps d'épreuve de La Rochelle, les mesures ultrasonores ne sont pas sensibles à la teneur en chlorures, mais à l'état de saturation et à la résistance du béton. La technique a permis de distinguer les trois compositions de bétons M25, M50 et M75. De plus, les mesures ultrasonores font ressortir l'existence d'un gradient de propriétés sur la hauteur des corps d'épreuve avec une vitesse plus lente et une atténuation acoustique plus élevée au sommet. Ceci incite à penser que la base des éléments est plus humide que le sommet, ce qui s'explique par le fait que cette partie est plus vite à l'air quand la marée descend, donc plus vite desaturée.

La technique nous a aussi permis de mettre en évidence la fissuration présente sur les parties des corps d'épreuve prévues à cet effet. Sur certaines zones, le traitement a permis de détecter un certain nombre de fissures invisibles à l'œil nu. Cela est très encourageant pour la détection de fissures sur ouvrage réel.

Pour la tranchée couverte de Guéthary, les résultats des mesures acoustiques font apparaître des ordres de grandeur très proches en termes d'atténuation entre les différentes zones, et pour les deux orientations verticale et horizontale. En termes de vitesse, les résultats sont plus dispersés.

En tenant compte de l'homogénéité des résultats dans le sens horizontal, nous avons classé les zones de la façon suivante (par vitesse croissante ou atténuation décroissante) : 2, 1, 4, 3... La zone 2 apparaît donc comme la plus humide, et la zone 3 comme la plus sèche. Cela valide les observations visuelles faites lors des mesures.

Pour cet ouvrage, les mesures ont été réalisées dans le but de caractériser une altération inconnue. Il a été supposé que les altérations sont plus probables dans les zones humides. La délimitation des zones a été réalisée au préalable à partir de résultats de mesures radar n'est donc pas le plus adapté pour notre validation. Le zonage est très subjectif.

Nous verrons dans la partie suivante le couplage entre les différentes méthodes de CND.

CHAPITRE 5 : Couplage de méthodes de CND

V.1. Introduction.

Ce chapitre reprend des éléments du rapport final du projet RGCU de mars 2005 concernant la synthèse des possibilités de couplage de techniques non destructives.

Dans un premier temps, les objectifs et les apports des différentes méthodes de CND seront distinguées. Les objectifs du CND peuvent être classés ainsi :

- (A) détecter (une variation des propriétés – à l'intérieur d'un ouvrage ou entre deux ouvrages -, un défaut)

- (B) quantifier de façon relative les propriétés – c'est-à-dire être capable d'établir une hiérarchie dans ces propriétés – entre zones d'un ouvrage ou entre ouvrages

- (C) quantifier dans l'absolu les propriétés, ce qui permet de comparer les résultats à des valeurs de références, définies par ailleurs.

Et le couplage des techniques peut apporter une plus-value en terme de :

- précision des estimations faites sur les propriétés,
- pertinence des explications physiques,
- rapidité d'obtention des conclusions.

Le croisement des objectifs et des plus-values possibles définit neuf types possibles de contribution du couplage (tableau V.1). Par exemple, on pourra effectuer un zonage ou un classement en choisissant la méthode qui a une très bonne précision ou une très grande rapidité.

	précision	pertinence explications	rapidité
détection	A1. précision de	A2. pertinence des	A3. rapidité de
	détection (amélioration	causes supposées	détection
	des seuils, diminution		
	des fausses alarmes)		
zonage,	B1. amélioration du	B2. pertinence de	B3. de zonage ou de
classement	classement ou du	l'explication des	classement
	zonage	variations	
quantification	C1. précision de la	C2. pertinence de	C3. rapidité de
absolue	quantification	l'explication et du	quantification
		positionnement par	
		rapport à des valeurs	
		limites	

 Tableau V.1 : Contribution du couplage issue du croisement des objectifs et des plus-values possibles. [RGC&U, 2005]

V.2. Méthodologie d'analyse des possibilités de couplage.

La mise en œuvre répétée au cours du projet RGC&U de plusieurs techniques utilisées simultanément sur les mêmes ouvrages ou corps d'épreuve a conduit à envisager les modes de valorisation suivants :

- mode [1] : confrontation des résultats pour confirmer les mesures et leurs variations relatives (A1-B1),

 mode [2] : confrontation des résultats pour affiner l'interprétation des variations (A2-B2-C2),

- mode [3] : utilisation successive d'une technique rapide et d'une technique plus lente et plus précise dans les zones repérées par la première technique (A3-B3),

- mode [4] : utilisation d'une deuxième technique pour identifier un paramètre complémentaire, qui influence le résultat de la première technique, sans être le paramètre recherché a priori. Cela revient à éliminer un facteur de biais pour améliorer la précision (A1-B1, voire C1) et à améliorer les interprétations (A2-B2-C2).

Les trois premiers modes de valorisation correspondent à une utilisation éclairée mais somme toute classique du CND. Nous y avons eu recours à de nombreuses reprises, comme nous le verrons dans les analyses ci-dessous.

Un Etat de l'Art récent (travail collectif d'un Groupe AFGC, sous la coordination de D. Breysse et O. Abraham, auquel ont participé plusieurs équipes du Projet RGC&U, et dont les résultats ont été publiés par les Presses de l'ENPC, permet de disposer de tableaux synthétiques définissant le degré de sensibilité des techniques par rapport aux paramètres étudiés.

Le tableau ci-dessous est extrait des conclusions du Groupe de Travail. Nous avons retenu les seules techniques employées dans le Projet et les défauts ou propriétés que nous souhaitons analyser.

	Radar	Capacité	Résistivité	Ultrasons	Thermographie I.R.
Armatures	B, A		А		
Teneur en chlorures	С		С		
Teneur en eau	В	А	В	С	В
Profondeur de délamination	В		В	С	A (par extension), B
Microfissuration, endommagement			В	С	С
Résistance du béton			С	С	

Tableau V.2 : Sensibilité attendue des techniques aux défauts et/ou propriétés :A = détection, B = quantification relative, C = quantification absolue. [RGC&U, 2005]

Dans ce chapitre, nous passerons en revue l'ensemble des campagnes expérimentales du projet (ouvrages ou corps d'épreuve) sans voir les résultats en détail (ceux-ci ayant été exposés et analysés dans les chapitres précédents de la thèse pour la techniques ultrasonore et dans le rapport final de mars 2005 pour les autres techniques).

Pour chaque campagne, on procèdera de manière identique :

- identification des « a priori » avant étude,

- tableau récapitulatif de la sensibilité de la technique à la propriété/au défaut avec les codes suivants : [++], [+], [0], [-] ou [--],

le code indique le sens et le degré de sensibilité. Si l'on note dG/dP la dérivée partielle de la grandeur physique mesurée par rapport à la propriété P, le code est [++], [+], [0], [-] ou [--] selon le signe et l'intensité estimée de dG/dP. Le code [?] est employé pour des résultats laissant subsister un doute,

- conclusions pouvant être tirées de la campagne expérimentale.

L'influence des armatures n'est pas indiquée quand on a procédé sur l'ouvrage à un repérage préalable (au détecteur électromagnétique) qui a permis de positionner les mesures pour s'affranchir de son effet. Elle est indiquée quand leur configuration ou leur densité a cependant perturbé (voire empêché) les mesures.

La présentation et l'analyse des résultats ne sont pas faites dans l'ordre chronologique, mais dans un ordre qui tire parti de l'ensemble des avancées collectives au cours du projet.

Nous présentons ainsi dans l'ordre :

- les spécimens BHP de La Rochelle, qui ont montré les difficultés d'analyse lorsque les mesures sont compatibles avec une multiplicité d'explications, et qu'il est impossible de trancher,

- les essais sur corps d'épreuve en environnement contrôlé : effet de la teneur en eau, effet de la carbonatation, effet de la teneur en chlorures, effet de la fissuration mécanique,

- les mesures sur ouvrages : ouvrages de l'A21, pont de La Marque et Tranchée couverte de Guéthary.

V.3. Corps d'épreuve BHP 2000 - La Rochelle.

Cette partie est issue de la campagne de mesures sur les corps d'épreuve du projet BHP 2000 mis à disposition du projet RGCU présenté au paragraphe IV.4 du chapitre 4. Ces corps d'épreuve se situent à La Rochelle au pied de la Tour Saint-Nicolas dans une zone de marnage : les corps d'épreuve sont à sec à marée basse et immergés à marée haute.

V.3.1. Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageables.

La campagne a consisté à réaliser un diagnostic des différents corps d'épreuve vis-à-vis de la teneur en chlorures en vue de les classer. Les bétons sont de compositions très diverses donnant des résistances de 25 MPa à 120 MPa et donc des porosités variées. On peut donc supposer que la porosité de la matrice jouera un rôle important car les cinétiques de séchage/absorption/diffusion (teneur en eau, teneur en chlorures) dépendent de ce paramètre.

V.3.2. A priori sur les aptitudes des techniques employées.

V.3.2.1. Capacité.

La fréquence de résonance diminue si la capacité augmente, donc si la constante diélectrique diminue, ce qui se produit quand la teneur en eau diminue. La capacité est donc un indicateur de la teneur en eau volumique (à béton donné). L'influence des chlorures n'est pas significative.

V.3.2.2. Radar.

La constante diélectrique diminue si la teneur en eau diminue. Si la teneur en sels augmente, l'atténuation augmente. Mais la quantité de sels change avec le volume d'eau dans la porosité. Il est donc difficile de découpler l'effet de la teneur en sels de celui de la teneur en eau. Donc on est (à priori) capable de dire s'il y a des chlorures ou pas. La teneur en eau n'est plus un biais mais un paramètre recherché, au même titre que la teneur en chlorures.

V.3.2.3. Acoustique.

La vitesse des ondes de surface augmente si le module d'élasticité (donc la résistance) augmente et si la porosité diminue. Cette vitesse augmente aussi à matériau donné si la teneur en eau augmente. Les effets de la teneur en eau et du module d'élasticité peuvent jouer dans deux directions opposées. L'atténuation augmente si la porosité augmente, et diminue si la teneur en eau augmente. A porosité constante, une teneur en eau croissante diminue l'atténuation. L'effet de porosité domine l'effet de saturation.

V.3.2.4. Electrique.

La résistivité augmente si la porosité diminue et si les teneurs en eau et en sels diminuent.

V.3.3. Synthèse des résultats obtenus sur la teneur en eau, la porosité, la teneur en sels.

V.3.3.1. Capacité.

On distingue les bétons (mesures à cœur, grandes électrodes) par leur porosité. Les analyses sont difficiles (il faut traiter des moyennes provenant de nombreuses mesures).

V.3.3.2. Radar.

Il est possible de classer les bétons (les plus poreux ont une constante diélectrique plus élevée). On relève aussi des variations de teneur en eau selon la verticale (plus humide en bas qu'en haut).

V.3.3.3. Acoustique.

La vitesse augmente pour les bétons les plus résistants (fig. IV.15 du paragraphe IV.4.3 au chapitre 4). Le M75 a absorbé peu d'eau (faible porosité). Les a priori pour l'atténuation sont confirmés (fig. IV.16 du paragraphe IV.4.3 au chapitre 4). La ligne de mesure inférieure, plus proche de la saturation, donne une atténuation plus faible : l'effet de la teneur en eau domine. Sur la ligne de mesure intermédiaire, c'est l'effet du matériau qui domine (l'atténuation diminue avec la résistance mécanique).

