

*ÉCOLE DOCTORALE ÉNERGIE, MATÉRIAUX, SCIENCES
DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS*

LABORATOIRE PRISME

THÈSE présentée par :

Truong Son BUI

Soutenue le : **19 Mai 2014**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline : Génie Civil

**Caractérisation et modélisation de l'endommagement
des géomatériaux par méthode ultrasonore**

THÈSE dirigée par :

Dashnor HOXHA

Professeur, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

Philippe COSENZA

Professeur, Université de Poitiers

Zoubeir LAFHAJ

Professeur, École Centrale de Lille

JURY (*y reporter tous les membres de jury présents à la soutenance*):

Frederic PELLET	Professeur, Université de Lyon	Président
Philippe COSENZA	Professeur, Université de Poitiers	Rapporteur
Zoubeir LAFHAJ	Professeur, École Centrale de Lille	Rapporteur
Javad ESLAMI	Maître de conférences, Université de Cergy-Pontoise	Examineur
Dashnor HOXHA	Professeur, Université d'Orléans	Directeur de thèse
Duc Phi DO	Maître de conférences, Université d'Orléans	Co-encadrant

**ÉCOLE DOCTORALE ÉNERGIE, MATÉRIAUX, SCIENCES
DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS**

LABORATOIRE PRISME

THÈSE présentée par :

Truong Son BUI

Soutenue le : **19 Mai 2014**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline : Génie Civil

**Caractérisation et modélisation de l'endommagement
des géomatériaux par méthode ultrasonore**

THÈSE dirigée par :

Dashnor HOXHA

Professeur, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

Philippe COSENZA

Professeur, Université de Poitiers

Zoubeir LAFHAJ

Professeur, École Centrale de Lille

JURY (*y reporter tous les membres de jury présents à la soutenance*):

Frederic PELLET	Professeur, Université de Lyon	Président
Philippe COSENZA	Professeur, Université de Poitiers	Rapporteur
Zoubeir LAFHAJ	Professeur, École Centrale de Lille	Rapporteur
Javad ESLAMI	Maître de conférences, Université de Cergy-Pontoise	Examineur
Dashnor HOXHA	Professeur, Université d'Orléans	Directeur de thèse
Duc Phi DO	Maître de conférences, Université d'Orléans	Co-encadrant

Remerciement

Je souhaiterais sincèrement remercier mon directeur de thèse, Professeur Dashnor Hoxha, qui m'a proposé le sujet de thèse et qui m'a soutenu pendant ces quatre années. Je remercie également mon co-encadrant Duc Phi Do pour ses nombreux conseils scientifiques et ses encouragements aux moments de difficultés au cours de la thèse et en particulier pour sa grande disponibilité, ses compétences et sa gentillesse.

J'adresse tous mes remerciements aux membres du jury devant lesquels j'ai eu l'honneur de présenter les travaux de ma thèse : au Professeur Frederic Pellet de Université de Lyon pour avoir accepté de présider mon jury de thèse, au Professeur Philippe Cosenza de l'Université Poitiers ainsi qu'au Professeur Zoubair Lafhaj de l'École Central de Lille pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse, au Monsieur Javad Eslami Maître de Conférence de l'Université de Cergy-Pontoise pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Rodolphe Weber, Madame Clarisse et Monsieur Bountoum, qui m'ont aidé dans les travaux qui concernent le système ultrasonore de ma thèse.

Je remercie cordialement tout le personnel de PRISME et de l'Université d'Orléans pour leur accueil chaleureux et leurs encouragements.

Merci aussi à ma famille, à mes amis Ha, Hung, Nga, Laura, Duc, Hoa, Tu, Thien, ... pour leurs soutiens tout au long de mes études.

Sommaire

Sommaire	7
Liste des figures	9
Liste des tableaux	15
Introduction générale.....	17
Chapitre I. Propriétés mécanique effectives des géomatériaux et leur caractérisation : une revue bibliographique	21
I.1. Introduction	21
I.2. Méthodes de caractérisation des propriétés mécaniques et de l'endommagement des géomatériaux	21
I.3. Etude de l'endommagement des géomatériaux sous les sollicitations mécaniques par méthode ultrasonore : état de l'art	38
I.4. Approche micromécanique de détermination des propriétés effectives des milieux fissurés	41
I.5. Conclusions	43
Chapitre II. Conception d'un système expérimental de mesures ultrasonores	45
II.1. Introduction.....	45
II.2. Généralité sur les systèmes de mesures ultrasonores	45
II.3. Cahier des charges de conception du système des ultrasons	46
II.4. Description du système de mesures ultrasonores.....	53
II.5. Eléments externes au système.....	58
II.6. Conclusion	61
Chapitre III. Application du système DSLFIT pour caractériser l'endommagement des géomatériaux à base cimentaire sous la compression uniaxiale	63
III.1. Introduction.....	63
III.2. Élaboration du matériau	63

III.3. Dispositif expérimental d'essais de compression uniaxiale avec mesures continues des signaux ultrasonores.....	68
III.4. Résultats des essais : interprétation et discussion	73
III.5. Conclusion	85
Chapitre IV. Tomographie d'endommagement par ultrasons.....	87
IV.1. Introduction	87
IV.2. Généralité sur la tomographie.....	88
IV.3. Algorithmes de reconstruction de tomographie.....	90
IV.4. Application de la tomographie par ultrasons pour caractériser l'endommagement des géomatériaux à matrice cimentaire	98
IV.5. Conclusions	112
Chapitre V. Modélisation micromécanique de l'endommagement des matériaux à matrice cimentaire sous compression uniaxiale	113
V.1.Introduction.....	113
V.2. Description microstructurale et modèle conceptuel des matériaux à matrice cimentaire	115
V.3. Deux étapes d'homogénéisation	119
V.4. Applications numériques et validation expérimentale	122
V.5. Conclusion	136
Conclusions et perspectives	137
Références.....	141
Annexe A. Estimation des modules élastiques d'un matériau isotrope transverse.....	153
Annexe B. Expression des composantes des tenseurs d'Eshelby.....	157

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma d'évolution caractéristique de certaines propriétés en cours d'un essai de compression triaxial sur un matériau quasi-fragile (D'après [PAT78]).	22
Figure I.2 : Échelle des ondes élastiques (D'après [JAC12]).	26
Figure I.3 : Propagation et polarisation des ondes longitudinales et transversales (D'après [MAR06]).	27
Figure I.4 : Cas du milieu anisotrope : les trois polarisations (D'après [MAR96]).	28
Figure I.5 : Modes de Lamb symétriques (a) et antisymétriques (b) (D'après [JEA12]).	29
Figure I.6 : Mode de propagation des ondes de Rayleigh (D'après [FET10]).	29
Figure I.7 : Interaction d'une onde incidente avec une interface dans le cas deux milieux isotropes : (a) onde incidente P ou SV ; (b) onde incidente SH (D'après [JEA12]).	30
Figure I.8 : Interaction d'une onde incidente avec une interface séparant deux milieux dont l'un au moins est anisotrope (a) milieu incident anisotrope ; (b) milieu incident fluide (D'après [JEA12]).	31
Figure I.9 : Principe de mesure de méthode d'ultrason.	33
Figure I.10 : Diffusion par une hétérogénéité (D'après [MAR06], [CUX91]).	34
Figure I.11 : Fonction d'intercorrélation de deux signaux (D'après [DUB96], [MAR06]).	36
Figure I.12 : Transformée de Hilbert du rapport de deux spectres (D'après [MAR06], [MOU96]).	37
Figure I.13 : Piquage du temps de vol par méthode AIC (D'après [KUR05]).	38
Figure I.14 : Variation des vitesses et d'atténuation des ondes ultrasonores sous la compression hydrostatique d'une roche calcaire (D'après [PEA96]).	40
Figure I.15 : Variation des vitesses et de facteur de qualité d'onde de compression sous la compression déviatorique (essai triaxiale) d'une roche calcaire (D'après [PEA96]).	40
Figure I.16 : Tomographie de vitesse d'onde de compression et la zone facturée d'éprouvette après d'un essai triaxial (D'après [SCO04]).	41
Figure II.1 : Schéma principe du système expérimental (D'après [SCO04]).	46

Figure II.2 : Balayage de la zone intéressée à l'aide « PhasedArray » (D'après [JAI12]).	47
Figure II.3 : Structure d'un capteur ultrasonique (type de piézoélectrique) (D'après [JAC12]).	49
Figure II.4 : Divergence du faisceau d'ultrasons (D'après [JAC12]).	50
Figure II.5 : Intensité acoustique sur l'axe du faisceau (a). Distribution de l'amplitude perpendiculairement à l'axe du faisceau ultrasonore, en différents points de l'axe (b) (D'après [JAC12]).	50
Figure II.6 : Le schéma principe d'un capteur piézoélectrique P143-01.	52
Figure II.7 : Exemple d'acquisition des trois signaux émis par une céramique P143-01 sur un échantillon PVC.	52
Figure II.8 : Schéma du principe de fonctionnement du système ultrasonique.	54
Figure II.9 : Module générateur des signaux (D'après [DIA]).	55
Figure II.10 : Module adaptateur de numérisation 32 voies pour applications (D'après [DIA]).	56
Figure II.11 : Carte d'acquisition du système comprenant le module FPGA et le module E/S programmable FlexRIO (D'après [DIA]).	56
Figure II.12 : Module préamplificateur 32 canaux (D'après [DIA]).	57
Figure II.13 : Module de multiplexeur 32 canaux (D'après [DIA]).	57
Figure II.14 : Utilisation de la cire d'abeille comme couplant ultrasonore (D'après [WES04]).	58
Figure II.15 : Couplage entre les capteurs et la surface d'échantillon en utilisant comme couplant du caramel et un système de fixation par bandeaux élastiques.	59
Figure II.16 : Schéma de la plaque de protection de capteur (a) capteur origine ; (b) fiche capteur : vue de devant; (c) fiche capteur vue derrière.	60
Figure II.17 : Schéma de fixation des capteurs dans des barrettes pour la tomographie à ultrasons.	60
Figure III.1 : Description du processus d'élaboration des géomatériaux à base cimentaire (pâte de ciment, mortier et béton (D'après [MCC01]).	64

Figure III.2 : Conservation des éprouvettes de mortier sous l'eau à la température ambiante à 20°C (a) ; Échantillons utilisés pour les essais de compression (b).	68
Figure III.3 : Diagramme du dispositif de mesure ultrasonique au cours d'essai de compression uniaxiale.	68
Figure III.4 : Disposition des capteurs piézoélectriques sur les surfaces d'échantillon et la mise en place du système d'essai uniaxiale.	69
Figure III.5 : Choix de la fréquence et du nombre de voies du système.	70
Figure III.6 : Choix de l'impulsion pour l'émetteur.	71
Figure III.7 : Choix des paramètres d'acquisition.	71
Figure III.8 : Choix des paramètres d'enregistrement automatique.	72
Figure III.9 : Exporter des données des signaux pour le traitement.	73
Figure III.10 : Courbes de contrainte - déformation axiale des échantillons, obtenues en cours des essais de compression uniaxiale	74
Figure III.12 : Spectre obtenu par FFT des signaux (a) ; courbe du rapport des spectres (b).	77
Figure III.13 : L'évolution des vitesses longitudinales en fonction de chargement des différentes éprouvettes de mortier.	79
Figure III.14 : L'évolution des vitesses transversales en fonction de chargement des différentes éprouvettes de mortier.	80
Figure III.15 : Évolution des paramètres d'anisotropie de Thomsen en fonction de chargement des différentes éprouvettes de mortier.	81
Figure III.16 : Variation du coefficient d'atténuation des ondes longitudinales au cours de chargement par rapport à l'état initial des différentes éprouvettes de mortier.	83
Figure IV.1 : Principe de l'acquisition en tomographie ultrasonore par réflexion (D'après [PHI06], [FRA96]).	89
Figure IV.2 : Principe de l'acquisition en tomographie ultrasonore par transmission (D'après [PHI06], [FRA96]).	90
Figure IV.3 : Vue d'un plan de coupe de l'objet analysé et mesure des projections. Allure schématique du sinogramme correspondant à ce plan de coupe (D'après [NGU08]).	91