V.3.3.4. Electrique.

On note de forts contrastes entre les corps d'épreuve, corrélés à la composition du béton (à nature de béton identique, la résistivité diminue si la résistance augmente). Ce lien provient de la baisse de porosité, et donc de teneur en eau en cas de saturation.

Pour des bétons différents, les relations sont de même nature, mais la composition et donc la structure de l'espace poreux joue un rôle, et on ne peut relier directement résistivité et résistance mécanique. Par contre, le lien avec la porosité reste valide dans ce cas général. La mesure de résistivité permet donc de classer les bétons selon leur porosité, et à famille de béton donnée, selon leur résistance mécanique, pour des corps d'épreuve supposés saturés. De

plus, on mesure des gradients de résistivité selon la verticale, qui semblent correspondre à un état plus sec dans la partie haute des corps d'épreuve.

Si les corps d'épreuve ne sont plus totalement saturés (ils sèchent progressivement en surface dès leur sortie de l'eau), la mesure couple l'effet de la teneur en eau et de l'aptitude au séchage, qui doit aussi dépendre de la porosité...

Il en est de même pour les sels : la teneur en sels dépend évidemment de la porosité et la mesure est uniquement sensible à la porosité. Elle ne permet donc pas de mesurer la teneur en chlorures.

V.3.4. Bilan des aptitudes.

La campagne expérimentale sur les corps d'épreuve BHP 2000 montre que les différentes techniques sont aptes à classer les échantillons de façon pertinente (méthodes acoustiques) à très pertinente (radar, électrique et capacité). Elles fournissent, du moins pour les trois dernières, des informations fortement corrélées, qui se confirment mutuellement (mode [1]).

	Radar	Capacité	Résistivité	Ultrasons
	(amplitude)	(fréquence)	I	(ondes de surface)
Résistance du béton	+		+	vitesse +
Teneur en chlorures	+?	0?	0?	0 ?
Porosité	-	-	-	vitesse – amplitude +
Teneur en eau				vitesse : + à matériau fixé, - pour différents matériaux saturés amplitude : -
Armatures	В		В	В

Tableau V.3 : Bilan des aptitudes : A = détection, B = quantification relative, C = quantification absolue. [RGC&U, 2005]

Une exploitation plus approfondie des résultats obtenus par les mesures de résistivité montre une bonne aptitude à la quantification relative, la quantification absolue demeurant limitée du fait de la multiplicité des paramètres (porosité, teneur en eau, en chlorures...) susceptibles d'influencer les mesures.

La notion de « teneur en eau » révèle un autre problème potentiel. C'est a priori directement à ce paramètre teneur en eau que les mesures sont sensibles, mais une teneur en eau donnée
peut correspondre à différents états de porosité et de saturation, qu'il est difficile de distinguer.

Les techniques ne sont cependant pas en mesure de faire la part des explications possibles, quand plusieurs variables sont susceptibles d'influencer la mesure simultanément (ici porosité, teneur en eau, teneur en sels, connectivité de la microporosité).

V.4. Corps d'épreuve en environnement contrôlé.

Une étude de sensibilité des différentes techniques vis à vis de paramètres de dégradation identifiés et contrôlés a été menée en s'affranchissant ou en maîtrisant certains effets parasites comme les effets de bords ou la présence des armatures. Ainsi, nous pourrons définir la sensibilité des différentes méthodes vis à vis des différentes dégradations. Ensuite ces techniques devraient alors être plus facilement exploitables sur site pour analyser les différents types de dégradation.

Nous avions retenu des paramètres essentiels qui sont (en accord avec les gestionnaires ou les experts qui participent au projet) la fissuration d'origine mécanique, la teneur en eau, la contamination par les chlorures et la carbonatation. Cette étude a été présenté aux paragraphes III.5 et 6 du chapitre 3.

<u>V.4.1. Dalles de Toulouse : influence de la teneur en eau.</u> <u>V.4.1.1 Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageables.</u>

Il s'agit de tester et de quantifier l'aptitude des méthodes à discerner des variations de teneur en eau ou leur sensibilité à la teneur en eau, qui peut être gênante si elle masque la variation de paramètres que l'on souhaiterait distinguer. On travaille sur un B25 et un B40 dans la gamme de degré de saturation Sr de 20 % à 100 %.

A priori, l'ensemble des facteurs de biais peut être éliminé. L'analyse de deux bétons différents est destinée à fournir des informations complémentaires et permet d'espérer séparer les effets de la porosité p de ceux du degré de saturation Sr.

V.4.1.2. Synthèse des résultats obtenus sur la teneur en eau. V.4.1.2.1. Capacité.

La fréquence de résonance diminue si la capacité augmente, si la constante diélectrique diminue, donc si teneur en eau diminue (fig. V.1). La fréquence est donc un indicateur de la teneur en eau volumique (à béton donné).



Figure V.1 : Relation expérimentale capacité-saturation pour les deux bétons.

[RGC&U, 2005]

Les résultats confirment une excellente corrélation entre le degré de saturation et la capacité, avec des relations qui dépendent du béton :

- B25 : f = 5,137 - 0,0034 Sr (Sr en %)

-B40: f = 5,04 - 0,00192 Sr (Sr en %)

Pour un béton donné, la capacité est donc un excellent moyen de fournir la teneur en eau. Pour différents bétons, on ne pourra distinguer les deux causes de variation : sur la courbe, la fréquence de 5 Hz peut être obtenue avec les deux bétons présentant 20 % d'écart sur Sr. Ceci explique le développement commercial de cette technique pour mesurer « l'humidité » des matériaux.

V.4.1.2.2. Radar.

La constante diélectrique diminue si la teneur en eau diminue. Les corrélations sont moins bonnes qu'avec la mesure de capacité, mais la corrélation est satisfaisante (fig. V.2).







V.4.1.2.3. Acoustique.

La vitesse des ondes de surface augmente si la teneur en eau augmente (fig. V.3). Les effets de la teneur en eau et du module d'élasticité jouent dans la même direction. A porosité constante, une teneur en eau croissante diminue l'atténuation.



Figure V.3 : Relation degré de saturation – vitesse acoustique (m/s). [RGC&U, 2005]



Figure V.4 : Variation de l'indice d'atténuation avec la saturation. [RGC&U, 2005]

L'indice d'atténuation (fig. V.4) est bien corrélé avec l'atténuation. On peut l'utiliser pour classer les différentes dalles, même si deux points s'écartent de la tendance générale De toutes les techniques employées, les mesures acoustiques sont celles qui fournissent les résultats les plus bruités en particulier sur le B40.

Pour le B25, la régression linéaire donne : V = 2446 + 2,43 Sr (V en m/s)

Pour le B40, la régression est médiocre. On note une vitesse plus rapide d'environ 100 m/s pour le même degré de saturation.

V.4.1.2.4. Electrique.

La résistivité augmente si la teneur en eau diminue (fig. V.5). Les mesures sont impossibles pour des degrés de saturation inférieurs à 20 %. Le traitement des résultats permet de proposer une relation exponentielle : $\rho = 2420 \text{ e}^{(-0,0394 \text{ Sr})}$ pour les valeurs moyennes avec le quadripole de 5 cm.



Figure V.5 : Variation de la résistivité (ohm.m) avec le degré de saturation. [RGC&U, 2005]

Si l'on tient compte de la dispersion des mesures, on peut obtenir une fourchette mini/maxi : $pmin = 1883 e^{(-0,0369 \text{ Sr})}$ et $pmax = 3190 e^{(-0,0412 \text{ Sr})}$.

V.4.1.3. Exploitation des mesures : quelques possibilités et difficultés.

A l'issue de ce paragraphe, on peut esquisser une méthodologie d'exploitation des mesures qui tienne compte de la sensibilité de plusieurs mesures à plusieurs paramètres, considérés comme des inconnues à identifier ou comme des facteurs de bruit.

Si on combine la variation observée de la résistivité avec le degré de saturation et la variation résultant de la porosité p (identifiée à La Rochelle), on obtient l'expression suivante (pour une valeur moyenne) :

 $\rho = 80470 \ e^{(-0,414 \text{ p})} \cdot e^{(-0,0394 (1 - \text{Sr}))}$

Cette formule révèle les influences combinées des deux paramètres porosité et teneur en eau. Elle permet de comprendre les difficultés d'interprétation des mesures électriques pour identifier soit p, soit Sr, ceci pour deux raisons :

- des variations concourantes de ces deux paramètres peuvent provoquer le même changement de résistivité,

- des variations de p (ou de Sr) qui provoquent des variations de résistivité inférieures à la dispersion des mesures (voir les fourchettes pmin / pmax) ne peuvent être reconnues.

V.4.1.3.1. Sensibilité de la mesure.

Le tableau V.4 fournit les mesures théoriques (M) déduites des relations établies ci-dessus, dans le cas d'un degré de saturation Sr = 80 %. On analyse l'effet sur la mesure théorique d'une variation de +/- 10 % de Sr, que la technique ambitionne de détecter.

On note ΔM et $\Delta M/M$ les variation absolue et relative correspondantes. Les calculs montrent (deux dernières colonnes), que les variations relatives de M dépendent énormément de la technique employée. La sensibilité de la mesure de résistivité est de très loin la plus élevée. Bien entendu, ces valeurs doivent être appréciées à la lumière de la qualité de la mesure (en particulier de son degré de répétabilité, que la qualité des régressions linéaires identifiées cidessus permet d'évaluer). Ainsi, la sensibilité de la mesure capacitive est moins bonne que celle de la mesure de résistivité, mais cette mesure est très précise et une faible variation de la fréquence pourra donc être détectée. A l'inverse, les mesures de vitesse de propagation des ondes ultrasonores sont moyennement sensibles et, hélas bruitées, ce qui nuit à leur utilisation concrète dans l'optique d'une détection de contraste de teneur en eau.

	M _{80%}	$M_{90\%}$ - $M_{80\%}$	$M_{70\%}$ - $M_{80\%}$	$\Delta M^+/M$	$\Delta M^{-}/M$
A (radar)	4,865	-0,034	0,034	- 0,70 %	+ 0,70 %
V (acoust)	2431	-86	86	- 3,56 %	+ 3,56 %
f (capa)	2640	24,3	-24,3	0,92 %	- 0,92 %
ρ (résist.)	103,5	-33,7	50,0	- 32,6 %	+ 48,3 %

Tableau V.4 : Comparaison des sensibilités des mesures à une variation du degré de
saturation. [RGC&U, 2005]

V.4.1.3.2. Variations combinées de deux paramètres.

Les figures V.6 et 7 sont construites à partir de la régression exponentielle que l'on a établie entre les valeurs de porosité et de degré de saturation et la mesure de résistivité, qui dépend de ces deux paramètres. Les qualités des régressions entre la résistivité et le degré de saturation d'une part, et entre la résistivité et la porosité d'autre part, permettent d'estimer, quand seul l'un des deux paramètres varie, l'incertitude d'estimation à +/- 0,5 % pour la porosité et +/- 5% pour le degré de saturation.

La figure V.6 illustre la variation de la résistivité avec la porosité pour différents degrés de saturation. Elle montre qu'une infinité de couples de valeurs (porosité, degré de saturation) correspond à une même mesure de résistivité.



Figure V.6 : Variation de la résistivité (ohm.m) en fonction de la porosité (%) et du degré de saturation (%). [RGC&U, 2005]



Figure V.7 : Courbes iso-résistivité dans le plan porosité-saturation et plages d'incertitude. [RGC&U, 2005]

La figure V.7 présente les mêmes résultats en traçant les droites iso-valeurs de résistivité et en matérialisant l'incertitude correspondante pour l'estimation des valeurs de degré de saturation et de porosité. On montre qu'un contraste entre deux droites voisines (soit une variation relative de l'ordre de 50 %) est suffisant pour conclure à l'existence probable d'un contraste

significatif des propriétés du matériau, que l'on expliquera, selon le contexte, par une variation de porosité ou de degré de saturation.

V.4.1.3.3. Tableau de synthèse.

Le tableau V.5 synthétise la sensibilité des différentes techniques aux variations des paramètres.

	Radar	Capacité	Résistivité	Ultrasons
		(fréquence)		
Teneur en eau	amplitude :			atténuation :
	vitesse :			vitesse : +
Porosité	-	-	-	vitesse : -

Tableau V.5 : Synthèse des sensibilités aux variations des paramètres. [RGC&U, 2005]

<u>V.4.2. Dalles de Toulouse : influence de la profondeur de carbonatation.</u> <u>V.4.2.1 Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageables.</u>

Il s'agit de qualifier et de quantifier l'aptitude des méthodes vis-à-vis de la carbonatation du béton. Sont-elles sensibles à la présence d'une couche carbonatée en surface ? Sont-elles sensibles à la variation de son épaisseur ?

Les corps d'épreuve ont été testés avec des profondeurs carbonatées variant de 5 à 35 mm. Les facteurs de biais sont a priori maîtrisés (béton unique, conditions d'humidité et de température constantes). La profondeur de carbonatation est contrôlée par le prélèvement d'échantillons à des échéances régulières.

V.4.2.2. Synthèse des résultats obtenus sur la carbonatation. V.4.2.2.1. Capacité.

Si les dalles sont homogènes et possèdent la même teneur en eau, les mesures sont sensibles à la carbonatation. La différence de fréquence est plus faible qu'avec le matériau non carbonaté.

V.4.2.2.2. Radar.

La carbonatation se développe en présence d'eau, ce qui doit augmenter l'atténuation. Cependant, le béton carbonaté est plus dense, et la carbonatation consomme de l'eau. Des effets de la carbonatation sur les mesures radar sont donc à attendre, sans que l'on puisse aisément préjuger de leur nature.

Les résultats obtenus par le LCPC ne montrent pas de variation nette de l'amplitude. Les effets sur la vitesse ne trouvent pas d'explication simple (variation non monotone : diminution puis augmentation).

Les résultats obtenus par le LMDC ne permettent pas non plus de conclure : l'amplitude augmente apparemment avec la carbonatation (ce qui ne correspond pas aux attentes) et les corps d'épreuve sont trop petits pour des mesures correctes de la vitesse.

En résumé, le radar ne permet pas de détecter la carbonatation.

V.4.2.2.3. Acoustique.

A priori, la présence d'une zone carbonatée est de nature à augmenter la vitesse de propagation et à diminuer l'atténuation en raison de la diminution de la porosité.

Les résultats montrent une dispersion des vitesses en fonction de la fréquence, caractéristique d'un milieu stratifié. Le traitement de cette information peut permettre :

- de trouver la vitesse dans la couche carbonatée et dans la couche saine plus profonde (la différence relative de ces deux vitesses peut être considérée comme une estimation de la profondeur de carbonatation),

- de retrouver les propriétés du milieu sain et du milieu carbonaté ainsi que la profondeur du front, en analysant le spectre d'investigation en fréquences (estimation de la profondeur par inversion).

Cette estimation a été faite pour les deux premières profondeurs de carbonatation. Pour aller plus loin en profondeur il aurait fallu utiliser un transducteur différent de fréquence plus basse, non disponible au moment des mesures.

L'absorption diminue avec la carbonatation (à f = 0,5MHz) mais cet effet dépend aussi à priori de la fréquence employée, car si on ne se propage que dans une couche (où les fréquences sont plus importantes), l'effet dispersif usuel l'emporte. Dans ce cas, la courbe d'atténuation en fréquence aura une forme présentant un minimum (constaté à 1 MHz)

V.4.2.2.4. Electrique.

A priori, la résistivité est plus élevée dans la zone carbonatée. Les résultats montrent une augmentation régulière (linéaire) de la résistivité avec la profondeur carbonatée (de 200 à 1800 ohm.m avec le quadripôle de 5 cm).

V.4.2.2.5. Tableau de synthèse.

Le tableau V.6 synthétise la sensibilité des différentes techniques aux variations des paramètres.

	Radar	Capacité (fréquence)	Résistivité	Ultrasons
Profondeur carbonatée	vitesse ? amplitude ?	+	+	vitesse : dispersion → prof. atténuation : - (fct fréquence)
Porosité	?	-	-	vitesse : -

Tableau V.6 : Synthèse des sensibilités aux variations des paramètres. [RGC&U, 2005]

Les mesures acoustiques, par les influences complexes auxquelles elles sont sensibles, paraissent de nature, au prix d'un traitement adapté, à fournir des informations utiles sur le degré de carbonatation.

<u>V.4.3. Dalles de Toulouse : influence de la teneur en chlorures.</u> <u>V.4.3.1 Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageables.</u>

Les tests ont pour but de montrer l'aptitude des méthodes à qualifier la présence de chlorures et à en quantifier la variation (dans le temps ou dans l'espace). Les essais ont été conduits sur cinq dalles non armées et sur deux dalles armées (B25) en conditions non saturées. La porosité, supposée constante, n'est pas un facteur de biais.

Une difficulté vient de ce que l'on n'a pas fait varier la teneur en chlorures des corps d'épreuve en condition saturé, mais que l'on a fait pénétrer progressivement une solution d'eau chlorée dans le corps d'épreuve. Il n'est pas possible de procéder autrement en laboratoire. Deux paramètres varient donc simultanément, et il sera difficile d'en distinguer les effets (le paragraphe V.4.1. a confirmé la sensibilité de toutes les techniques à la variation du degré de saturation). On ne pourra détecter effectivement la présence de chlorures que pour un même degré de saturation.

En outre, du moins pour les faibles valeurs du degré de saturation correspondant au début de la pénétration des chlorures, le degré de saturation n'est pas constant dans l'épaisseur du corps d'épreuve, et la densité des chlorures dépend également de la distribution des tailles de pores (fait confirmé par des prélèvements). Les analyses reposent sur l'hypothèse d'un degré de saturation moyen, calculé à partir d'un bilan massique, mais cela introduira un facteur de biais dans l'analyse.

V.4.3.2. Synthèse des résultats obtenus sur la teneur en chlorures.

V.4.3.2.1. Capacité.

Impossibilité de dissocier les effets de la teneur en eau et de la capacité, l'interprétation étant compliquée par l'existence d'un gradient avec l'épaisseur.

V.4.3.2.2. Radar.

Les variations de la vitesse radar avec le degré de saturation s'expriment sous la forme :

V = b - a Sr

Dans le cas de la solution saline, on trouve une variation de la forme :

V = b' - a Sr

avec une pente identique, mais une ordonnée différente.

La présence d'une solution saline semble provoquer, dans le cas d'une répartition homogène de cette solution dans le corps d'épreuve, une augmentation de la vitesse (de l'ordre de 10 à 15 %), par rapport aux mesures sur le corps d'épreuve saturé en eau. Plus que le degré de saturation du corps d'épreuve en chlorures, il conviendrait d'utiliser un marqueur tel que la quantité de chlorures dans les 4 premiers centimètres.

L'amplitude radar n'est pas sensible à la présence de chlorures (les résultats se confondent avec ceux des corps d'épreuve du paragraphe V.4.1.).

V.4.3.2.3. Acoustique.

En principe, la teneur en chlorure n'affecte pas directement les paramètres acoustiques (vitesse et atténuation). Les effets sont indirects, à travers les variations de teneur en eau. Nous relevons des vitesses de l'ordre de 2200 m/s, sensibles à la porosité de la matrice et à la teneur en eau. On note aussi l'apparition d'une variation des vitesses avec l'avancement du front (à exploiter éventuellement pour avoir la profondeur du front de pénétration, comme dans le cas de la carbonatation). La sensibilité des mesures aux chlorures n'est pas avérée.

V.4.3.2.4. Electrique.

Les résultats montrent une forte dépendance de la résistivité à la pénétration des chlorures (fig. V.8), que l'on peut, pour les valeurs moyennes, modéliser sous la forme :

 $\rho = 1958 \ e^{(\text{-}\ 0,042 \ Sr)}$

La mesure avec les deux tailles de dispositif (5cm et 10cm) montre un contraste, ce qui semble confirmer la présence d'un front de pénétration. Le rapport $\rho_{5'} \rho_{10}$ tend vers 1 quand Sr tend vers 100 % (pénétration homogène dans le corps d'épreuve).

La variation de la résistivité est de la même forme que celle relevée avec l'eau pure, et les résistivités semblent un peu plus faibles pour un même degré de saturation (voir courbe). La différence est de l'ordre de 20 %, ce qui parait assez faible pour permettre une détection dans de bonnes conditions, étant donné la dispersion des mesures électriques.



Figure V.8 : Variation de la résistivité avec la saturation, pour l'eau pure et l'eau chlorée. [RGC&U, 2005]

V.3.2.5 Bilan.

	Radar	Capacité	Résistivité	Ultrasons
		(fréquence)		
Teneur en chlorures (recherchée)	amplitude : 0 vitesse :	0 ?	- ?	0
Teneur en eau (biais)	amplitude : vitesse :			atténuation : vitesse : +



L'utilisation du radar ouvre une piste intéressante si on cherche à discerner les effets de la teneur en eau (ou de la saturation) de ceux de la présence de chlorures ; le fait que la vitesse soit sensible aux deux paramètres alors que l'amplitude n'est sensible qu'à la teneur en eau, la mesure de ces deux grandeurs devrait en principe permettre d'accéder séparément aux deux paramètres recherchés.

V.4.4. Essais de Lille : fissuration d'origine mécanique.

V.4.4.1. Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageables.

Il s'agit ici de montrer l'aptitude à détecter la présence d'une macrofissure, et à en quantifier les propriétés (ouverture, profondeur). Les essais sont menés à trois niveaux de chargement mécanique, prédéfinis pour provoquer des ouvertures de fissure préalablement convenus (environ 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm). Les corps d'épreuve correspondent à trois types de bétons (B25-B40-B60).

V.4.4.2. Synthèse des résultats obtenus sur la macrofissuration. V.4.4.2.1. Radar.

A priori, on devrait noter des différences selon l'humidité de la fissure et sa taille. La fissure ne peut en effet pas être détectée si elle est petite devant la longueur d'onde. On peut aussi penser qu'une grosse fissure (3-4 mm) provoque une atténuation plus forte si elle est humide. L'analyse des résultats a montré que la fissure ne peut être détectée dans aucun cas.