Figure IV.4 : Reconstruction tomographique d'un objet simple composé d'un seul voxel non nul au centre (a) ; la rétroprojection directe génère des artefacts en étoile autour du voxel central (b) (D'après [NGU08]).....	92
Figure IV.5 : Géométrie du problème de reconstruction pour les méthodes itératives. Le coefficient R_{ij} modélise le recouvrement du pixel i et du rayon j (D'après [NGU08]).....	96
Figure IV.6 : Principe de la méthode SIRT (D'après [NGU08] , [GOR74]).....	98
Figure IV.7 : Différentes étapes pour reconstruire les tomographies ultrasons.	100
Figure IV.8 : Éprouvette initialement endommagée.....	100
Figure IV.9 : Tomographie des vitesses (m/s) et des coefficients d'atténuation (dB/m) d'onde longitudinale V_P (a) et (d), d'onde transversale $V_{S,90}$ (b) et (e), d'onde transversale $V_{S,0}$ (c) et (f) de l'éprouvette initialement endommagée.	102
Figure IV.10 : Superposition des tomographies des vitesses (m/s) et des coefficients d'atténuation (dB/m) d'onde longitudinale V_P (a), d'onde transversale $V_{S,90}$ (b), d'onde transversale $V_{S,0}$ (c) de l'éprouvette initialement endommagée.	103
Figure IV.11 : Tomographie ultrasonique d'éprouvette sous la compression uniaxiale.....	103
Figure IV.12 : Tomographie des vitesses (m/s) et des coefficients d'atténuation (dB/m) à l'état initial d'onde longitudinale V_P (a) et (d), d'onde transversale $V_{S,90}$ (b) et (e), d'onde transversale $V_{S,0}$ (c) et (f).....	104
Figure IV.13 : Tomographie de la variation de lenteur ($s/\mu m$) d'onde longitudinale V_P à différentes paliers de chargement.....	106
Figure IV.14 : Tomographie de la variation de lenteur ($s/\mu m$) d'onde transversale $V_{S,90}$ à différentes paliers de chargement.....	107
Figure IV.15 : Tomographie de la variation de lenteur ($s/\mu m$) d'onde transversale $V_{S,0}$ à différentes paliers de chargement.....	108
Figure IV.16 : Tomographie de la variation des coefficients d'atténuation (dB/m) d'onde transversale V_P à différentes paliers de chargement.	109
Figure IV.17 : Tomographie de la variation des coefficients d'atténuation (dB/m) d'onde transversale $V_{S,90}$ à différentes paliers de chargement.	110

Figure IV.18 : Tomographie de la variation des coefficients d'atténuation (dB/m) d'onde transversale $V_{s,0}$ à différents paliers de chargement.....	111
Figure IV.19 : L'état de rupture d'éprouvette à la fin d'essai.	112
Figure V.1: La nucléation de nouvelles fissures à l'interface de l'inclusion et la matrice sous le chargement (D'après [VAN97]).....	115
Figure V.2 : Les différentes classes de pores dans la pâte de ciment durcie en fonction de leur taille (D'après [MEH93]).....	117
Figure V.3 : Modèle conceptuel à deux échelles du matériau à matrice cimentaire.....	119
Figure V.4 : Fonction de distribution d'orientation (a) ; fissure orientée dans la matrice cimentaire (b).	121
Figure V.5 : Zone de décohésion latérale de l'inclusion sous la compression.	121
Figure V.6 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores et des coefficients de Thomsen en fonction de contrainte (cas d'étude paramétrique de a_2 avec $a_1=0.1$).	124
Figure V.7 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores et des coefficients de Thomsen en fonction de contrainte (cas d'étude paramétrique de a_1 avec $a_2=3$).	125
Figure V.8 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores et des coefficients de Thomsen en fonction de contrainte (cas d'étude paramétrique de a_3).....	127
Figure V.9 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores et des coefficients de Thomsen en fonction de contrainte (couplage de deux mécanismes d'endommagement avec $a_1=0.2$, $a_2=3$, $a_3=1.2$, $\sigma_{lim2} = 0.6\sigma_{pic}$).....	128
Figure V.10 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de contrainte d'éprouvette <i>EC0.4SC1</i> (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=500$, $a_3=1.4$, $\sigma_{lim1} = 0.9\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.45\sigma_{pic}$).	130
Figure V.11 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de contrainte d'éprouvette <i>EC0.4SC1.5</i> (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=2500$, $a_3=1.8$, $\sigma_{lim1} = 0.96\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.5\sigma_{pic}$).	131
Figure V.12 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de	

contrainte d'éprouvette *EC0.4SC2* (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=500$, $a_3=1.35$, $\sigma_{lim1} = 0.9\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.5\sigma_{pic}$).132

Figure V.13 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de contrainte d'éprouvette *EC0.5SC1* (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=800$, $a_3=1$, $\sigma_{lim1} = 0.92\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.6\sigma_{pic}$).133

Figure V.14 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de contrainte d'éprouvette *EC0.5SC1.5* (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=800$, $a_3=1.3$, $\sigma_{lim1} = 0.92\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.62\sigma_{pic}$).134

Figure V.15 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de contrainte d'éprouvette *EC0.5SC2* (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=400$, $a_3=1.4$, $\sigma_{lim1} = 0.89\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.45\sigma_{pic}$).135

Liste des tableaux

Table II.1 : Quelques types des capteurs utilisés dans laboratoire.	51
Tableau II.2 : Les composants du système de mesures ultrasonores.....	54
Tableau III.1 : Le pourcentage des composants du ciment CEM II/B-LL 32,5R.....	65
Tableau III.2 : La composition granulométrique du sable CEN196-1-ISO679.....	66
Tableau III.3 : Récapitulatif de la formulation des différentes éprouvettes de mortier.	67
Tableau III.4 : Comparaison des vitesses ultrasons déterminées par la méthode AIC et manuel pour différents types de matériau.....	76
Tableau III.5 : Vitesses ultrasoniques mesurées à l'état initial des mortiers.....	77
Tableau V.1 : Densité initiale des fissures des éprouvettes.....	129

Introduction générale

L'endommagement des géomatériaux est un sujet de recherche très dynamique de nos jours, dont les champs d'application sont multiples : bâtiment, construction plus généralement, stockage des déchets ou du CO₂, exploitation des champs pétroliers, durabilité des matériaux etc ... Les applications de plus en plus large des géomatériaux et l'extension du champs d'application des géomatériaux au-delà des sentiers habituels sont associés par un gain d'intérêt pour comprendre les mécanismes micromécaniques à l'origine de l'endommagement et pour modéliser le comportement des matériaux endommageables et/ou endommagés. En effet, sous sollicitations mécaniques, hydriques, thermiques, chimiques, ... les matériaux en général, et en particulier les géomatériaux comme matériaux naturels et hétérogènes par excellence, subissent des changements de leurs structures, s'endommagent donc, ce qui se manifeste par un changement de leurs propriétés.

Classiquement, la caractérisation des propriétés mécaniques des géomatériaux est réalisée par des essais classiques dont la compression uniaxiale et/ou triaxiale (pour ne pas citer que les tests les plus utilisés sur tout type de géomatériau sol, roche, béton)

Au cours de ces essais, les éprouvettes du matériau à caractériser sont sollicitées par des chargements mécaniques jusqu'à la rupture. Les résultats typiques obtenus par de tels essais montrent une dégradation progressive des propriétés du matériau et une accélération de cet endommagement proche de la rupture. S'il y a bien une unanimité pour considérer ces résultats comme une manifestation claire de l'endommagement, il n'en reste pas moins que la caractérisation de cet endommagement reste encore un domaine de recherche.

La difficulté de la tâche réside dans le fait que l'endommagement est un processus qui est accompagné de façon indissociable avec une structure évolutive du matériau et donc avec une évolution de ses propriétés. Dès lors, si l'on veut caractériser l'endommagement à un état donné il faudra prendre toutes les précautions pour que le système de mesure ne change pas (ou alors de façon négligeable) l'état de fissuration du matériau à caractériser.

Par exemple au cours d'un essai de compression simple ou triaxiale évoqué précédemment, on introduit des cycles de déchargement et on identifie les propriétés élastiques en déchargement, en supposant, à juste titre qu'il n'y a pas de propagation de fissures en

déchargement ([PEN02], [DEU02], [HOX05], [ESL10]). Néanmoins, comme le démontrent plusieurs études théoriques et expérimentales, pendant le déchargement on ne peut pas préserver l'état des fissures existantes ou créées : certaines de ces fissures peuvent glisser, s'ouvrir ou se fermer (sans aucune autre propagation) conduisant à une modification sensible et non-négligeable des propriétés mécaniques ([HOX05], [ESL10]).

La nécessité d'une caractérisation rapide et ponctuelle, sans changement de l'état de la fissuration et des fissures, conduit de façon naturelle vers les méthodes de caractérisation dites non-destructives, dont la méthode ultrasonore qui fait objet des travaux de recherche de cette thèse. Le lien entre certaines caractéristiques de ces ondes et les propriétés mécaniques ou l'état de fissuration d'un géomatériau est utilisé pour déduire les propriétés mécaniques d'un matériau sous chargement et donne lieu à une estimation de l'endommagement.

Au laboratoire, la méthode ultrasonore peut être utilisée comme une méthode indépendante de caractérisation ou associée avec d'autres méthodes complémentaires (destructives ou non) pour caractériser l'endommagement. Les mesures continues des vitesses ultrasonores longitudinales et transversales au cours de chargement mécanique des échantillons sous compression uniaxiale ou triaxiale montrent une variation importante de ces vitesses, corrélée avec l'état de fissuration des matériaux ([ESL10], [WAS06], [SAR06], [HOX98]) et mettent en lumière le caractère anisotrope de la fissuration induite

Parallèlement, la tomographie par ultrasons a été utilisée largement dans plusieurs domaines, dont en génie civil pour vérifier la qualité du matériau ou pour localiser les défauts des ouvrages ([CHO95], [SCO04], [FRA96], [CHA11]). Le but d'utilisation d'une telle méthode au laboratoire est souvent la compréhension du développement de l'endommagement et sa relation avec l'état de contrainte. Scott [SCO04], a utilisé cette méthode pour donner l'image de la distribution des vitesses ultrasons au sein d'éprouvette à différentes étapes de chargement. Certains auteurs montrent qu'il est possible d'utiliser cette méthode, pour observer l'apparition des zones de fissuration et leur évolution au cours de chargement ([SCO04], [FRA96], [CHA11]).

L'objectif de cette thèse est de développer un outil de caractérisation de l'endommagement par ondes ultrasonores, puis utiliser cette technique pour caractériser, comprendre et modéliser l'évolution de l'endommagement dans les matériaux cimentaires. L'étude doit mettre en évidence l'influence (si il y'en a) des constituants microstructuraux sur les propriétés macroscopiques et l'endommagement des matériaux cimentaires sous sollicitations mécaniques. La compréhension des mécanismes de l'endommagement de ces matériaux doit

alors servir de base pour modéliser par une approche microscopique leur endommagement en cours de chargement.

La thèse est organisée en 5 chapitres.

Dans le premier chapitre on présente une étude, exclusivement bibliographique, sur les méthodes de caractérisation de l'endommagement des géomatériaux par ultrasons. Les relations liant les différentes caractéristiques des ondes ultrasonores avec les propriétés mécaniques y sont explicitées ainsi que les techniques les plus souvent utilisées dans le traitement des signaux ultrasonores.

Le deuxième chapitre est consacré à la conception et à la réalisation du système à ultrasons qui sera ensuite utilisé en accompagnement d'un système mécanique pour caractériser l'endommagement des matériaux sous contrainte. On explicite les contraintes et les exigences en accord avec les objectifs de la thèse et on justifie les choix faits pour les différents composants du système. Enfin on propose une description succincte du système mis en place. On ne détail pas le système mécanique qui accompagne le dispositif car celui-ci peut être remplacé pour tout autre système équivalent. En revanche, on s'arrête plus longtemps sur le système à ultrasons qui est relié avec le système de sollicitation mécanique par les capteurs piézoélectriques. Un nombre important de capteurs d'ondes P et S servira à réaliser une tomographie quantitative permettant ainsi à identifier à tout point du matériau un tenseur acoustique. Les capteurs piézoélectriques utilisés ici ont la particularité de pouvoir produire et/ou recevoir trois types d'ondes via trois couches piézoélectriques superposées.

Dans le troisième chapitre, on présentera dans un premier temps la procédure d'élaboration des éprouvettes du mortier objet de l'étude de caractérisation de l'endommagement des matériaux cimentaires. Puis, les dispositifs expérimentaux mis en place pour cette étude, les techniques expérimentales utilisées ainsi que les résultats des essais réalisés sur les échantillons étudiés seront abordés. Le programme expérimental se compose des essais de compression uniaxiale avec mesure en continu des vitesses des ondes élastiques ultrasonores suivant différentes directions. Les résultats de ces essais serviront de base des modélisations présentées dans le chapitre V.

Dans le quatrième chapitre, on présente une application du système à ultrasons à l'étude de l'endommagement progressif des géomatériaux à travers les tomographies des vitesses et de l'atténuation des ondes ultrasonores. Plusieurs capteurs ont été mise en place selon une géométrie bien définie et l'algorithme de reconstruction d'image par la méthode SART (Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique) a été adopté. L'application sur les

éprouvettes saines de mortier donne des résultats concordants avec les observations, surtout à la rupture, bien que la résolution reste assez grossière.

Le chapitre cinq est consacré à la modélisation micromécanique de l'endommagement des matériaux à matrice cimentaire sous la compression uniaxiale. Cette modélisation sera basée sur une analyse des résultats expérimentaux du chapitre III et sur une généralisation macroscopique des mécanismes microscopiques mis en évidence. Un modèle conceptuel est proposé pour ce type de matériau en comprend deux mécanismes principaux d'endommagement: la propagation des fissures au sein de la matrice cimentaire et la décohésion entre les inclusions et la pâte de ciment. Via un schéma d'homogénéisation en deux étapes, l'influence de ces de types d'endommagement sur l'évolution des vitesses des ondes ultrasonores a été mise en évidence.

Chapitre I. Propriétés mécaniques effectives des géomatériaux et leur caractérisation : une revue bibliographique

I.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude bibliographique de caractérisation des propriétés effectives des géomatériaux et de leur endommagement par l'utilisation des ultrasons. Nous commençons par une présentation succincte des notions générales sur les ondes ultrasonores. Ensuite, quelques résultats importants issus de la littérature en lien avec l'application de la méthode ultrasonore dans la caractérisation de l'endommagement des géomatériaux sont commentés. Enfin, une brève description de la technique d'homogénéisation des milieux fissurés clôture ce premier chapitre.

I.2. Méthodes de caractérisation des propriétés mécaniques et de l'endommagement des géomatériaux

La caractérisation des géomatériaux est réalisée au laboratoire ou in situ par différentes méthodes qui peuvent être classées d'une façon assez schématique en deux groupes : les méthodes dites destructives, où une seule série de mesures peut être effectuée à l'issue de laquelle l'échantillon testé est détruit, et les méthodes non-destructives, où les sollicitations du matériau au cours de la mesure sont telles qu'aucune modification n'est apportée au matériau.

On se restreindra ici dans la caractérisation au laboratoire des géomatériaux avec l'objectif d'identifier les méthodes qui peuvent être utilisées pour la caractérisation de l'endommagement. Ce dernier est défini comme étant le processus de modification irréversible de la structure d'un matériau manifesté par une modification des propriétés de ce dernier.

Dans la figure 1 ([PAT78]) sont résumés d'une façon schématique les évolutions attendues des certaines propriétés clés des géomatériaux quasi-fragiles en cours d'un essai de compression triaxiale. Les différents points caractéristiques (A à D) schématisent les différentes phases du comportement d'un géomatériau sous chargement, à savoir (voir figure I.1):

- phase I : fermeture éventuelle des fissures préexistantes,

- phase II : phase élastique,
- phase III : initiation et propagation de nouvelles fissures,
- phase IV : coalescence des fissures et propagation instable.

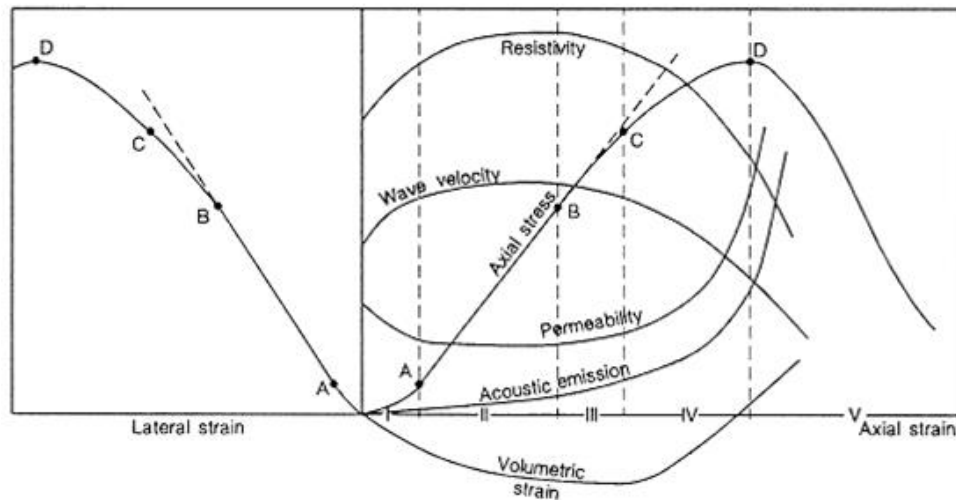


Figure I.1 : Schéma d'évolution caractéristique de certaines propriétés en cours d'un essai de compression triaxial sur une roche (D'après [PAT78]).

En particulier, sur la figure I.1 on observe la corrélation entre certaines courbes et les phases d'initiation, propagation et coalescence de fissures, signifiant que la mesure de telles propriétés peut être utilisée pour caractériser l'état d'endommagement d'un géomatériau.

1.2.1. Méthodes destructives

La caractérisation des propriétés mécaniques des géomatériaux par les méthodes destructives basée sur les essais de compression (uniaxiale, triaxiale...) est largement adoptée dans la littérature. Le principe de ces essais consiste à solliciter des éprouvettes du matériau à caractériser par des chargements mécaniques croissants dans des dispositifs expérimentaux adaptés, allant souvent jusqu'à la rupture. La vitesse de chargement, les dimensions et la forme des échantillons à tester sont normalisés afin d'éviter les effets d'échelle et d'autres artefacts de mesures (norme NF EN 196-1). Les propriétés mécaniques d'un matériau ainsi que leur évolution au cours de chargement peuvent être identifiés en analysant les résultats de ces essais. L'exemple le plus répandu est celui des essais de compression triaxiale, dont les propriétés mécaniques (module de Young, coefficient de Poisson, déformations inélastiques non linéaires et la résistance du matériau) sont déterminées à partir des courbes contraintes-déformations. Concernant les matériaux quasi fragiles, les résultats de ces essais montrent

typiquement une dégradation progressive des propriétés mécaniques au fur et au mesure que matériau s'approche à la rupture finale ([ESL10], [HOM00], [HOX00], [SHA06]). Cette évolution est expliquée de manière phénoménologique par la naissance, la croissance et la coalescence des microfissures à l'échelle microscopique. Ces explications sont complétées par les mesures basées sur les observations à la surface de l'éprouvette ou bien sur les lames minces à l'aide d'un microscope.

Microscope optique

Il s'agit de la méthode de caractérisation de l'endommagement basée sur l'observation directe à l'aide d'un microscope optique, après un essai [JAC12]. Cette méthode peut également être effectuée *in-situ* [MER06] en utilisant une caméra munie d'un microscope optique à faible grossissement.

Les observations directes des structures endommagées permettent de visualiser les microfissures et de déterminer leur forme, taille, orientation, nombre, répartition, interaction et coalescence. En effet ces observations à la surface d'une éprouvette préalablement polie peuvent être complétées par les observations internes à l'aide d'un microscope sur les découpages à lames minces (voir par exemple [MOO95], [ZHA98], [AMI02]). Ainsi, afin d'observer l'évolution de l'endommagement, il est nécessaire de réaliser plusieurs lames minces à différents stades de la déformation ([TAP76], [HOM00], [HOX00], [NIS02], [KAT04], [HAD76], [HOX05]) et donc d'utiliser plusieurs échantillons supposés identiques. Si ces méthodes microscopiques permettent une quantification et une description de l'évolution de l'endommagement, elles sont cependant destructives et les observations restent bidimensionnelles selon des plans (plans de coupe des lames minces) dont l'ensemble ne peut décrire fidèlement la structure souvent tridimensionnelle de l'endommagement.

1.2.2. Méthodes non destructives

Dans les années récentes, plusieurs méthodes dites non destructives sont de plus en plus utilisées comme des méthodes indépendantes ou associées avec les méthodes destructives pour caractériser l'endommagement des matériaux. Le principe général de ces méthodes non destructives consiste à mesurer une propriété physique du matériau qui varie en fonction de l'évolution de l'endommagement. Ces propriétés physiques peuvent être la perméabilité, la résistivité électrique, la variation du volume de l'échantillon, les vitesses de propagation des ondes élastique, etc (voir figure I.1). La caractérisation d'une de ces grandeurs physiques, sensible à la variation de l'état des fissures d'un échantillon au cours d'un essai mécanique, présenterait donc une méthode non destructive. Parmi les méthodes nondestructives on

donnera quelques détails sur la thermographie infrarouge, la radiographie, les méthodes électriques et électromagnétiques, les émissions acoustiques et les vitesses des ondes ultrasonores (cette dernière sera notée comme la méthode ultrasonore par la suite).

Thermographie infrarouge

Cette méthode consiste à chauffer rapidement la surface du matériau inspecté, au moyen, par exemple de lampes flashes, et suivre ensuite la propagation du champ de température grâce par exemple à une caméra thermique [MCC01]. En fait, le rayonnement infrarouge d'un corps chauffé, de nature électromagnétique, est converti par le camera en image visible avec différentes palettes de couleurs auxquelles sont associées les températures. La présence d'un défaut se manifeste alors localement sur les images de thermographie par un retour anormalement lent à la température ambiante (voir par exemple [FET10], [JAC12], [THO11]).

Radiographie

La radiographie est une technique d'imagerie de transmission, par rayons X (dans le cadre de la radiographie X), ou par rayons gamma (en gammagraphie). Les rayons X et gamma sont des ondes électromagnétiques comme les faisceaux lumineux ordinaires qui ont une longueur d'onde sensiblement inférieure et une énergie de rayonnement supérieure aux rayons lumineux ([JAC12], [MCC01]). En effet, il s'agit de former une image qui traduit l'absorption subie par un rayonnement ionisant qui traverse l'objet à étudier. Cette technique permet de détecter les cavités et les fissures dans les pièces du matériau dont l'épaisseur peut être importante. Néanmoins elle est assez complexe, coûteuse et présente quelque limite, notamment dans ses capacités de contrôle des surfaces planes ([JAC12], [JEA12]).

Méthode électrique et électromagnétique

Ces méthodes sont basées sur la mesure de la différence du potentiel de courant ou de la capacité électrique au sein du matériau. Les variations des grandeurs électriques sont dues soit à des réactions électrochimiques dans le matériau, soit à des sollicitations artificielles [LAT03]. Différentes méthodes peuvent être distinguées selon le type de mesure réalisée : la résistivité électrique, le potentiel de corrosion, la résistance de polarisation. En génie civil et en tant que méthodes CND, elles sont dédiées principalement à la caractérisation de l'état de corrosion. Les mesures de la résistivité peuvent également être utilisées seules ou en

combinaison avec d'autres méthodes à la caractérisation de l'état de fissuration des matériaux ([REV14], [ARA12], [FET10]).

Emissions acoustiques

Cette méthode est basée sur un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à une sollicitation, notamment lorsqu'il y a la formation ou la propagation d'une fissure. La localisation de l'évènement sismique et l'analyse des signaux permettent d'obtenir des informations inédites sur l'intensité de l'évènement et sur sa nature même (cisaillement, ouverture). Plus souvent ces émissions acoustiques dans les géomatériaux sont capturées par un ou plusieurs capteurs piézoélectriques d'une fréquence de 100Hz à 10kHz ([WAS06], [ESL10], [FET10]).