V.4.4.2.2. Acoustique.

A priori, une microfissuration doit augmenter l'absorption et diminuer la vitesse. Une macrofissuration ouverte augmente l'absorption et perturbe les ondes de surface ; elle peut aller jusqu'à bloquer la propagation. La profondeur de fissure peut être accessible via le filtrage des fréquences.

Les résultats de l'équipe de Lille montrent que le matériau sain n'est pas homogène (effet des gros granulats). Les vitesses évoluent avec l'état de macrofissuration, mais le traitement a été focalisé sur l'absorption. L'atténuation augmente sur les trois niveaux de chargement, de façon similaire pour les trois bétons. On peut également détecter la position de la fissure par la variation de l'absorption selon l'abscisse. On peut même suivre l'ouverture de la fissure par l'augmentation de cette variation de l'atténuation.

Les mesures conduites par le LCPC ne permettent pas de quantifier la profondeur, car le traitement ne permet pas encore de corriger l'amortissement intrinsèque du matériau.

V.4.4.2.3. Electrique.

A priori, une macrofissure est révélée par l'anisotropie induite. La fissure apparaît comme plus conductrice si elle est humide, comme plus isolante si elle est sèche.

Le corps d'épreuve en B25 a été suivi sur les trois niveaux de chargement, avec une éprouvette humidifiée. On note une baisse de résistivité, faible entre les deux premiers niveaux, plus forte ensuite. La mesure de l'anisotropie n'est pas concluante, du fait de la présence des armatures. Les mesures sur le B60 sont trop bruitées, malgré l'humidication, le matériau étant trop résistif.

V.4.4.2.4. Bilan.

	Radar	Résistivité	Ultrasons
Macrofissuration (position, profondeur, ouverture)	0	-	vitesse : OUI atténuation : infos sur position et ouverture

Tableau V.8 : Synthèse des sensibilités des techniques à la fissuration. [RGC&U, 2005]

<u>V.5. Bilan.</u>

A l'issue de l'ensemble des essais en conditions contrôlées, on peut tirer un premier bilan des capacités pratiques de détection. Le tableau V.9 reste provisoire, dans la mesure où une amélioration des procédures de traitement ou des mesures effectuées dans des conditions plus favorables pourraient, dans certains cas, améliorer les possibilités pratiques de détection. Il résume cependant ce qui a été obtenu via les différentes techniques.

Chaque ligne doit être considérée indépendamment des autres. Ainsi, la variation de teneur en eau suppose une porosité constante, ce qui revient à faire varier le degré de saturation.

La présence des armatures est indiquée sous la forme de facteur de biais potentiel, qui peut être parfois maîtrisé et corrigé, et peut empêcher l'exploitation des mesures dans d'autres configurations.

	Radar	Capacité (fréquence)	Résistivité	Ultrasons
Teneur en eau	vitesse : amplitude :			vitesse : + atténuation :
Porosité	-	-	-	vitesse : OUI (+ si saturé, - si sec)
Profondeur carbonatée	vitesse : 0? amplitude : 0?	+	+	vitesse : OUI (dispersion → prof) atténuation : -
Teneur en chlorures	vitesse : amplitude : 0	0 ?	- ?	0
Macrofissuration	0	0	-	vitesse : OUI atténuation : ++ (position, ouverture)
Armatures	Biais		Biais	Biais

 Tableau V.9 : Premier bilan des capacités opérationnelles de détection des objets et propriétés. [RGC&U, 2005]

Deux remarques utiles peuvent être faites à la lumière du tableau :

- quand deux paramètres auxquels la technique est sensible sont susceptibles de varier simultanément, sans information complémentaire la technique n'est pas en mesure d'expliquer quelle est la cause du résultat obtenu (ce point a été illustré en détail au paragraphe V.4.1. dans le cas des mesures de résistivité),

- le recours à la combinaison de techniques pour faciliter cette explication ne sera efficace que si la sensibilité des techniques à la variation des deux paramètres influents diffère.

Nous allons maintenant nous replacer dans le cadre des mesures sur ouvrages réels, pour confirmer les premiers résultats pratiques et étudier les possibilités éventuelles de combinaison de techniques et de valorisation de leur couplage.

V.6. Contrôle non destructif sur ouvrages in situ.

Parmi les ouvrages de l'Etat, ceux de l'autoroute A 21, appelée « rocade minière », ont été retenus car ils avaient fait en 1999-2000 l'objet d'un bilan systématique. Cette étude avait été conduite par le LRPC de Lille. L'étude a porté sur 48 ouvrages, comprenant un effectif comparable de ponts inférieurs et supérieurs. En plus d'un simple constat, l'étude avait pour objectif de mettre en évidence d'éventuelles relations entre les caractéristiques des bétons, les paramètres environnementaux et l'endommagement des parements.

Le choix de quatre ouvrages parmi les 48 de l'étude antérieure s'est fait selon les critères présentés au paragraphe IV.2 du chapitre 4. Tout d'abord sur leur accessibilité, tous les ouvrages sélectionnés étant des passages inférieurs et les zones auscultées des piédroits et des murs. De plus, ces ouvrages sont facilement accessibles par les accès autoroutiers.

<u>V.6.1. Ouvrages de l'A 21.</u> <u>V.6.1.1. Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageables.</u>

On souhaite établir un diagnostic vis-à-vis de la carbonatation, en particulier classer les ouvrages (ou les zones d'ouvrages) vis-à-vis du degré de carbonatation. Les ouvrages ont été choisis en fonction de contrastes de fissuration et de carbonatation. Ils sont constitués de bétons de différentes caractéristiques.

La validation du classement (entre ouvrages ou entre zones d'un même ouvrage) repose sur des mesures effectuées par ailleurs sur des carottes.

V.6.1.2. A priori sur les aptitudes des techniques employées.

A la lumière des campagnes de laboratoire, les contrastes de carbonatation sont identifiables par les méthodes sonique et résistive (tableau V.10). Cependant, des variations de teneur en eau (sur différentes zones d'un même ouvrage) ou de porosité (dans le cas de bétons différents entre ouvrages) peuvent masquer les variations provenant de la carbonatation.

	Radar	Résistivité	Ultrasons
Profondeur carbonatée	vitesse : 0?	+	vitesse : OUI
	amplitude : 0?		(dispersion 🗲 prof)
			atténuation : -
Teneur en eau	vitesse :		vitesse : +
	amplitude :		atténuation :
Porosité	-	-	vitesse : ++
Armatures	Biais	Biais	Biais

 Tableau V.10 : Aptitude théorique au diagnostic de carbonatation et sources de bruit possibles. [RGC&U, 2005]

V.6.1.3. Synthèse des résultats obtenus sur la carbonatation.

Les profondeurs carbonatées indiquées sont celles fournies par les mesures sur carottes, qui servent de référence.

V.6.1.3.1. Analyse entre zones d'un même ouvrage (ouvrage 1204 B).

Les courbes des figures V.9 et 10 illustrent la corrélation, sur sept zones de l'ouvrage 1204B, entre les profondeurs de carbonatation mesurées sur carottes et les mesures de l'amplitude radar et de la résistivité.

Elles semblent montrer une corrélation positive permettant de distinguer les zones non carbonatées (deux valeurs les plus faibles de résistivité et d'amplitude). Les valeurs de résistivité (de 140 à 600 ohm.m) sont compatibles avec les contrastes relevés au laboratoire entre éprouvettes saines et carbonatées (paragraphe V.4.2.). Cette corrélation est bien moins bonne et non significative sur les ouvrages présentant le plus grand contraste de carbonatation (OA 1247 et OA 1249).

Les valeurs des mesures acoustiques ne fournissent pas de résultat convaincant, les variations entre zones semblant erratiques.



Figure V.9 : Corrélation entre profondeur carbonatée (mm) et amplitude radar. [RGC&U, 2005]



Figure V.10 : Corrélation entre profondeur carbonatée (mm) et résistivité (ohm.m). [RGC&U, 2005]

V.6.1.3.2. Analyse entre ouvrages, classement proposé.

Une deuxième échelle d'analyse est la comparaison entre ouvrages, que l'on souhaite classer vis-à-vis de leur degré de carbonatation. Chaque équipe a proposé son propre classement, en exploitant en aveugle ses résultats. Le tableau V.11 synthétise ces classements, la première place correspondant à l'ouvrage le moins atteint par la carbonatation.

Il présente dans les deux premières lignes le classement de référence établi sur la base des mesures sur carottes.

	1 ^{er}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}
porosité (+→-)	1204B	1247	1249	1202A
prof. carbo $(-\rightarrow +)$	1204B	1202A	1247	1249
radar	1202A	1249	1247	1204B
résistivité	1204B	1247	1249	1202A
U.S. vitesse	1247	1202A	1204B	1249
U.S. atténuation	1202A	1247	1204B	1249

Tableau V.11 : Proposition de classement des ouvrages vis-à-vis de la carbonatation.[RGC&U, 2005]

Les mesures de résistivité sont très dispersées sur chaque ouvrage, avec un rapport de 3 à 4 entre les valeurs minimales et maximales (fig. V.11). Les valeurs les plus fortes correspondent souvent (mais pas toujours...) aux zones les plus carbonatées. Par ailleurs, les valeurs de carbonatation maximales (30 et 40 mm) se situent dans des zones où la mesure électrique n'a pas été possible (béton trop résistif).

En valeur moyenne, l'ouvrage 1249 apparaît comme le plus carbonaté (profondeur moyenne de 15 mm contre 7 à 8 mm pour les autres), mais avec des écarts élevés compris entre 3 et 40 mm. Au vu des mesures sur carottes, le « classement de référence » lui-même doit donc être considéré avec prudence... et les corrélations avec les mesures CND avec recul.



Figure V.11 : Distribution des profondeurs de carbonatation en mm relevées sur les carottes. [RGC&U, 2005]

Le classement selon la résistivité et l'amplitude radar sont exactement inversés, ce qui provient de l'interprétation faite sur l'influence supposée de la carbonatation sur les grandeurs mesurées (plus de carbonatation augmenterait la résistivité et diminuerait l'amplitude radar).

Si l'on suppose que la carbonatation augmente l'amplitude radar ou l'amplitude du signal acoustique (en diminuant l'atténuation, comme c'est illustré par les comparaisons entre zones), l'ouvrage 1249 est classé en premier...Ce point ne peut cependant être confirmé par les mesures de laboratoire, qui n'ont pas été concluantes pour le radar.

V.6.1.4. Apports du couplage.

En conclusion, pour un ensemble d'ouvrages, les variations de propriétés liées aux différences de composition (et d'exposition) du béton se superposent aux variations de carbonatation et empêchent toute évaluation précise. Dans cette étude, les porosités du béton varient de 15 à 20 % selon les ouvrages. Plus que la question de la corrélation CND-état, la question est celle du diagnostic lui-même : « classer les ouvrages » devrait se faire sur la base d'un critère précis, par exemple selon le pourcentage des mesures dépassant, pour chaque ouvrage, un certain seuil, indicateur d'un niveau donné de carbonatation.

A l'échelle d'un ouvrage, les mesures d'amplitude radar et de résistivité semblent de nature à permettre un « diagnostic discriminant des zones saines et des zones carbonatées ». Indirectement, la variation positive de l'amplitude radar avec la carbonatation semble prouver que le bilan hydrique de la réaction de carbonatation est négatif.

Dans l'état actuel des capacités de chaque méthode, le recours à un couplage efficace paraît illusoire. Seule l'utilisation complémentaire de la technique capacitive pour détecter les variations de teneur en eau pourrait être intéressante, de façon à en soustraire les effets.

V.6.2. Pont de La Marque : chevêtre.

Cette campagne de mesures est présentée au paragraphe IV.6 au chapitre 4 et a porté sur un des chevêtres et sur une pile du pont.

Sur ce site, ont été testés :

- l'aptitude des différents appareils utilisés à la réalisation de mesures sur site dans des conditions difficiles,

- la capacité à qualifier l'état d'altération d'un matériau, et notamment la détection d'une zone siège d'une réaction alcali granulat.

Une série d'expertises et d'études ont permis de conclure que les fissurations étaient dues dans le tablier à une réaction sulfatique en profondeur d'origine endogène, et dans le chevêtre à de la réaction alcali-granulat, activées par les infiltrations d'eau.

V.6.2.1. Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageables.

On souhaite établir un diagnostic vis-à-vis de l'alcali-réaction, c'est-à-dire détecter, puis localiser précisément une zone affectée par l'alcali-réaction.

La partie inspectée est un chevêtre en sommet de culée d'appui, sous le tablier de l'ouvrage, affecté par l'alcali-réaction. La zone affectée est repérée visuellement, et correspond aux abscisses comprises entre 9,8 m et 12,4 m. Le chevêtre à une longueur de 14 m.

V.6.2.2. A priori sur les aptitudes des techniques employées.

Les techniques sont utilisées avec les a priori suivants (aucune campagne expérimentale en laboratoire n'a été conduite sur l'alcali-réaction) :

Pour le radar, l'alcali-réaction se développe en zone humide, ce qui devrait augmenter l'atténuation (mesures LMDC Toulouse) et diminuer la vitesse (LCPC).

Pour les mesures électriques, pour les mêmes raisons, le développement de l'alcali-réaction devrait se traduire par une diminution de la résistivité. L'effet du gel formé sur la résistivité n'est pas connu.

Pour les mesures acoustiques, on attend une diminution de vitesse et une augmentation de l'atténuation. Mais les variations de teneur en eau et le type de béton affectent aussi ces paramètres, comme le montre le tableau V.12.

	Radar	Résistivité	Ultrasons
Alcali-réaction	amplitude : -	- ?	vitesse : -
	vitesse : -		atténuation : +
Teneur en eau	vitesse :		vitesse : +
	amplitude :		atténuation :
Macrofissuration	0	-	vitesse : OUI
			atténuation : ++
			(position, ouverture)
Armatures	Biais	Biais	Biais

 Tableau V.12 : Aptitude théorique au diagnostic d'alcali-réaction et sources de bruit possibles. [RGC&U, 2005]

V.6.2.3. Synthèse des résultats obtenus sur l'alcali-réaction. V.6.2.3.1. Radar.

Les zones où s'est développée l'alcali-réaction sont plus humides et correspondent à des zones à forte atténuation (résultats du LMDC).

Dans ces zones, l'humidité diminue la vitesse (résultats du LCPC).

V.6.2.3.2. Acoustique.

Les évolutions de vitesse ne traduisent pas la présence d'alcali-réaction, mais plutôt des variations de teneur en eau, ce qui masque l'effet de l'alcali réaction.

V.6.2.3.3. Electrique.

Les mesures électriques montrent un abaissement significatif de la résistivité dans la zone d'alcali-réaction.

<u>V.6.2.4. Apports du couplage : confirmation entre techniques de mesure</u> (*radar-résistivité*).

La difficulté du diagnostic provient de l'impossibilité de conclure que les variations relevées pour les mesures proviennent du développement de l'alcali-réaction ou/plutôt que de la présence d'humidité. Cependant, si l'on fait l'hypothèse que la présence d'une forte humidité est corrélée au développement de l'alcali-réaction, le diagnostic est indirect.

Nous allons développer ici une méthodologie dans l'esprit du mode [2] de valorisation du couplage, en exploitant de manière combinée deux techniques de mesure pour améliorer la précision du diagnostic (ici la délimitation d'une zone supposée être le siège de la réaction alcali-granulat) en diminuant les effets du bruit de mesure.

Un maillage identique pour toutes les techniques (pas de 20 cm) sert de base de mesure. Nous analysons les corrélations des mesures d'amplitude radar et de résistivité électrique. Sur le chevêtre, les profils longitudinaux d'amplitude radar (fig. V.12) et de résistivité (fig. V.13) montrent une variation régulière du signal avec une décroissance vers les abscisses croissantes.



Figure V.12 : Valeurs d'amplitude radar sur le chevêtre. [RGC&U, 2005]

Pour améliorer la précision des mesures électriques, on a choisi de travailler avec une résistivité renormée, notée moy1(x), définie ainsi

$$\begin{split} moy1(x) &= 0,5 \ (\rho_{5renorm\acute{e}e}(x) + \rho_{10renorm\acute{e}e}(x)) \ avec \quad \rho_{5renorm\acute{e}e}(x) = \rho_5 \ (x) \ / \ moy_x \ (\rho_5 \ (x)) \ et \\ \rho_{10renorm\acute{e}e}(x) &= \rho_{10} \ (x) \ / \ moy_x \ (\rho_{10} \ (x)) \end{split}$$

où les valeurs à 5 et 10 cm sont chacune les moyennes de deux mesures (longitudinale et transversale) faites avec le même dispositif quadripolaire. La valeur renormée est adimensionnelle et voisine de l'unité. C'est sa variation sur le profil qui est pertinente.



Figure V.13 : Valeurs de résistivité renormée moy1(x) sur le chevêtre. [RGC&U, 2005]

Les mesures locales d'amplitude radar et de résistivité sont médiocrement corrélées (tableau V.13 et figure V.14).

amplitude radar - ρ_5	0,376
amplitude radar - ρ_{10}	0,223
amplitude radar - moy1	0,421

Tableau V.13 : Coefficient de détermination r² radar – électrique. [RGC&U, 2005]

Ces valeurs confirment toutefois que travailler avec une résistivité moyennée (sur deux mesures à 5 cm et deux mesures à 10 cm) réduit le bruit et améliore la corrélation.



Figure V.14 : Corrélation entre amplitude radar et résistivité renormée. [RGC&U, 2005]

Les figures V.12 et 13 montrent que les valeurs d'amplitude radar et de résistivité qui présentent les mêmes variations de propriétés dans le matériau (ici probablement dues aux variations d'humidité, signe de la réaction alcali-granulat que détectent les deux techniques). Ainsi, au-delà de la décroissance régulière vers les abscisses croissantes on note les singularités significatives des deux extrémités, particulièrement celle de plus faible valeur entre 9,5 m et 12 m. Si, pour l'ensemble des valeurs d'abscisses comprises entre 0 et 12,40 m, on analyse la régression linéaire (fig. V.15) le degré de détermination devient élevé (0,90).



Figure V.15 : Régression modèle amplitude / modèle résistivité renormée. [RGC&U, 2005]

Cette technique de traitement permet de réduire les bruits et de confirmer la très bonne corrélation (masquée par les bruits de mesure des deux méthodes) entre l'amplitude radar et la résistivité.

V.6.3. Tranchée couverte de Guéthary.

Il s'agit d'une tranchée couverte de 96 m de long, située sur l'autoroute A63 et présentée au paragraphe IV.5 du chapitre 4.

Des éclatements du béton ont été relevés à la base du piédroit central de l'ouvrage et cette pathologie a fortement évolué depuis 2000. Nous cherchons à caractériser une altération inconnue en supposant qu'elle est plus probable dans les zones humides. Pour cela nous cherchons à caractériser les variations, liées à cette présence d'eau, de propriétés à l'intérieur d'une même zone et entre zones.

V.6.3.1. Objectif de la campagne expérimentale – problèmes envisageables.

Le piédroit de l'ouvrage présente des pathologies sérieuses, se manifestant par un éclatement du béton.

L'objectif est de zoner l'ouvrage vis à vis de la teneur en eau puis, dans des zones sélectionnées pour une analyse approfondie (une zone choisie à partir de relevés visuels et trois zones choisies à partir du profil radar), d'analyser « l'éclatement du béton » (témoin d'un

endommagement d'origine inconnue). On se place ici dans le cadre d'une valorisation de mode [3] du couplage, par l'utilisation successive d'une technique rapide pour sélectionner et d'autres techniques plus fines pour l'analyse dans les zones retenues.

Aucune hypothèse n'est faite sur l'origine des pathologies. Aucun prélèvement n'a été fait sur l'ouvrage.

A l'issue de la première phase d'analyse, quatre zones sont sélectionnées pour leurs différentes réponses électromagnétiques résumées ci-dessous :

	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4
partie haute	faible	Forte (homogène)	faible (homogène)	forte
partie basse	forte			faible

Tableau V.14 : Intensité de l'atténuation radar (une forte atténuation indique une forte teneur
en eau). [RGC&U, 2005]

Les mesures permettent-elles de distinguer ces zones (a) et de révéler leur caractère hétérogène (b) ?

V.6.3.2. A priori sur l'aptitude des techniques employées.

Les a priori de l'exploitation des résultats reposent, ici encore, sur la présence d'eau. Une plus forte teneur en eau :

- diminue la vitesse et augmente l'atténuation pour le radar,
- augmente la vitesse des ondes acoustiques,
- diminue la résistivité électrique.

V.6.3.3. Synthèse des résultats obtenus.

V.6.3.3.1. Radar.

Les mesures d'atténuation d'onde directe (LMDC) permettent de classer les zones de la plus humide (zone 2) à la plus sèche (zone 3). Dans les zones 1 et 4, la partie basse apparaît plus humide.

Les mesures faites par le LCPC (constante diélectrique par analyse de la vitesse des ondes directes) conduisent à des résultats différents : la zone 3 serait la plus humide et la zone 4 la plus sèche. Les cartographies ne confirment pas de gradient vertical significatif.

V.6.3.3.2. Acoustique.

Les résultats des mesures de vitesse montrent peu de différences entre les zones. Les résultats sont plus dispersés pour l'atténuation. Le classement proposé est identique à celui du radar (LMDC) et compatible avec le diagnostic visuel.

V.6.3.3.3. Electrique.

Le classement des valeurs moyennes indique que la zone 1 est la plus humide et la zone 3 la plus sèche. Un gradient vertical est relevé dans la zone 2 (plus sèche dans la partie haute), ce que ne confirme pas les constatations visuelles.

V.6.3.4. Apports du couplage.

Le zonage a priori repose sur l'emploi du radar (atténuation de l'onde directe), ce qui introduit un a priori dans les analyses ultérieures : les zones sélectionnées sont les zones les plus atténuantes au radar. A supposer que l'endommagement s'explique par une raison qui influence peu l'atténuation, une deuxième technique, même sensible à cet endommagement ne fournira pas forcément des résultats bien corrélés aux résultats radar.