1.2.3. Méthode non destructive de caractérisation par ultrasons

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement à la méthode non destructive par ultrasons dont l'efficacité pour caractériser l'endommagement des matériaux a été montrée dans plusieurs travaux ([FOR05], [ESL10]). Ces études ont mis en évidence la sensibilité des ondes ultrasonores à la variation des propriétés mécaniques et géométriques des matériaux. En effet, les caractéristiques des ondes ultrasonores (notamment les vitesses de propagation et l'amplitude) subissent des modifications qui sont liées essentiellement à l'interaction de l'onde avec le matériau. Dès lors, plusieurs avantages se présentent et confèrent à ces méthodes une potentialité vis-à-vis de l'évaluation des propriétés et donc de l'endommagement des matériaux.

Le principe de la méthode de caractérisation par ultrasons consiste à exciter la structure du matériau par une source vibratoire, le plus souvent un transducteur piézoélectrique qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique, et réciproquement. L'utilisation de transducteurs permet de contrôler la forme et la durée de l'impulsion afin d'avoir une source répétitive et très énergétique. Les mesures peuvent être réalisées soit sans contact direct, soit avec contact direct ou en immersion sous l'eau. Les mesures avec contact nécessitent l'utilisation d'un couplant entre le transducteur et le matériau afin de s'affranchir de la perte fréquentielle du signal [PIE00]. Cependant, le couplant introduit sa propre atténuation et une certaine non répétitivité des mesures. Dès lors, pour se débarrasser des problèmes liés au couplage, des mesures sans contact ont été adoptées par plusieurs auteurs (voir par exemple [GOU09]). La première méthode de mesures sans contact consiste à utiliser comme un milieu intermédiaire entre la source et l'échantillon à tester un liquide, le plus souvent de l'eau

(mesure en immersion). L'application de cette méthode sur le milieu poreux est peu pertinente, étant donnée l'effet de la pénétration de l'eau dans les pores du matériau, sur les caractéristiques du milieu. La deuxième méthode sans contact consiste à utiliser un couplage par air. Cette dernière méthode permet une meilleure répétitivité des mesures mais l'énergie transmise à la mesure est assez faible.

D'autres techniques peuvent être utilisées pour générer et recevoir des ondes ultrasonores notamment les interféromètres lasers [CHE09]. Ces dernières sont précises, ponctuelles et rapides. Elles sont généralement utilisées en réception. Cependant, ces sources sont peu énergétiques et peu adaptées à un matériau très atténuant comme les géomatériaux. En plus, leur appareillage présente un coût très élevé et elles sont peu adaptées pour des mesures in situ.

1.2.3.1. Généralités sur les ondes ultrasonores

a. Fréquence

Par définition les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité. En continuation de la gamme sonore, les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15kHz à plus de 100 MHz.

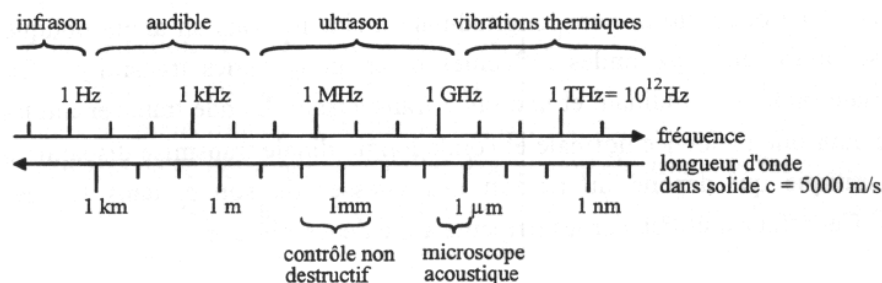


Figure I.2 : Échelle des ondes élastiques (D'après [JAC12]).

La gamme de 0.1 à 10 MHz couvre la grande majorité des applications des ultrasons en contrôle non destructif industriel. Cela n'est pas un hasard car ces fréquences correspondent, pour les matériaux courants, à des longueurs d'onde ultrasonore de l'ordre du millimètre, valeur réalisant un bon compromis entre directivité, absorption, détectabilité des petits défauts, facilité de réalisation d'appareillages électroniques et de transducteurs fiables et économiques.

b. Les différents types des ondes ultrasonores

Selon la nature du milieu (fluide ou solide), une onde est entièrement décrite par une grandeur scalaire comme la pression ou par une grandeur vectorielle comme le déplacement particulaire.

- Milieu fluide et gaz : En milieu fluide, des ondes de compression-dilatation peuvent se propager : l'onde se propage en comprimant puis en détendant de proche en proche des tranches de fluide. La direction de déplacement des particules est appelée polarisation, et lorsque l'on peut mettre en évidence, au moins localement, une direction de propagation, ces ondes prennent le nom d'ondes longitudinales. Leur polarisation est en effet parallèle à la direction de propagation ([JEA12], [CUX91].

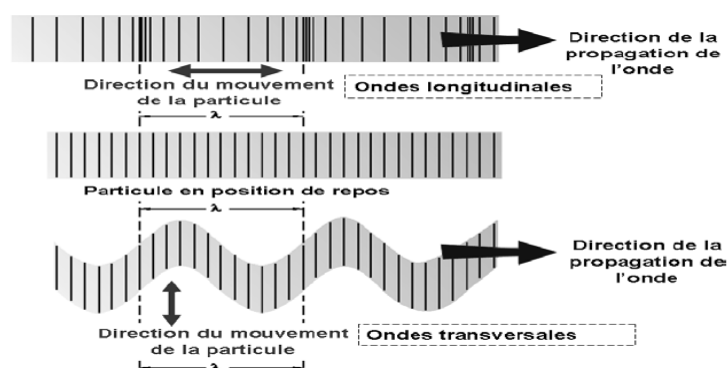


Figure I.3 : Propagation et polarisation des ondes longitudinales et transversales
(D'après [MAR06]).

- Milieu solide isotrope : Dans un tel solide, en plus des ondes longitudinales on peut constater aussi la propagation des ondes transversales. Ces dernières, liées à des contraintes de cisaillement, se propagent sans variation de volume. Pour ces ondes, lorsque l'on peut mettre en évidence une direction de propagation, le mouvement particulaire (polarisation) est perpendiculaire à la direction de propagation. Pour la plupart de matériaux courants, la vitesse de propagation des ondes transversales, est environ deux fois plus faible que la vitesse de propagation des ondes longitudinales.

En outre, l'influence de l'état de saturation sur les propriétés ultrasoniques (vitesse, amplitude) d'un matériau poreux a fait objet de nombreux travaux dont une grande partie concerne des calculs prédictifs de vitesses ultrasoniques sur un matériau multiphasique ([CUX91], [CUX92], [BOU86]). La propagation d'une onde purement élastique dans un milieu biphasique solide/liquide a été décrite par Biot ([BIO56], [BIO62]) qui a introduit les notions de couplage inertiel fluide-solide et de déplacements relatifs de ces deux phases. Les relations entre la saturation partielle et propriétés ultrasoniques sont plus complexes ; leur

analyse nécessite des suivis expérimentaux très rigoureux et fait intervenir, d'un point de vue théorique, des mécanismes à l'échelle du pore (écoulements locaux) et des notions de distribution des fluides dans les réseaux poreux ([PIE00], [DAV93]).

- Milieu solide anisotrope : Contrairement au solide isotrope, un solide anisotrope n'a pas les mêmes caractéristiques dans toutes les directions. Notamment pour les géomatériaux, on peut mentionner à titre d'exemple le comportement typique de type isotrope transverse des argilites [HOM06], les matériaux rencontrés dans le contexte de stockage des déchets radioactifs. L'anisotropie de ce type de matériau due à la stratification significative peut avoir une influence importante aux propriétés physiques (mécaniques, thermiques, hydrauliques) mesurées suivant différentes directions [HOM06].

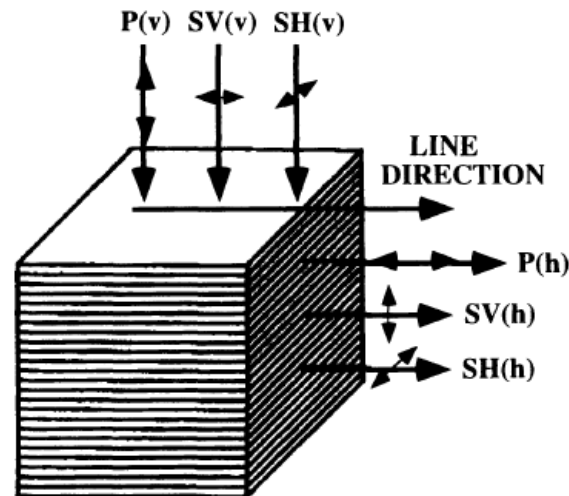


Figure I.4 : Cas du milieu anisotrope : les trois polarisations (D'après [MAR96]).

De manière générale, pour un tel matériau, pour une direction de propagation donnée, il y a trois types d'onde (au lieu de deux en milieu isotrope) dont la polarisation n'est plus ni parallèle, ni perpendiculaire à la direction de propagation. L'onde, dont la direction de polarisation est la plus proche de la direction de propagation prend le nom d'onde quasi longitudinale et les deux autres, d'ondes quasi transversales. L'onde quasi longitudinale est généralement celle dont la vitesse de propagation est la plus grande.

- Onde de Lamb : Des ondes guidées très utilisées en contrôle non destructif sont les ondes de Lamb qui se propagent dans la totalité de l'épaisseur d'une pièce, d'où le terme également employé d'ondes de plaque [JEA12], [PER93]. Les modes de Lamb purs se propagent dans une plaque isotrope environnée de vide. Ces sont des combinaisons d'ondes longitudinales et transversales [ROY96]. Lorsque cette plaque est plongée dans un fluide, ces

ondes sont appelées «ondes de Lamb généralisées». En milieu isotrope, deux types de modes sont obtenus [ROY96]: les modes de Lamb symétriques pour lesquels la première et la dernière interface du matériau vibrent symétriquement par rapport au plan médian (figure I.5a), et les modes de Lamb antisymétriques pour lesquels ces interfaces vibrent parallèlement (figure I.5b). Les ondes de Lamb n'existent que pour certains couples (vitesse, fréquence) qui sont déterminés par les relations de dispersion de ces ondes.

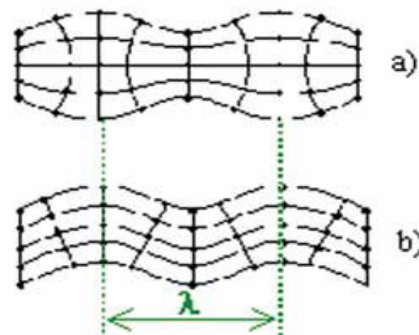


Figure I.5 : Modes de Lamb symétrique (a) et antisymétrique (b) (D'après[JEA12]).

- Onde de Rayleigh : Dans le cas d'un solide isotrope, linéaire, élastique semi-infini limité par une surface plane, un autre mode de propagation apparaît au voisinage de la surface de solide. L'onde générée par ce mode de propagation est appelée onde de Rayleigh. Le mouvement des particules présente deux composantes, une composante longitudinale et une composante transversale, déphasées de $\pi/2$ (figure I.6). En conséquence, la polarisation de l'onde est elliptique. Ces ondes se propagent dans une épaisseur proportionnelle à la longueur d'onde et s'atténuent avec la profondeur. La vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh, notée V_R , est légèrement inférieure à la vitesse de l'onde transversale V_s [FET10].

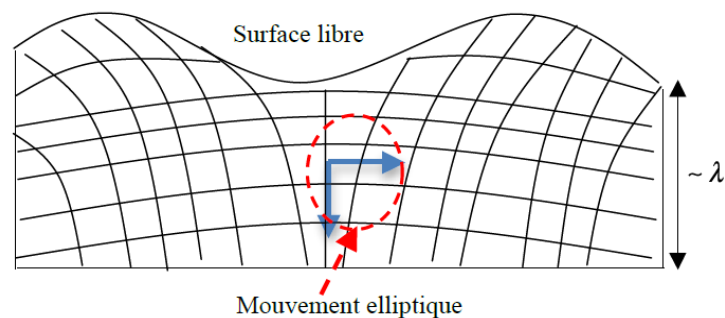


Figure I.6 : Mode de propagation des ondes de Rayleigh (D'après [FET10]).

c. Interaction des ondes ultrasonores avec une interface

Dans le cas où deux milieux semi-infinis sont séparés par une interface plane, la nature des ondes réfléchies et transmises à l'interface dépend de la nature de l'onde incidente (longitudinale, transversale, quasi-longitudinale (notée QP), quasi-transversale (notée QS)) et de la nature des milieux (fluide, solide isotrope ou anisotrope). On appelle plan sagittal (ou plan d'incidence), le plan perpendiculaire à l'interface qui contient la direction de propagation.