Ceci illustre les difficultés qu'il y a à poser un diagnostic CND : l'expert pose des a priori sur les pathologies, et ces a priori conditionnent son approche de l'ouvrage et l'interprétation des mesures.

Il est symptomatique de constater que les différentes techniques conduisent ici à des conclusions différentes, y compris les deux modes d'exploitation des mesures radar. Les comparaisons à l'échelle des zones se heurte à quelques difficultés pratiques (bruit causé par les armatures, non coïncidence parfaite des points de mesure), mais qui sont néanmoins fort gênantes dans l'optique d'un diagnostic d'ouvrage. Il semble bien que l'on soit ici dans une situation où les techniques CND, telles qu'elles ont été employées, posent plus de questions qu'elles ne fournissent de réponse.

V.7. Bilan : exploitation des mesures combinées et valorisation du couplage.

Afin de tirer un bilan de l'ensemble des campagnes expérimentales, nous aborderons plusieurs points :

- le bilan des capacités des techniques prises isolément à qualifier des variations des propriétés du matériau,

- le bilan des pistes de valorisation du couplage qui paraissent les plus prometteuses,

- le bilan sur l'aptitude au diagnostic des ouvrages.

V.7.1. Bilan relatif aux capacités des techniques.

Le premier bilan (tableau V.15), relatif à l'aptitude des techniques, reprend le tableau V.9 du paragraphe V.5. Les conclusions synthétisées dans ce tableau, rédigées à l'issue des campagnes expérimentales de laboratoire, n'ont pas été significativement modifiées à l'issue des interventions sur ouvrages réels. Ces interventions ont cependant limité le champ d'application effectif, en particulier en raison du ferraillage.

	Radar	Capacité (fréquence)	Résistivité	Ultrasons
Teneur en eau	vitesse : amplitude :			vitesse : + atténuation :
Porosité	-	-	-	vitesse : OUI (en général)
Profondeur carbonatée	vitesse : 0? amplitude : 0?	+	+	vitesse : OUI (dispersion → prof) atténuation : -
Teneur en chlorures	vitesse : amplitude : 0	0?	- ?	0
Alcali-réaction	vitesse : - amplitude :			0 ?
Macrofissuration	0	0	-	vitesse : OUI atténuation : ++ (position, ouverture)
Armatures	Biais		Biais	Biais

 Tableau V.15 : Bilan des capacités des techniques. [RGC&U, 2005]

On retiendra donc que l'on peut :

- qualifier toutes les altérations s'accompagnant de variations d'humidité par les techniques radar, capacitive et électrique,

- qualifier la macrofissuration par les méthodes acoustiques,

- espérer qualifier la carbonatation par les méthodes électrique et acoustique (la procédure d'interprétation reste cependant à mettre au point),

- espérer qualifier la teneur en chlorures avec la technique radar (la procédure d'interprétation reste cependant à mettre au point).

V.7.2. Bilan sur les modes de valorisation du couplage.

Nous avons montré que la valorisation du couplage peut revêtir plusieurs formes :

- mode [1]: confrontation des résultats pour « confirmer » les mesures et leurs variations.

- mode [2] : confrontation des résultats pour « affiner l'interprétation » des variations : l'exploitation simultanée des résultats radar et électrique sur le chevêtre de La Marque, pour délimiter la zone atteinte de réaction alcali-granulat. L'existence de variations locales, autour d'une variation régionale, peut aussi s'avérer utile.

- mode [3] : « utilisation successive d'une technique rapide et d'une technique plus lente » et plus précise dans les zones repérées par la première technique : c'est dans cet esprit que l'on a travaillé sur la tranchée couverte de Guéthary (radar puis autres techniques).

- mode [4] : utilisation d'une deuxième technique pour « identifier un paramètre complémentaire » qui influence le résultat de la première technique, sans être le paramètre recherché a priori : c'est l'objectif le plus ambitieux, dont la mise en œuvre s'appuie sur les résultats synthétisés dans le tableau ci-dessus. Le principe repose sur l'utilisation de deux (ou plusieurs) mesures qui sont sensibles de façon différente (au minimum non strictement proportionnelle) à deux paramètres dont il s'agit de distinguer les effets.

Le cas le plus classique, souvent abordé dans ce travail est celui de la teneur en eau w, qui résulte du produit de la porosité p et du degré de saturation Sr. Les mesures apparaissent sensibles à la teneur en eau, mais l'on souhaiterait pouvoir distinguer les influences distinctes de p et de Sr.

V.7.3. Bilan sur l'aptitude au diagnostic.

Il convient de ne pas ignorer une question essentielle à laquelle nous avons été confrontés tout au long de l'étude, celle du « référentiel » dans lequel le diagnostic de l'ouvrage doit être conduit.

V.7.3.1. Indices – causes et conséquences.

Nous avons vu par exemple à de nombreuses reprises que la capacité des techniques à détecter des contrastes d'humidité conditionne la stratégie d'analyse et d'interprétation des résultats expérimentaux. Le problème est que l'eau peut tout aussi bien être le facteur qui produit

l'altération (développement d'une réaction chimique en présence d'eau) que celui qui résulte de cette altération (infiltration dans des fissures produites par un autre mécanisme). Dans les deux cas, le repérage des altérations, voire leur quantification, est possible. Cependant le diagnostic de l'ouvrage n'est pas clarifié pour autant : ce n'est que la connaissance des mécanismes qui permet de poser le diagnostic et d'envisager, si besoin, une remédiation. Le rôle de l'expert, qui n'utilise ici le CND que comme un moyen d'acquérir de l'information, demeure essentiel.

V.7.3.2. Quelle validation des conclusions?

A plusieurs reprises, la pertinence des techniques a été éprouvée par comparaison avec une référence (profondeur de carbonatation mesurée sur carottes pour les ouvrages de la A21, diagnostic rapide au radar pour la tranchée couverte). C'est donc ce premier jugement qui sert de « grille de lecture » pour évaluer et juger les résultats obtenus via le CND.

Nous avons vu et commenté les insuffisances d'une telle démarche. Améliorer la procédure passe par un questionnement plus approfondi : que cherche-t-on effectivement à évaluer ? Parler « d'évaluer l'altération » ou de la « zoner » peut figer le diagnostic sur une référence erronée : qui est sûr que le pré-diagnostic est pertinent ?

Une manière de remédier à ce problème serait de préciser le questionnement. Souvent, le problème pratique du maître d'ouvrage est l'évaluation de capacités résiduelles (durée de vie, portance...). Il conviendrait donc de qualifier l'aptitude d'une technique (ou de techniques utilisées en combinaison) à fournir des informations quantitatives sur les paramètres qui sont utilisés dans le recalcul de l'ouvrage, via une modélisation plus ou moins approfondie. Ainsi, « quantifier » la porosité, le degré de saturation en eau, la teneur en chlorures, la profondeur de carbonatation...sont de réels défis, puisque ces paramètres pourront être directement réutilisés pour le recalcul.

Conclusions générales et perspectives

Ce travail de thèse constitue une partie d'un projet de recherche national financé par le réseau génie civil et urbain RGC&U et le Ministère de la Recherche et intitulé : « Evaluation de la dégradation du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages ». Ce projet a permis de réunir neuf entités possédant des compétences très variées allant de la modélisation numérique à l'expertise d'ouvrages en passant par le traitement du signal ou la caractérisation des matériaux.

Plusieurs campagnes d'investigations en laboratoire (60 corps d'épreuve au total) et sur sites ont été réalisées. Le travail commun sur ces corps d'épreuve et ces ouvrages soumis à des pathologies variées a consisté en des campagnes de mesures coordonnées faisant appel à différentes techniques.

Parmi elles l'auscultation sonique à haute fréquence fait l'objet de cette thèse. L'utilisation des hautes fréquences est inhabituelle dans le domaine du génie civil pour des raisons de qualité du signal, mais elle s'est imposée au vu de la faible épaisseur de la couche étudiée et de la taille des discontinuités engendrées par la dégradation. Les ondes de surface ont été plus particulièrement retenues pour leur sensibilité et leur commodité de mise en oeuvre. Leur utilisation a apporté des réponses intéressantes sur l'étude de la dégradation des ouvrages en béton armé, principalement sur la peau du béton, partie extérieure du matériau, qui assure la protection de l'intérieur des ouvrages et particulièrement des armatures.

Un ouvrage de génie civil doit pouvoir servir sur une longue durée (souvent plusieurs siècles) avec un minimum d'entretien et une surveillance régulière. Une grande partie des ouvrages est en béton armé. Les armatures sont protégées de l'extérieur par quelques centimètres de béton appelés épaisseur d'enrobage. Cette couche protectrice est très importante pour la durée de vie de l'ouvrage ralentissant la corrosion des armatures et ainsi la réduction des performances mécaniques. De plus, il existe des solutions simples pour régénérer cette couche protectrice quand elle commence à se dégrader et ainsi prolonger la durée de vie de l'ouvrage à moindre coût.

Le développement de la technique d'auscultation ultrasonore a démarré par une validation en laboratoire, puis s'est prolongé par l'utilisation d'un transducteur récepteur sans contact et enfin par la mise au point d'un prototype d'appareil automatique.

Concernant le traitement des mesures, nous retiendrons du chapitre 2 que :

- la méthode « slant stack » semble être la plus précise pour la détermination de la caractéristique de dispersion de la vitesse de phase et de la vitesse de groupe lorsque les données ont un faible rapport signal/bruit,

- l'atténuation exprimée par la valeur du coefficient d'atténuation au centre de l'intervalle fréquentiel de validité semble la plus représentative.

D'autre part, la vitesse et l'atténuation se sont révélées particulièrement sensibles à la dégradation. Nous avons également démontré que la sensibilité à la dégradation augmente quand les fréquences augmentent (500 kHz et 1 MHz).

Nous retiendrons du chapitre 3 la possibilité de distinguer :

- les différentes classes de résistance de béton à l'aide des vitesses,

- les trois niveaux de fissuration imposés à l'aide des mesures d'atténuation.

Mais s'il est difficile de distinguer les teneurs en eau sur des dalles de résistance différente, par contre quand les dalles de même résistance sont considérées isolement, il est possible de les classer en fonction de leur teneur en eau à l'aide des paramètres vitesse et fréquence.

La technique n'est également pas capable de distinguer la différence de teneur en chlorure dans l'eau. Elle est seulement sensible à la porosité et donc indirectement à la teneur en eau.

La présence d'une zone carbonatée est de nature à augmenter la vitesse de propagation et à diminuer l'atténuation car la porosité se trouve remplie de carbonate solide en remplacement de la solution interstitielle liquide. De plus en jouant sur la fréquence, la profondeur de carbonatation peut être approchée.

En résumé, la vitesse de l'onde de surface est influencée par deux facteurs : l'augmentation de porosité qui diminue la vitesse de propagation, alors que la teneur en eau l'augmente. Il en est de même mais de façon inverse pour l'atténuation.

L'intérêt le plus évident de la technique ultrasonore haute fréquence est qu'elle permet de :

- détecter une fissure,
- de localiser son amorçage avant qu'elle ne soit visible,
- d'évaluer son ouverture.