- Dans le cas des milieux fluides et solides isotropes le plan de l'interface sert de référence pour repérer la polarisation des ondes transversales : une onde transversale de polarisation contenue dans le plan de l'interface, c'est-à-dire telle que les particules vibrent parallèlement à ce plan au passage de l'onde, est appelée onde transversale horizontale (notée SH). Une onde transversale de polarisation contenue dans le plan perpendiculaire au plan de l'interface, c'est-à-dire que les particules vibrent parallèlement à ce plan au passage de l'onde, est appelée onde transversale verticale (SV) ([ROY96], [JEA12]).

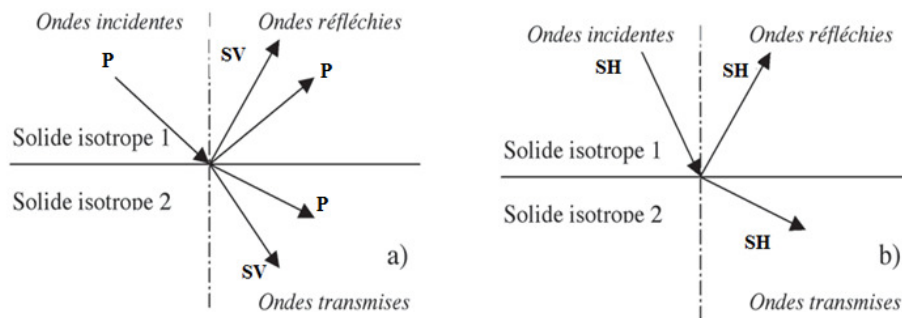


Figure I.7 : Interaction d'une onde incidente avec une interface dans le cas de deux milieux isotropes : (a) onde incidente P ou SV ; (b) onde incidente SH (D'après [JEA12]).

Une telle onde donc est polarisée dans le plan sagittal. Rappelons que l'onde longitudinale (P) est toujours polarisée dans le plan perpendiculaire au plan de l'interface, c'est-à-dire parallèlement au plan sagittal. C'est l'onde incidente qui, en imposant un déplacement dans le plan sagittal, impose la nature des ondes réfléchies et transmises. Ainsi, une onde incidente P, donc polarisée dans le plan sagittal, et faisant vibrer les particules uniquement dans ce plan, par raison de symétrie, ne pourra générer que des ondes faisant vibrer les particules dans le même plan, c'est-à-dire des ondes P et SV comme figure I.7a. De même, une onde incidente SV ne pourra générer que des ondes SV et P. Si grâce à l'interaction avec l'interface, une onde de nature différente (par exemple SV) de celle de l'onde incidente (P par exemple) est

générée, on dit qu'il y a conversion de mode. Cette conversion peut se produire aussi bien par réflexion (onde dans le milieu d'incidence) que par transmission (onde dans le deuxième milieu). Un raisonnement analogue démontre qu'une onde incidente SH, polarisée perpendiculairement au plan sagittal, ne pourra générer que des ondes faisant vibrer les particules perpendiculairement au plan sagittal, c'est-à-dire des ondes SH (figure I.7b) (voir détails dans travaux de [JEA12], [CUX91], [PER93]).

- Dans le cas des milieux anisotropes où les ondes ne sont pas purement longitudinales ou transversales, l'interaction d'une onde incidente avec une interface séparant deux milieux anisotropes génère trois ondes dans chaque milieu. Dans le cas pratique d'un contrôle dans l'eau, l'onde incidente est toujours longitudinale et génère trois ondes dans la pièce à contrôler : une onde quasi-longitudinale (QP) et deux ondes quasi-transversales (QS1 et QS2) (figure I.8). Dans certaines configurations, il peut arriver que l'une ou plusieurs des trois ondes a un coefficient de transmission nul ([ESL10], [JEA12]).

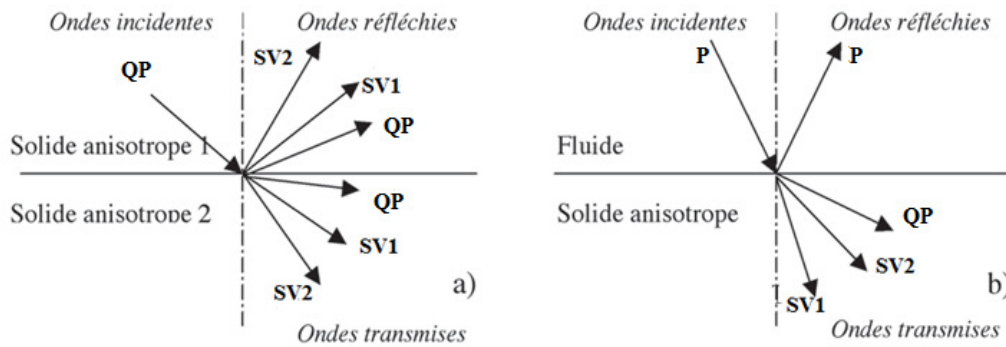


Figure I.8 : Interaction d'une onde incidente avec une interface séparant deux milieux dont l'un au moins est anisotrope (a) milieu incident anisotrope ; (b) milieu incident fluide (D'après[JEA12]).

d. Vitesse de propagation des ondes ultrasonores et leurs relations avec les propriétés mécaniques

La propagation des ondes ultrasonores dépende de la nature du milieu qu'ils propagent. Dans un milieu homogène, élastique, linéaire, isotrope et infini de masse volumique ρ , l'équation du mouvement des ondes élastique s'écrit :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \text{div} T_{ij} \quad (\text{I.1})$$

où T_{ij} est le tenseur des contraintes ; ρ est la masse volumique ; u_i est le vecteur déplacement. En tenant en compte la loi de comportement élastique linéaire et les relations entre le tenseur de déformation e_{ij} et le vecteur de déplacement u_i :

$$T_{ij} = \lambda \text{tr}(e_{ij}) \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \quad (\text{I.2})$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{I.3})$$

l'équation (I.1) devient :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}(\vec{u})) + \mu \Delta(\vec{u}) \quad (\text{I.4})$$

Par le théorème de Poisson, le déplacement u_i peut s'écrire comme la somme de deux potentiels, un potentiel scalaire $\overrightarrow{\text{grad}}(\varphi)$ et un potentiel vecteur $\overrightarrow{\text{rot}}(\psi)$. Comme $\text{div}(\vec{\psi}) = 0$ (condition de jauge), on peut séparer les ondes transversales et des ondes longitudinales : $\vec{u}_p = \overrightarrow{\text{grad}}(\varphi)$ est le déplacement des ondes longitudinales alors que $\vec{u}_s = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{\psi})$ est le déplacement des ondes transversales. Par conséquent l'équation (I.4) peut être décomposée en deux relations distinctes :

- Équation de propagation de l'onde longitudinale :

$$\Delta \varphi - \frac{\rho}{(\lambda + 2\mu)} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{I.5})$$

- Équation de propagation de l'onde transversale :

$$\Delta \psi - \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{I.6})$$

D'où on a l'expression des vitesses de propagation longitudinales et transversales :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{et} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (\text{I.7})$$

Nous savons qu'un matériau isotrope peut être caractérisé par son module d'élasticité (E) et son coefficient de Poisson (ν):

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Ainsi on peut également exprimer les vitesses de propagation en fonction du module d'Young E et le coefficient de Poisson ν comme les suivantes:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (\text{I.8})$$

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

Ces relations permettent de déduire les propriétés élastiques d'un matériau isotrope à partir des vitesses V_p et V_s :

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}; \quad \nu = \frac{1}{2} \frac{1 - 2(V_s/V_p)^2}{1 - (V_s/V_p)^2} \quad (\text{I.10})$$

Les relations entre les vitesses ultrasons et les modules élastiques dans le cas d'un milieu anisotrope sont présentées dans l'annexe (A).

En pratique, les vitesses de propagation des ultrasons sont évaluées à partir des mesures de temps de vol d'une impulsion de compression (onde longitudinale) ou de cisaillement (onde transversale) à travers le matériau. Pour cela, on utilise deux capteurs d'ultrasons : l'un est l'émetteur et l'autre est récepteur qui sont placés en contact avec l'échantillon du matériau. La vitesse d'ultrason est déterminée par le rapport entre la distance de ces deux capteurs et ce temps de vol (figure I.8) :

$$V = \frac{L}{T} = \frac{L}{T^r - T^e}; \quad (\text{I.11})$$

Dans la formule (I.11), le temps de vol T est défini par la différence entre le temps de piquage du signal reçu au récepteur T^r et du signal envoyé par l'émetteur T^e , respectivement. Les détails de la méthode de piquage sont présentés dans le paragraphe suivant.

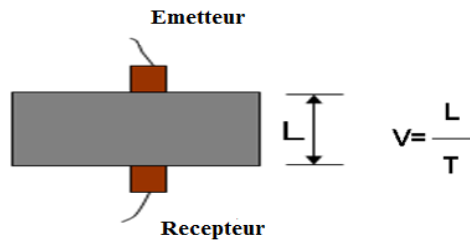


Figure I.9 : Principe de mesure de méthode d'ultrason.

e. Atténuation

Le signal ultrasonique qui se propage dans un milieu s'atténue au cours de son trajet. Cette atténuation est due à des interactions entre l'onde et le milieu de propagation qui provoque une diminution de l'amplitude de l'onde et une perte préférentielle de ses hautes fréquences.

L'atténuation est quantifiée par un coefficient d'atténuation α [PIE00]. Il existe deux types d'atténuation :

- Dans le cas d'un milieu homogène parfaitement élastique, l'atténuation est apparente, sans perte d'énergie. Elle est liée à la divergence du faisceau ultrasonore. Elle est nulle dans le cas de l'onde plane et inversement proportionnelle à la distance par rapport à la source pour une onde sphérique.

- Dans un milieu non homogène ou non élastique, s'ajoute une perte d'énergie due aux interactions entre la microstructure du milieu et l'onde. Dans ce cas on distingue l'atténuation intrinsèque et extrinsèque. La première ne dépend ni de la géométrie, ni de la méthode et de la configuration de mesure mais plutôt de la nature du matériau. En effet ce type d'atténuation est causé par deux catégories de phénomènes ([MAR06], [PIE00], [CUX91]):

- L'absorption : Elle résulte de la conversion de l'énergie mécanique vibratoire en chaleur. Ce type d'atténuation intrinsèque est lié à la viscosité du matériau contrôlé. La dissipation de l'énergie sous forme de chaleur est due d'une part à des pertes thermoélastiques résultant du déphasage entre contrainte et déformation, et d'autre part à la non linéarité entre la contrainte et le déplacement atomique. Certains défauts cristallins comme les dislocations peuvent contribuer à l'atténuation par absorption.
- La diffusion : Dans le cas de la diffusion (aussi appelée dispersion), une fraction de l'onde est déviée ou réfléchi lors de la rencontre de discontinuités de l'impédance acoustique. Ces hétérogénéités acoustiques peuvent être des pores, des précipités, des inclusions, des joints de grains, ou encore des défauts... Ici, une partie de l'énergie "quitte" le trajet rectiligne prévu par la théorie.

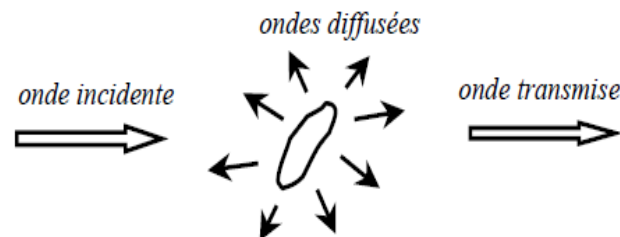


Figure I.10 : Diffusion par une hétérogénéité (D'après [MAR06], [CUX91]).