Pour cela, la fissure doit se trouver au milieu d'un profil de points afin d'avoir assez d'informations sur le signal avant et après la fissure. Cette limitation pourra être levée en utilisant des capteurs émetteur et récepteur sans contact et un système automatisé.

Le chapitre 4 a présenté l'utilisation de la méthode in situ.

L'objectif des essais sur les ouvrages de l'A21 était d'évaluer la sensibilité des différentes méthodes vis-à-vis de la carbonatation. La méthode ultrasonore a permis de distinguer l'ouvrage OA1249 comme le plus carbonaté. En revanche, elle n'a pas permis de classer correctement les zones d'un même ouvrage.

Ce constat fait apparaître les limites de la méthode quand elle est mise en œuvre sur site. Les grandeurs mesurées présentent une dispersion significative sur une même zone, comparable à la différence des valeurs moyennes d'une zone à l'autre. L'imprécision des mesures étant liée à la non répétitivité du couplage du récepteur, on peut penser que la version la plus récente du dispositif, équipé d'un récepteur sans contact, permettrait d'éliminer cet inconvénient.

Les essais sur les corps d'épreuve de La Rochelle ont montré que les mesures ultrasonores ne sont pas sensibles à la teneur en chlorures, mais à l'état de saturation en eau et à la résistance du béton. La technique a permis de distinguer les trois compositions de béton M25, M50 et M75 et de faire ressortir l'existence d'un gradient de caractéristiques selon la hauteur. La technique a aussi permis de mettre en évidence la fissuration y compris sur certaines zones quand elle était invisible à l'œil nu.

Les essais sur la tranchée couverte de Guéthary ont permis de distinguer les zones selon leur teneur en eau.

Nous avons vu au chapitre 5 la plus-value apportée par la combinaison de plusieurs méthodes. Une idée de base du projet national était que en effet cela puisse apporter des données complémentaires permettant d'affiner l'analyse. Les différents essais réalisés que ce soit en laboratoire ou bien sur site ont fait systématiquement l'objet d'un croisement des techniques. Cette démarche assez contraignante (cinq équipes venant des quatre coins du pays devaient intervenir en même temps) a permis de mettre en évidence des complémentarités entre les méthodes, non seulement en laboratoire dans des conditions bien maîtrisées, mais aussi sur ouvrages.
Le projet national a permis en conclusion le développement de méthodes existantes et de nouvelles applications. Par exemple, les travaux réalisés au cours de mon doctorat ont conduit à la mise au point d'une technique utilisant des ondes de surface acoustiques de haute fréquence. De la même façon, pour la technique radar, les travaux réalisés par Gilles Klysz, doctorant également soutenu par le projet national, ont mis en évidence les potentialités de l'onde directe pour la caractérisation du béton d'enrobage. Il s'agit là de deux développements réellement innovants qui sont le résultat d'une démarche pluridisciplinaire. Jusqu'à présent les travaux ont donné lieu à une dizaine de publications ou de communications. D'autres publications scientifiques sont en cours.

Pour résumer, l'utilisation de l'onde de surface à haute fréquence permet de caractériser les premiers millimètres de l'épaisseur d'enrobage des ouvrages en béton. Il parait en perspective intéressant de développer une méthode inverse permettant à partir de la longueur d'onde de remonter directement à l'épaisseur de la couche dégradée dans la mesure où la dégradation s'accompagne d'une modification physique du béton. Ceci permettra d'optimiser les opérations de réparation par remplacement de la couche dégradée. Il parait également intéressant de développer un système de transducteurs sans couplage afin de s'affranchir des problèmes de répétitivité et de perte d'énergie et de permettre des mesures plus rapides et en plus grand nombre pour un moindre coût.

Références bibliographiques

Achenbach [1999]- Achenbach, "Wave propagation in elastic solids", Elsevier Science publishers B.V., (1999).

AFREM [1993]- « Les essais non destructifs applicables dans le domaine du béton », Rapport du Groupe de Travail, janvier 1993, (1993).

Aki [1980]- Aki T., Richards P.G., "Quantitative seismology: theory and methods", 2 volumes, W.H Freeman, San Francisco, CA, (1980).

Asselmann [1963]- Asselmann D.P.H, "Relation between effects of porosity on strength and Young's modulus of elasticity of polycrystalline materials", Journal of American Ceramic Society, volume 46, p. 564, (1963).

Azmi [1968]- Azmi Sh., "Impulse transient characteristic of media with linear and quadratic absorption laws", Izvestija, Physics of the Solid Earth, pp. 88-93, (1968).

Baker [1992]- Baker A.F., "Structural investigations, in Durability of concrete structures : investigation, repair, protection", ed. G. Mays, E&F Spon, pp. 37-81, (1992).

Bal'Shin [1949]- Bal'Shin M.Y., "Relation of mechanical properties of powered metals and their porosity and the ultimate properties of porous metal", Dokl. Akad. Nauk SSSR, 67, pp. 831-834, (1949).

BHP 2000 [1999]- Rapport de Synthèse sur le projet national BHP 2000, « Etude expérimentale sur site de vieillissement », Version 1 de janvier 1999, (1999).

Bourbié [1986]-Bourbié T., Coussy O. & Zinszner B, « Acoustique des milieux poreux », publication de l'institut français du pétrole, éditions TECHNIP. Paris. (1986)

Bungey [1996]-Bungey J.H., Millard S.G., "Testing of concrete in structures", Chapman and Hall, 1996.

Buyle-Bodin [1998]- Buyle-Bodin F., « Etude exploratoire sur le développement des outils de diagnostic », Journées d'études de la commission Construction-Bâtiment du CEFRACOR, St Rémy lès Chevreuse, pp. 109-116, 12-13 octobre 1998, (1998).

Buyle-Bodin [2003. a]- François Buyle-Bodin ,Sidi Ould Naffa , Marc Goueygou, Bogdan Piwakowski," Detection of Chemical damage in Concrete Cover Using Ultrasound" International Conference on Performance of Construction Materials, Caire Egypte 18-20.02.2003, (2003).

Buyle-Bodin [2003. b]- François Buyle-bodin, Bogdan Piwakowski, Abdelilah Fnine, Marc Goueygou, Sidi Ould Naffa, "Assessment of deteriorated concrete cover" Workshop on Nondestructive testing of materials and Structures, Varsovie, (2003).

Carde [1996]- Carde C., "Caractérisation et Modélisation de l'Altération des Propriétés Mécaniques due à la Lixiviation des Matériaux cimentaires", Thèse, INSA de Toulouse, (1996).

Chatelain [1997] - Chatelain J., Godart B., « L'auscultation des ponts : maintenance et réparation des ponts », in Calgaro J.A., Lacroix R., Presses ENPC, pp. 77-149, (1997).

Cuxac [1991]- Cuxac P., « Propagation et atténuation des ondes de ultrasoniques dans les roches fissurées et anisotropes », Thèse soutenue à l'Institut National Polytechnique de lorraine, France, (1991).

Daniels [1996]- Daniels D.J., "Surface penetrating radar", The Institution of Electrical Engineers, (1996).

Fnine [2001]- Fnine Abdelilah, « Dégradation accélérée des mortiers et bétons », Mémoire de DEA Génie Civil, Université des Sciences et Technologies de Lille, (2001).

Fnine [2003]- A. Fnine, M. Goueygou, F. Buyle-Bodin, B.Piwakowski, «Assessment of deteriorated concrete cover by high frequency ultrasonic waves" *Non-Descructive Testing in Civil Ingeneering* Berlin, sept. 2003, pp 463-469, (2003).

FSTT [1998]- « Outils d'auscultation pour les canalisations non visitables », Guide et recommandations, METL, (1998).

Frohly [1983]- Frohly J., "Etude de la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes et application de l'imagerie en mode B au contrôle non destructif", Thèse d'Etat ès Sciences Physiques, Université de Valenciennes, (1983).

Garnier [2000]- Garnier V., Corneloup G., Toppanie E. & Leygonie M, "Non-Destructive Evaluation of Concrete Damage by Ultrasound", Rama 2000, 15th WCNDT, (2000).

Gaydecki [1992]- Gaydecki P.A., Burdekin F.M., Damaj W., John D.G. & Payne P.A., "The propagation and attenuation of medium-frequency ultrasonic waves in concrete : a signal analytical approach", Measurement Science & Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 126-134, (1992).

Goueygou [2003]- M. Goueygou, B. Piwakowski, A. Fnine, M. Kaczmarek, F. Buyle-Bodin, "NDE of subsurface damage in concrete structures using high-frequency Rayleigh waves". *Ultrasonics International 2003* Granada, July 2003, (2003).

Goueygou [2001]- M.Goueygou, B. Piwakowski, S.Ould-Naffa, F.Buyle-Bodin, « Assessment of broadband ultrasonic attenuation measurements in inhomogenous media" *Ultrasonics International 2001* Delft, 2-5 July 2001, (2001).

Gudra [1999]- T.Gudra, B.Stawiski, "Non destructive strenght characterization of concrete using surface waves", NDT&E International 33 (2000), 1-6, 14 May 1999, (1999).

Hassaim [2001]- Hassaim M., Rhazi J., Ballivy G. & Khayat K., "Evaluation de l'état du béton par technique d'analyse spectrale des ondes de Rayleigh", Can. J. Civ. Eng. 28, pp. 1018-1028, (2001).

Hévin [1998]- G. Hévin, O.Abraham, H.A. Perdersen, M.Campillo, "Characterisation of surface cracks with Rayleigh waves : a numerical model". NDT&E International. Vol.31, No.4, pp 289-297, (1998).

Kinsler [1982]- Kinsler, Frey, Coppens & Sanders, "Fundamentals of acoustics", Third edition, Edited by : John Wiley & Sons, p.480, (1982).

Klimis [1988]- Klimis N., "Etude en laboratoire de l'atténuation des ondes longitudinales – Application à la caractérisation géotechnique des roches", Rapports des Laboratoires LCPC, Ministère de l'équipement, Série : géotechnique- mécanique des sols- sciences de la terre GT28, Avril 1988, (1988).

Krautkramer [1969]- Krautkramer J. & Krautkramer H., "Ultrasonics testing of materials", Springer-verlag, Germany, p.521, (1969).

Kouassi [1989]- Kouassi J., "Contribution à l'auscultation dynamique des superstructures par les mesures de la célérité et de l'atténuation des ondes planes élastiques –Application au béton", Thèse, Ecole Centrale de Paris, (1989).

Kuc [1984]- Kuc A., "Estimating Acoustic attenuation from reflected Ultrasound Signals: Comparison of Spectral-Shift and Spectral Difference Approaches", IEEE Trans on Acoustic, speech and signal processing, vol. 2(1), pp 1-6, (1984).

Lambret [1993]- Lambret A., Pralus Y. & Rivenez J., "Ultrasons : propagation des ondes ultrasonores", Niveau 2, Cahiers formation CETIM, (1993).

Lavergne [1986]- Lavergne M., « Méthodes sismiques », Edition Technip, (1986).

Lhemery [1994]- Lhemery, "A model for the transient ultrasonic field radiated by an arbitrary loading in solid", J. Acoust. Soc. Am., 96, pp. 3780-3790, (1994).