L'autre type d'atténuation dite extrinsèque est dû à la diffraction de l'onde sur les discontinuités ou obstacles dans le matériau (grains, pores, microfissures). Ce type

d'atténuation peut être important lorsque la longueur d'onde devient comparable à la taille de l'hétérogénéité. Le calcul de l'atténuation est généralement réalisé à l'aide d'une méthode dite rapport des spectres. En effet, l'amplitude spectrale d'un signal propagé dans le matériau décroît de manière exponentielle par rapport à la distance l :

$$A^{ref}(f) = A^0(f).G^r(l).e^{-\alpha^r(f).l}; \quad (I.12)$$

$$A(f) = A^0(f).G(l).e^{-\alpha(f).l}; \quad (I.13)$$

Dans les équations (I.12) et (I.13) $A^0(f)$, $A^{ref}(f)$ et $A(f)$ sont respectivement les amplitudes spectrales de l'onde émise et des ondes reçues sur les échantillons d'un milieu de référence et du milieu étudié. En plus $\alpha^r(f)$ et $\alpha(f)$ sont les coefficients d'atténuation de ces deux milieux qui dépendent de la fréquence f . Le facteur géométrique $G(f,l)$ présente la réflexion, réfraction et diffraction. Ainsi, le rapport des spectres s'écrit comme suivant:

$$\ln(A^r / A) = \ln(G^r / G) + (\alpha(f) - \alpha^r(f)).l; \quad (I.14)$$

Considérons la même géométrie de deux échantillons du milieu de référence et du milieu étudié : le rapport G^r / G indépendant de la fréquence f est égal à 1 et donc le premier terme à droite de l'équation (I.14) est égal à zéro. D'ailleurs, au laboratoire, aluminium est souvent choisi comme le milieu de référence due au fait que son coefficient d'atténuation est très faible $\alpha^r \approx 0$. Nous avons ainsi:

$$\alpha(f) = \frac{1}{l} \ln\left(\frac{A^r}{A}\right) \quad (I.15)$$

Généralement le coefficient d'atténuation dépende linéairement de la fréquence f . Ainsi ce coefficient peut être déterminé à partir de la pente de la courbe représentant le rapport des spectres $\ln(A^r / A) / l$.

Le coefficient d'atténuation peut être évalué en (Np/m) ou (dB/m) grâce à la relation suivante :

$$\alpha[dB / m] = 8.686[Np / m] \quad (I.16)$$

L'atténuation des ondes peut également être caractérisée par un paramètre dit facteur de qualité Q qui est inversement proportionnel avec le coefficient d'atténuation:

$$Q = \frac{\pi.f}{V.\alpha} \quad (I.17)$$

1.2.3.2. Piquage automatique du temps de vol

Nous présentons dans cette partie quelques techniques de piquage automatique du temps de

vols qui sont couramment utilisées en pratique. Cette étape joue un rôle essentiel lorsqu'on doit déterminer les vitesses des ultrasons pour un nombre important de mesures.

a. Méthode d'intercorrélation

Le principe de cette technique est basé sur la mesure précise de l'écart de temps de vol τ entre le signal étudié et le signal dit référence dont le temps de vol est connu. Il s'agit en effet d'une mesure de leur degré de similitude de forme et de position. Mathématiquement, la fonction d'intercorrélation de deux signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ est définie par [DUB96] :

$$C_{s_1 s_2}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(u) s_2(u-t) du \quad (\text{I.18})$$

Cette fonction d'intercorrélation présente un maximum à $t = \tau$, où τ corresponde au décalage temporel à appliquer au signal $s_2(t)$ pour qu'il se superpose au mieux au signal de référence $s_1(t)$. A titre d'exemple sur la figure I.11 sont présentés deux signaux expérimentaux et leur fonction d'intercorrélation. Le décalage temporel entre les deux signaux est déduit de l'abscisse du maximum de la fonction.

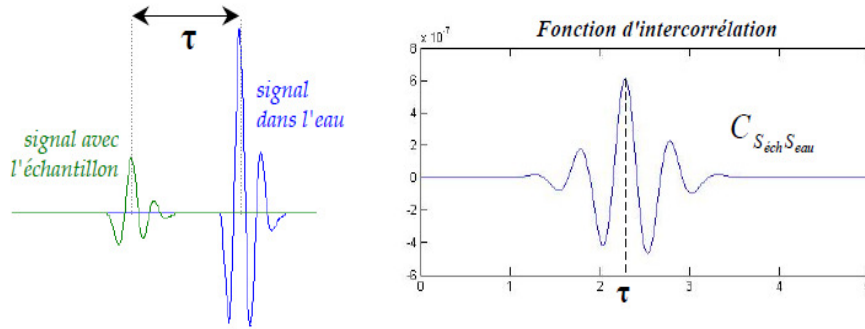


Figure I.11 : Fonction d'intercorrélation de deux signaux (D'après [DUB96], [MAR06]).

b. Méthode de Hilbert

D'après ([AUD96], [MOU96]) la transformée de Hilbert d'une fonction $g(t)$ est le produit de convolution de $g(t)$ par $-1/\pi t$:

$$TH(g(t)) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g(u)}{t-u} du; \quad (\text{I.19})$$

D'ailleurs, la transformée de Hilbert de la fonction $g(t)$ peut aussi s'écrire dans le domaine spectral : $TH(g(t)) = \text{Fourier}^{-1}(-j.\text{signe}(f)G(f))$ où $G(f)$ désigne la transformée de Fourier de la fonction $g(t)$.

Cette méthode de transformée de Hilbert peut être utilisée pour déterminer le temps de vol d'un signal quelconque. Dans ce cas la transformée du rapport de spectre $G(f) = S_{\text{échan}}(f)/S_{\text{eau}}(f)$ présente deux branches hyperboliques, d'asymptote verticale située à l'abscisse $t = \tau$ où τ est l'écart temporel entre le signal étudié $S_{\text{échan}}(t)$ et le signal connu mesuré sous l'eau $S_{\text{eau}}(t)$.

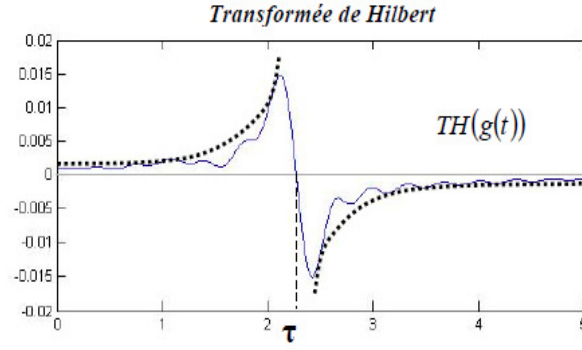


Figure I.12 : Transformée de Hilbert du rapport de deux spectres (D'après [MAR06], [MOU96]).

c. Méthode AIC (Akaike Information Criterion)

Cette méthode est basée sur le critère d'Akaike (Akaike Information Criterion, AIC) développé par [AKA74] et [KIT78]. En effet [AKA74] a montré que toute série temporelle peut être décomposée en segments localement stationnaires, chacun pouvant être modélisé par un processus autorégressif utilisant des fonctions statistiques comme la variance de la série. Considérons un signal $S(t)$ qui peut s'exprimer sous la forme discrète $S(t_k)$. La fonction AIC calculée en chaque point de ce signal de longueur N est définie comme :

$$AIC(k) = k \cdot \log[\text{var}(S(1, k))] + (N - k - 1) \cdot \log[\text{var}(V(k + 1, N))]; \quad (\text{I.20})$$

Dans l'équation (I.20) l'indice k représente le point correspondant à $S(t_k)$, $\text{var}(S(1, k))$ désigne la variance de la série S sur l'intervalle $[S(t_1), S(t_k)]$. Le temps de vol du signal est défini par le minimum global de la fonction AIC.

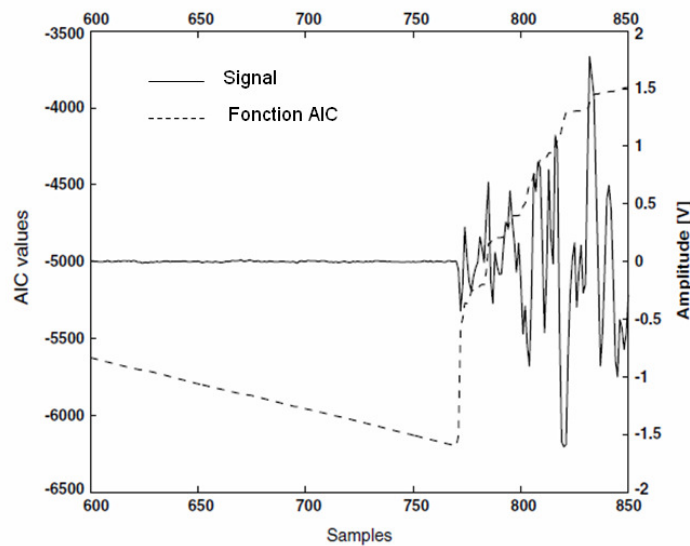


Figure I.13 : Piquage du temps de vol par méthode AIC (D’après [KUR05]).

I.3. Etude de l’endommagement des géomatériaux sous les sollicitations mécaniques par méthode ultrasonore : état de l’art

L’endommagement d’une éprouvette d’un géomatériau (roche, béton...) sous sollicitations mécaniques est connu comme un phénomène progressif qui a lieu au cours de chargement (phases III et IV sur la figure I.1). Macroscopiquement, l’endommagement se manifeste par la dégradation des propriétés mécaniques dont l’origine peut être expliquée par la nucléation, la croissance et la coalescence des microfissures à l’échelle microscopique.

La figure I.1 montre une relation étroite entre les vitesses des ondes ultrasonores et les propriétés mécaniques due aux liens intimes entre propriétés mécaniques et vitesses des ondes (voir équations I.9 et I.10 ainsi que l’annexe A). De manière naturelle donc, l’étude de la variation des vitesses ultrasonores constitue un outil de caractérisation de l’endommagement dû au changement microstructural (notamment du à l’ouverture/ fermeture des microfissures préexistantes, la nucléation, la propagation et la coalescence des nouvelles fissures) du matériau au cours de chargement.

Dans la littérature plusieurs études ont mis en évidence l’évolution des vitesses des ondes en fonction de la contrainte imposée sur des éprouvettes de différents géomatériaux. Dans le cas des essais de compression hydrostatique, différents auteurs ([YIN92] , [PEA96], [MAR00], [SAR06], [KIN09], [LOC13]...) ont constaté une augmentation de toutes les vitesses avec le confinement qui est expliquée par la fermeture des pores aplaties ou microfissures préexistantes.

Dans les essais de compression déviatorique (uniaxial, triaxial) la phase de fermeture initiale des fissures est accompagnée d'une augmentation des vitesses des ondes notamment dans la direction de la contrainte maximale en compression. A l'inverse, dans la direction perpendiculaire à cette contrainte majeure de compression la phase de l'ouverture et de la propagation des fissures est marquée par une chute des vitesses [SAY95]. Cette variation des vitesses indique l'anisotropie induite du matériau par la fissuration. Ce phénomène a été constaté par de nombreux auteurs sur plusieurs types des roches (voir par exemple les travaux de [YIN92], [SAY95], [JOS96], [GUE06], [SAR06], [ESL10], [PIA11], [LOC13]). Cette même tendance est mise en évidence pour les bétons et les mortiers sous chargement uniaxial, ([SHO10]). Ces auteurs ont observé sur ces matériaux cimentaires l'évolution des vitesses des ondes en trois phases successives : une première phase d'une légère augmentation des vitesses, suivie par une phase où les vitesses restent quasi constantes avant une diminution très forte dans la troisième étape quand la contrainte s'approche au pic. D'après [UCH97], [QUA03], la chute des vitesses se produit lorsque la contrainte atteint environs 80% de la contrainte ultime.

Une évolution avec le chargement est aussi constatée pour les coefficients d'atténuation des ondes ultrasonores. A travers des essais de compression hydrostatique, ([YIN92], [PEA96]) ont constaté que plus la contrainte de confinement est importante, plus l'amplitude spectrale d'onde de compression est importante, indiquant ainsi un plus faible coefficient d'atténuation (figure I.14).

En plus, différentes études théoriques et expérimentales ont mis en lumière une anisotropie induite du coefficient d'atténuation sous chargements déviatoriques ([CHI09], [CAR12], [BES07]). Concrètement, sous un chargement mécanique une diminution d'atténuation est marquée suivant la direction parallèle à la direction de contrainte majeure en compression alors qu'elle peut augmenter suivant la direction perpendiculaire. Il semble en plus que l'évolution du coefficient d'atténuation avec les chargements est plus forte que l'évolution des vitesses ([YIN92], [PEA96], [CHI09]). [CHI09] ont montré dans leurs mesures sur les roches que l'anisotropie de vitesse longitudinale est de l'ordre de 10 à 38% tandis que l'anisotropie d'atténuation atteinte de 114 à 153% pour les mêmes chargements. [RAH10] arrivent à la même conclusion et préconisent l'utilisation du coefficient d'atténuation à la place des vitesses pour caractériser l'endommagement des matériaux.

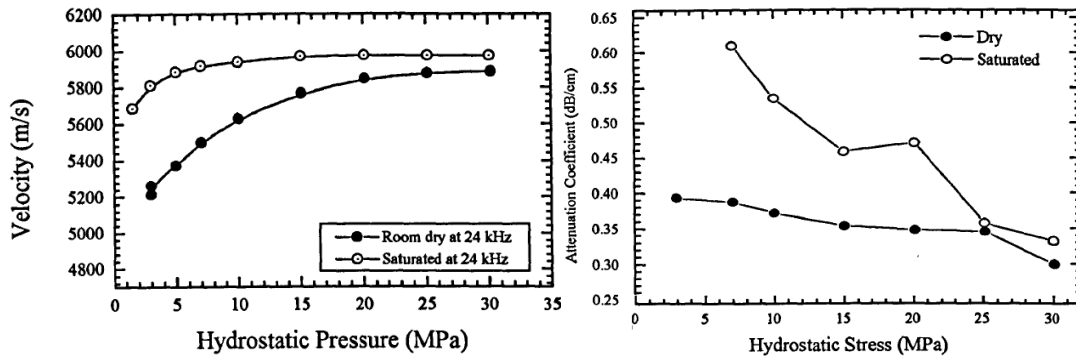


Figure I.14 : Variation des vitesses et d'atténuation des ondes ultrasonores sous la compression hydrostatique d'une roche calcaire (D'après [PEA96]).

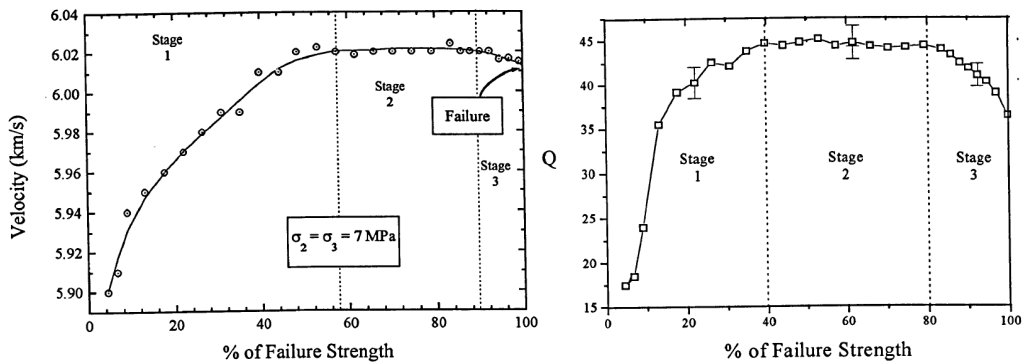


Figure I.15 : Variation des vitesses et de facteur de qualité d'onde de compression sous la compression déviatorique (essai triaxiale) d'une roche calcaire (D'après [PEA96]).

Si le nombre de capteur d'ultrasons utilisé est suffisant, il est possible d'identifier spatialement une distribution des vitesses ou du coefficient d'atténuation au sein de l'éprouvette testé via la technique de tomographie. Cette technique a été utilisée par [CHO95] pour étudier le comportement d'un échantillon de granite lors d'un essai de compression uniaxiale. Ces auteurs ont montré à partir des images du champ de vitesse une anisotropie initiale du matériau due à la microfissuration préexistante. Puis, ils ont mis en évidence dans un deuxième temps l'influence de la contrainte axiale dans le développement de la fissuration. Les images issues de leurs travaux illustrent une augmentation plus rapide des lenteurs des ondes ultrasonores (la lenteur étant l'inverse de la vitesse) suivant les directions perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette. Ce phénomène a été expliqué par l'ouverture des microfissures parallèlement à la contrainte principale majeure et leur coalescence. Dans son rapport [SCO04] a détaillé les résultats de la tomographie par ultrasons d'une roche calcaire

au cours d'un essai triaxial. Ses résultats indiquent une légère augmentation du champ de vitesse longitudinale au milieu d'éprouvette aux premiers instants d'application de la contrainte déviatorique. Le champ de vitesse est stable avant de décroître lorsque la roche approche la rupture. L'image de la distribution des vitesses des ondes ultrasonores au pic montre une zone au centre d'échantillon où le champ de vitesse diminue fortement. Cette zone est concordante avec la zone facturée observée sur l'éprouvette après essai (figure I.16).

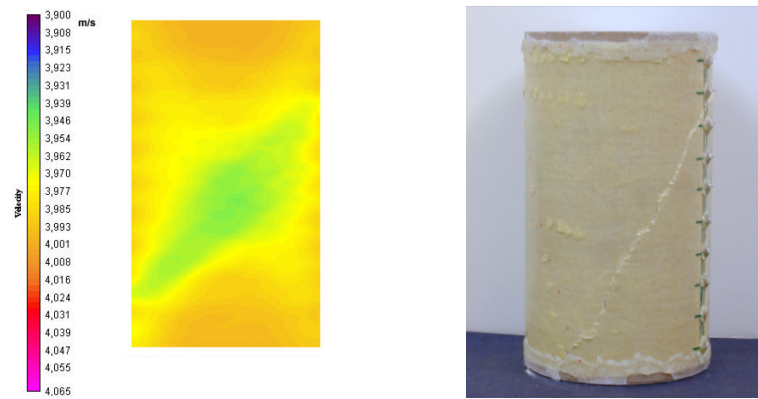


Figure I.16 : Tomographie de vitesse d'onde de compression et la zone facturée d'éprouvette après un essai triaxial (D'après [SCO04]).

I.4. Approche micromécanique de détermination des propriétés effectives des milieux fissurés

L'approche micromécanique basée sur le travail pionnier d'Eshelby [ESH57] est un outil très efficace pour déterminer les propriétés macroscopiques (propriétés effectives) d'un milieu hétérogène à partir de sa description microstructurale. Dans cette approche la contribution de chaque composant aux propriétés effectives est prise en compte à travers un processus d'homogénéisation. En effet, la célèbre solution d'Eshelby enrichie dans le cas d'un milieu hétérogène multiphasique composant de N phases, donne une relation linéaire entre les déformations locales et les déformations macroscopiques :

$$\varepsilon_i = A_i : E; \quad (i = 1, \dots, N); \quad (\text{I.21})$$

Dans l'équation (I.21), ε_i et E sont la déformation moyenne de chaque phase i et la déformation macroscopique imposée, respectivement. En plus A_i est un tenseur quatrième ordre appelé tenseur de localisation. Un opérateur de moyenne est ensuite utilisé pour déterminer les propriétés effectives :

$$C_{\text{hom}} = \langle C : A \rangle = \sum_{i=1}^N f_i C_i : A_i; \quad (\text{I.22})$$

où f_i et C_i représentent la fraction volumique et le tenseur d'élasticité de la phase i . Dans la littérature, différents schémas ont été proposés pour estimer le tenseur d'élasticité homogénéisé C_{hom} . La différence de ces schémas d'estimation réside sur la méthode de détermination du tenseur de localisation A_i . Dans le cas le plus simple, où la distribution des phases est diluée, ce tenseur s'écrit comme le suivant :

$$A_i = [I + P : (C_i - C)]^{-1}; \quad (i = 1, \dots, N); \quad (\text{I.23})$$

Le tenseur de localisation de la phase i dépend donc des propriétés de cette phase elle-même C_i , de la phase de référence C et d'un tenseur dit tenseur de Hill P . Ce dernier tenseur est lié avec le tenseur d'Eshelby S_E par cette relation:

$$P = S_E : C^{-1}; \quad (\text{I.24})$$

[ESH57] a montré que le tenseur S_E (qui porte le nom d'Eshelby) dépend de la géométrie d'inclusion représentant la phase i . L'expression analytique de ce tenseur pour certaines géométries simples peut être trouvée dans des ouvrages spécialisés (voir par exemple le travail de [MUR87]).

En particulier pour un milieu solide isotrope (C_s) affaibli par N familles des fissures ayant la forme de disque (type « penny-shaped »), le tenseur d'élasticité homogénéisé est écrit comme suit :

$$C_{\text{hom}} = C_s : (I - \frac{4}{3} \pi \sum_{i=1}^N d_i A_i); \quad (\text{I.25})$$

En effet, dans le cas du milieu fissuré, les propriétés effectives ne dépendent plus à la fraction volumique mais plutôt la densité des fissures qui est proportionnelle au nombre de fissure pour une unité de volume $d_i = N_i a_i^3$ (voir [DEU02], [ZHU06] pour plus de détails). En outre le tenseur de localisation dans ce cas est déterminé comme :

- cas de fissure ouverte :

$$A_i = \lim_{\chi \rightarrow 0} \chi (I - S_E^i)^{-1}; \quad (\text{I.26})$$

- cas de fissure fermée :

$$A_i = \lim_{\chi \rightarrow 0} \chi K : (I - S_E^i : K)^{-1}; \quad (\text{I.27})$$

Le paramètre χ dans les formules (I.26 et I.27) représente le coefficient de forme (rapport d'aspect) des fissures. En outre les tenseurs d'ordre 4 I et K sont définis comme :

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2}(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}); \\ J &= \frac{1}{3}\delta_{ij}\delta_{kl}; \quad K = I - J; \end{aligned} \quad (\text{I.28})$$

où δ_{ij} désigne le delta Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ si $i = j$ et $\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$).

Lorsque la densité des fissures est plus importante, il est nécessaire de prendre en compte leur interaction. Parmi différents schémas permettant de rendre compte cette interaction, le schéma Mori-Tanaka [MOR73] est probablement la plus utilisée pour sa simplicité. Le principe de cette méthode est de considérer chaque inclusion i ($i = 1, \dots, N$) immergée dans une matrice solide soumise à un chargement fictif à déterminer E^0 . Le développement du schéma donne la forme du tenseur de localisation de chaque phase comme :

$$A_i = [I + P : (C_i - C_s)]^{-1} : \left[f_s I + \sum_{j=1}^N f_j [I + P : (C_i - C_s)]^{-1} \right]^{-1}; \quad (\text{I.29})$$

Application de ce schéma dans le cas du milieu fissuré, conduit à l'expression du tenseur de rigidité élastique effective ([DEU02], [ZHU06]) :

$$C_{\text{hom}} = C_s : \left[I + \frac{4}{3}\pi \sum_{i=1}^N d_i A_i \right]^{-1}; \quad (\text{I.30})$$

où le tenseur de localisation A_i dans (I.30) s'écrit comme (I.26) ou (I.27) correspondant aux cas des fissures ouvertes et fermées.

I.5. Conclusions

L'étude bibliographique réalisée dans ce premier chapitre montre que la méthode des ultrasons peut être utilisée comme un outil efficace pour la caractérisation l'endommagement des géomatériaux. En combinant cette méthode avec les essais classiques de compression il serait possible de pouvoir suivre la dégradation progressive des propriétés mécaniques, au cours de chargement mécanique et de répondre aux questions concernant les mécanismes responsables du changement microstructural du matériau. Particulièrement, la technique de reconstruction des images (tomographie) à partir des mesures des vitesses ou des atténuations des ondes ultrasonores permettrait d'illustrer les processus et les mécanismes en jeux. La performance de cette méthode sera vérifiée dans le cadre de ce travail de thèse dont l'objectif est d'étudier les mécanismes contrôlant le comportement des géomatériaux à matrice cimentaire.