Matthews [1996]- Matthews M.C., Hope V.S. & Clayton C.R.I., "The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles", Proc. Inst. Civ. Engrs Geotech. Engng. 119, pp.84-95, (1996).

MDND [2005]- « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton », Association Française de Génie civil, Confédération Française pour les essais non destructifs. Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées, (2005).

MELT [1979]- MELT, « Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (1^{ère} partie, révisée en décembre 1995) - Dispositions applicables à tous les ouvrages », Direction des routes, Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement, 19 octobre 1979, (1979).

MELT [1998]- MELT, « Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (2^{ème} partie) » – Fascicule 03, Direction des routes, Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement, (1998).

MELT [2002]- MELT, « Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (2^{ème} partie) » – Fascicule 02, Direction des routes, Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement, (2002).

NDE [2000]- NDE, RILEM-TC NDE, "Non-destructive evaluation of concrete structures", Burghardt, comm. privée, (2000).

Nilsen [1992]- Nilsen A.U. & Aitcin P.C., "Static modulus of elasticity of high-strength concrete from pulse velocity tests", Cement, Concrete and Aggregate, Vol. 14, No. 1, pp. 64-66, (1992).

OCDE [1989]- OCDE, « Recherches routières – Durabilité des ponts routiers en béton », OCDE Paris, (1989).

Ouarradi [1999]- Ouarradi, "Etude théorique et expérimentale du champ ultrasonore transitoire généré par un transducteur plan dans un milieu solide homogène et isotrope : approche de la réponse impulsionnelle de diffraction ». Thèse Université de Valenciennes, (1999).

Ould Naffa [2004]- Ould Naffa, « Evaluation de la dégradation du béton par ondes ultrasonores ». Thèse Université de Valenciennes et du Hainault Cambresis. 15 mai 2004, (2004).

Ould Naffa [2002]- S.Ould Naffa, M. Goueygou, B. Piwakowski, F. Buyle-Bodin, «Detection of Chemical Damage in Concrete using Ultrasound », Ultrasonics Vol. 80, pp 247-251, (2002).

Papadakis [1999]- Papadakis E.P., "Ultrasonic instruments & devices reference for modern instrumentation, techniques, and technology", Academic Press, p.809, (1999).

Piwakowski [1999]- Piwakowski B. & Sbai K., "New approach to calculate the field radiated from arbitrarily structured transducer arrays", IEEE UFFC Transactions, Vol. 46, No. 2, pp. 422-440, (1999).

Piwakowski [2003]- B. Piwakowski, A. Fnine, M. Goueygou, F. Buyle-Bodin, "Generation of Rayleigh waves into mortar and concrete samples", Ultrasonics International 2003, July 2003, Granada, (2003).

Piwakowski [2004.a]- 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, (2004).

Piwakowski [2004.b]- B. Piwakowski, M. Goueygou ,A. Fnine, , F. Buyle-Bodin, "P-τ Tranformation as the efficient tool for determination of the velocity dispersion characteristics in complex structures", 16th Word Conference on Nondestructive Testing WCNDT 2004, Montreal Canada 2004, 8 pages, CD ROM 16th WCNDT2004 proceedings, (2004).

Piwakowski [2005]- Piwakowski B., « Evaluation de l'état de dégradation des poutres en béton par ultrasons ». Avril 2005, Rapport pour le CEBTP, (2005).

RGC&U [2003]- « Evaluation de la dégradation du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages », RGC&U, Décembre 2003, 3^{ème} rapport intermédiaire, (2003).

RGC&U [2005]- « Evaluation de la dégradation du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages », RGC&U, Mars 2005, 4^{ème} rapport intermédiaire, (2005).

Rhazi [2000]- Rhazi, «Fiches descriptives des techniques d'auscultation », Université de Sherbrooke, Canada, Comm. Privée, (2000).

RILEM [2000]- « Overview on methods for NDE of concrete structures», Ref. NDE-5_1, Avril 2000, (2000).

Robichon [1995]- Robichon Y., Binet C., Godart B., "IQOA : Evaluation of bridge condition for a better maintenance policy", Symposium international de l'AIPC « Extended the lifespan of structures », San Francisco, pp. 407-412, 23-25 août 1995, (1995).

Ryshkewitch [1953]- Ryshkewitch E., "Compression strength of porous sintered alumina and zirconia", Journal of American Ceramic Society, 36, pp. 65-68, (1953).

Schiller [1971]- Schiller K.K., "Strength of porous materials", Cement and Concrete Research, 1, pp. 419-422, (1971).

Selleck [1998]- Scott F. Selleck, Eric N. Landis, Michael L. Peterson, Surendra P. Shah, Jan D. Achenbach, "Ultrasonic Investigation of Concrete with Distributed Damage". ACI Material Journal, pp 27-36, (January-February 1998).

Sheriff [1993]- Sheriff R.E., Geldart L.P., "Exploration Seismology", 2^d ed., Cambridge University Press, ISBN 0-521-46826-7, (1995).

Skudrzyk [1971]- Skudrzyk E., "The foundations of acoustics-Basic mathematics and basic acoustic", Editions Springer-Verlag, (1971).

Song [2003]- W.J Song, J.S. Popovics, J.C. Aldrin, S.P. Shah., "Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete", J. Acoustical Society of America, February 2003, Vol.113, No 2, pp 717-725, (2003).

Stepanishen [1971]- Stepanishen P.R., "Transient radiation from pistrons in an infinite planar baffle", J. Acoustical Society of America, Vol. 49, pp. 1629-1638, (1971).

Suardet [1985]- Suardet R., « Physique ondulatoire », Technique et Documentation, Ed. Lavoisier, (1985).

Trousil [2001]- Trousil R.L., Waters K.R., Miller J.G., "Experimental Validation of the use of Kramers-Kröng relations to eliminate the phase sheet ambiguity in broadband phase spectroscopy", J. Acoustical Society of America, Vol. 109, No. 5, pp.2236-2244, (2001).

Uemoto [2000]- Uemoto T., "Maintenance of concrete structures and application of nondestructive inspection in Japan in NDT in Civil Engineering", pp. 1-11, Elsevier, (2000). Weight [1987]- Weight J.W., "A model for the propagation of short pulses of ultrasound in a solid", J. Acoustical Society of America, Vol. 81, pp. 815-826, (1987).

Yilmaz [1987]- Yilmaz O., "Seismic data processing", Investigations in geophysics, Society of exploration geophysicists, (1987).

Annexes

ANNEXE DU CHAPITRE 3

Annexe III.1 : Exemple de feuille de notes des différents profils de mesure des dalles

C'	/
ticc	lireec
1199	urces.

	20/01/200	dalla B25		átat sain							
	4 14b20	ualle D25		elal Salli							
	141130										
	profil p9			profil nº2			profil nº2			orofil n%	
mes	position	Position	mes	position	position	mes	position	position	mes	position	position
ure	E(cm)	R(cm)	ure	E(cm)	R(cm)	ure	E(cm)	R(cm)	ure	E(cm)	R(cm)
1	14	16	1	21	23	1	28	30	1	35	37
2	14	16,5	2	21	23,5	2	28	30,5	2	35	37,5
3	14	17	3	21	24	3	28	31	3	35	38
4	14	17,5	4	21	24,5	4	28	31,5	4	35	38,5
5	14	18	5	21	25	5	28	32	5	35	39
6	14	18,5	6	21	25,5	6	28	32,5	6	35	39,5
7	14	19	7	21	26	7	28	33	7	35	40
8	14	19,5	8	21	26,5	8	28	33,5	8	35	40,5
9	14	20	9	21	27	9	28	34	9	35	41
10	14	20,5	10	21	27,5	10	28	34,5	10	35	41,5
11	14	21	11	21	28	11	28	35	11	35	42
12	14	21,5	12	21	28,5	12	28	35,5	12	35	42,5
13	14	22	13	21	29	13	28	36	13	35	43
14	14	22,5	14	21	29,5	14	28	36,5	14	35	43,5
15	14	23	15	21	30	15	28	37	15	35	44
16	14	23,5	16	21	30,5	16	28	37,5	16	35	44,5
17	14	24	17	21	31	17	28	38	17	35	45
18	14	24,5	18	21	31,5	18	28	38,5	18	35	45,5
19	14	25	19	21	32	19	28	39	19	35	46
20	14	25,5	20	21	32,5	20	28	39,5	20	35	46,5
21	14	26	21	21	33	21	28	40	21	35	47
			22	21	33,5	22	28	40,5			
	CH1	580mV	23	21	34	23	28	41		CH1	580mV
	ge moyenna	256	24	21	34,5	24	28	41,5		age	256
	-		25	21	35	25	28	42		-	
			26	21	35,5	26	28	42,5			
			27	21	36	27	28	43			
			28	21	36,5	28	28	43,5			
			29	21	37	29	28	44			
			30	21	37,5	30	28	44,5			
			31	21	38	31	28	45			
			32	21	38,5	32	28	45,5			
			33	21	39	33	28	46			
			34	21	39,5	34	28	46,5			
			35	21	40	35	28	47			
			36	21	40,5	36	28	47,5			
			37	21	41						
				CH1	580mV		CH1	580mV			
				moyenna	056		moyenna	056			
L	1			ge	200	1	ge	200	1		







Annexe III.3 : Localisation des fissures sur le profil 3 (dalle B40).



Annexe III.4 : Localisation des fissures sur le profil 4 (dalle B40).



Annexe III.5: Localisation des fissures sur le profil 1 (dalle B60).



Annexe III.6: Localisation des fissures sur le profil 2 (dalle B60).









ANNEXE DU CHAPITRE 4

Ponts de l'A21

Annexe IV.1 : Zones auscultées sur OA 1202A.





Annexe IV.2 : Zones auscultées sur OA 1204B.



Annexe IV.3 : Zones auscultées sur OA 1247.



Annexe IV.4 : Zones auscultées sur OA 1249.



Annexe IV.5 : Résultats obtenus sur les quatre zones du pont OA1202A. (Δx=10 cm)



Annexe IV.6 : Moyenne des résultats par zone sur le pont OA1202A.



Annexe IV.7 : Résultats moyens par zone sur le pont OA1202A



Annexe IV.8 : Résultats obtenus sur les sept zones du pont OA1204B. (Δx=10 cm)



Annexe IV.9 : Moyenne des résultats par zone sur le pont OA1204B.



Annexe IV.10 : Résultats moyens par zone sur le pont OA1204B.







Annexe IV.12 : Moyenne des résultats par zone sur le pont OA1247.



Annexe IV.13 : Résultats moyens par zone sur le pont OA1247.



Annexe IV.14 : Résultats obtenus sur les sept zones du pont OA1249. (Δx=10 cm)



Annexe IV.15 : Moyenne des résultats par zone sur le pont OA1249.



Annexe IV.16 : Résultats moyens par zone sur le pont OA1249.



Corps d'épreuve immergés de La Rochelle

Annexe IV.17 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M25-17.

Annexe IV.18 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M50-17.


0.05

10 15 2 receiver position point number

20

25





0.4

0.2

Δ

8

receiver position point number

12

10

14



Annexe IV.21 : Localisation de fissures sur le corps d'épreuve M75-17E15.

Pont de la Marque





Annexe IV.23 : Vitesses obtenues par trois méthodes différentes sur les trois premiers profils.