Chapitre II. Conception d'un système expérimental de mesures ultrasonores

II.1. Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter le système expérimental conçu et mise en place pour caractériser l'endommagement des géomatériaux par méthode ultrasonique. Si le principe de la méthode ultrasonore est largement connu et la méthode est utilisée avec succès à différents buts, la mise en place du système avec des caractéristiques particuliers et en accord avec nos objectifs, a été révélé une tâche très chronophage. En fait, la construction d'un système particulier est motivé par l'ambition de ne pas avoir seulement des indications globales sur l'évolution des vitesses des ondes, mais aussi des informations locales permettant de dégager les grande tendances des mécanismes d'évolution de l'endommagement que les systèmes « clés à la main » se trouvant dans le marché ne permettent pas d'obtenir. En fait les systèmes commerciaux se limitent souvent à un nombre limité de transducteurs (plus souvent un pair de transducteurs d'ondes P) ou alors sont construits sur la base d'un fonctionnement en mode réflexion. A cette première limite s'ajoute le fait que les transducteurs du marché sont de grande taille, conçus pour augmenter ainsi la puissance transmise. Leur taille sera dans notre cas un obstacle dans la recherche d'une résolution optimale de la tomographie (voir chapitre IV).

En fait, il existe dans le marché des systèmes d'un ensemble de capteurs en réflexions (array of capteurs) souvent utilisés pour les imageries ultrasonores à haute résolution. Ces systèmes sont néanmoins inadaptés pour notre cas puisque ils demandent des surfaces de contacts adaptées à la forme de la tête des sondes. Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons et analysons différents éléments utilisés par certains auteurs ([SCO04], [WES04]) qui semblent proche de notre idée initiale du système ultrasonore à concevoir.

Elle sera suivie par une deuxième partie où on décrira le système DSLFIT (Diagnostic Sonar Ltd's Flexrio Toolbox) développé dans le cadre de cette thèse avant une brève description des caractéristiques de ce système.

II.2. Généralité sur les systèmes de mesures ultrasonores

Un système de caractérisation d'endommagement des géomatériaux sous chargement mécanique sera en fait un ensemble de deux parties : l'une permettant de réaliser un essai mécanique classique et l'autre un système de génération, transmission et acquisition des

signaux ultrasonores. Le schéma de principe d'un tel système est indiqué sur la figure II.1 [SCO04].

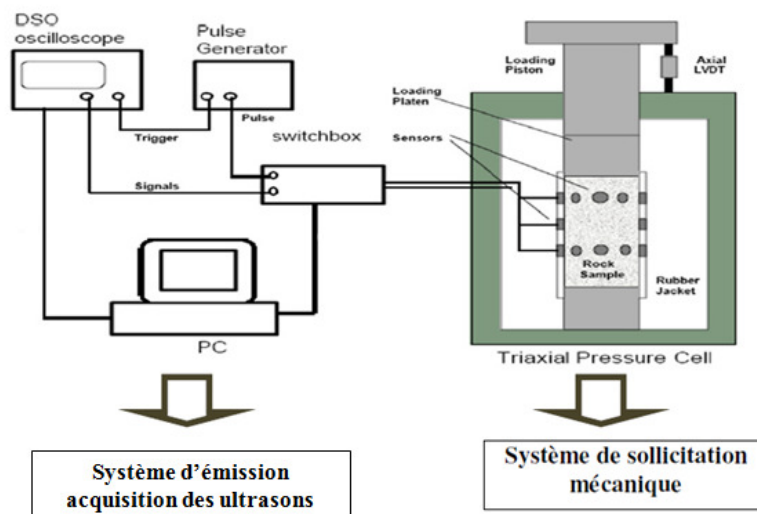


Figure II.1 : Schéma principe du système expérimental (D'après [SCO04]).

Dans ce système, ce sont les transducteurs piézoélectriques qui assurent le lien entre la chaîne de génération/acquisition des signaux et l'échantillon qui est en cours de chargement mécanique. Ces transducteurs doivent assurer d'une certaine façon la transmission de l'onde créée vers l'échantillon.

Le système mécanique peut être quelconque pourvu qu'un contact direct soit assuré entre les transducteurs et l'échantillon. Cette contrainte de contact direct entre les transducteurs piézoélectriques et l'échantillon limite néanmoins le système mécanique aux dispositifs de type compression uniaxiale. Des rares systèmes ultrasonores utilisés au cours des essais de compression triaxiale demandent des modifications importantes des cellules de compression triaxiale pour permettre in fine l'utilisation qu'un nombre très limité de capteurs à ultrasons. De par ce qu'il existe à notre accès et conformément aux objectives de la thèse on se limite à un système mécanique de compression simple et nos efforts sont donc concentrés sur le système d'émission/acquisition des ultrasons (appelé par la suite système des ultrasons).

II.3. Cahier des charges de conception du système des ultrasons

En mettant comme objective principale la mise en œuvre d'un système d'émission/acquisition des ondes ultrasonores pour la caractérisation de l'endommagement des géomatériaux en cours de chargement, la question a été posée sur le choix du matériel à utiliser à cette fin. Le

cahier des charges reflète donc les contraintes imposées dans la conception et les objectifs à attendre.

II.3.1. Choix du mode d'émission/acquisition des ultrasons : réflexion ou transmission ?

La principale différence entre les différents systèmes à ultrasons est sans doute celle entre le principe de récupération de l'onde après émission : soit l'onde est récupérée après avoir parcouru le milieu à étudier (transmission) soit après qu'elle soit réflétiée par celui-ci ou par les interfaces entre ses composants (réflexion). Il faudra donc faire un choix d'abord sur la mode de fonctionnement du système : sera-t-il en transmission ou en réflexion ? Pour la mode de réflexion, ou méthode «pulse-écho», la mesure est effectuée par un capteur (ou par un ensemble de capteurs mise en parallèle du type « Phased Array»). Dans le cas de la méthode ultrasonore par transmission, les mesures sont effectuées au moyen d'au moins deux capteurs placées dans deux points opposés du matériau qu'on veut caractériser : un émetteur et un récepteur.

Si la méthode par réflexion semble séduisante car des systèmes très performants en échographie ont été déjà conçus et utilisés un peu partout en contrôle et diagnostique, il ne reste pas moins que pour des solides à qualité de surfaces incontrôlables, tels que les géomatériaux, leur utilisation semble compromise. En fait, afin d'obtenir une résolution acceptable il est souhaitable dans ce cas d'utiliser un ensemble de transducteurs sur le concept de Phased Array (figure II.2).

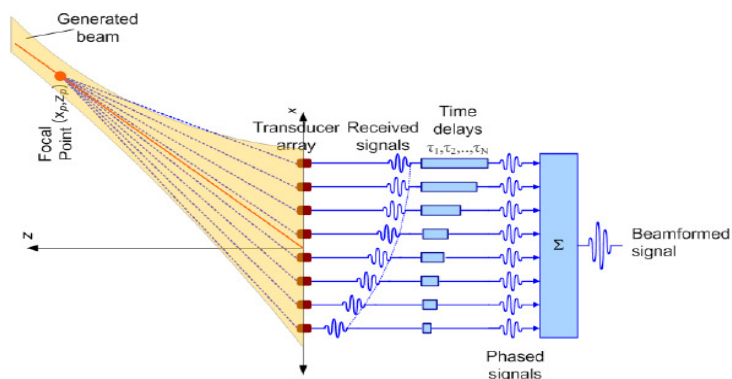


Figure II.2 : Balayage de la zone intéressée à l'aide « Phased Array » (D'après [JAI12]).

Or l'interprétation des signaux dépendra fortement de leur qualité et surtout ne peut pas se faire sans une connaissance précise de la géométrie des capteurs de PhasedArray, ce qui impose que les différents transducteurs qui le forment soient liés entre eux de façon rigide. Il est en pratique difficile d'assurer un bon contact entre cet élément rigide d'une taille de

plusieurs centimètres et un solide avec une surface imparfaite, avec des imperfections de taille du même ordre.

On peut imaginer d'assurer la transmission des ondes vers le matériau en utilisant un contact intermédiaire « souple ». Ce milieu intermédiaire souple est alors plus généralement un fluide (air ou plus souvent de l'eau) [FET10]. Cette configuration présenterait des avantages, notamment la maîtrise de l'interface (échantillon/milieu intermédiaire) mais représentent certainement un certain nombre d'inconvénients. Parmi ces inconvénients, l'impossibilité d'utilisation des ondes de cisaillement semble une limite majeure qui va à l'encontre de nos objectifs. En fait, l'utilisation de ce type d'ondes (en parallèle avec l'utilisation d'autres types d'ondes) peut apporter des informations irremplaçable quant à l'état de fissures (ouvertes/fermes) ou de leur état de saturation ([ESL08], [SAR06]). Cela nous conduit définitivement à écarter toutes méthodes sans contact et de par cette même occasion de se diriger plus vers les mesures par transmissions en laissant néanmoins ouverte la possibilité de revenir vers une mode de réflexion si dans un deuxième temps cela apparaît opportun.

II.3.2. Choix des transducteurs à ultrasons

Le choix des transducteurs à ultrasons est guidé en grande partie par les exigences en termes de fréquence, énergie transmise et dimensions. Ayant fait le choix de privilégier les mesures par transmission, il est important que la surface de contact du capteur avec le solide à étudier, soit la plus petite possible pour surpasser des défauts de surfaces, fréquentes pour les géomatériaux. Cette exigence est renforcée par la volonté d'avoir un nombre maximal de capteurs qui puissent être collés sur la surface du solide, afin de pouvoir aller vers une tomographie avec une résolution acceptable. Or les petites dimensions vont généralement à l'opposé de la puissance qui peut être transmis par un capteur et un compromis est à trouver en utilisant en parallèle des outils permettant de minimiser/maximiser certaines effets.

II.3.2.1. Généralité sur les capteurs ultrasoniques

Quelques notions de base sur les capteurs ultrasoniques sont données ici afin de justifier les choix faits par la suite. La plupart des capteurs ultrasoniques utilisés en CND (Contrôle Non Destructif) sont des capteurs piézoélectriques dont le principe de fonctionnement consiste à se déformer sous un champ électrique ou produire un potentiel électrique lorsqu'ils se déforment. La réciprocité du phénomène (production d'une vibration mécanique à partir d'une impulsion de tension électrique et la production d'un signal électrique lorsqu'ils se déforment) permet l'utilisation des piézoélectriques comme transducteurs ultrasonores

[MIC81].

Cet effet piézoélectrique, caractérisé par les paramètres g (constantes de pression) et K (facteur de couplage) se trouve renforcé dans les céramiques piézoélectriques de synthèse, dont les plus utilisées sont celles en titanate de baryum, bien que deux autres variétés offrent des performances plus grandes : le PZT, titanatezirconate de plomb et le métaniobate de plomb. Il est aussi clair que l'effet piézoélectrique vibratoire sera d'autant plus grand que les vibrations soient grandes, ce qui conduit à chercher à exciter le cristal ou le polycristal proche de sa résonance mécanique. En pratique, cela revient à utiliser une lame piézoélectrique d'épaisseur a telle que [JAC12]:

$$f_0 = \frac{V}{2a} \quad (\text{II.1})$$

avec f_0 étant la fréquence fondamentale de vibration du transducteur, et V la vitesse de l'onde. Notons néanmoins que dans la littérature, on trouve d'autres versions de capteurs ultrasoniques. Ainsi nous avons constaté l'utilisation de trois types de capteurs ultrasoniques : les capteur piézoélectriques (qui restent notre choix)[ELS10], les capteur électro-magnéto-acoustique (EMA)[GIL92] et les capteurs laser[MAR06].

Schématiquement un capteur piézoélectrique se compose de trois composants: une pastille céramique avec des faces métallisées et raccordées avec un conducteur électrique ; une face avant, dont le rôle est de protéger la pastille et d'assurer le couplage entre la pastille piézoélectrique et le matériau à étudier et enfin un bloc amortisseur [JAC12]. Ce dernier est placé derrière la pastille piézoélectrique et a pour but d'une part de dissiper l'énergie rayonnant vers l'arrière et d'autre part de moduler le spectre ultrasonore et amortir les effets de la résonance mécanique de la pastille. Très souvent on trouve dans un tel capteur une bobine électrique constituant un capteur qui est généralement utilisé en émetteur-récepteur [JAC12], [MIC81].

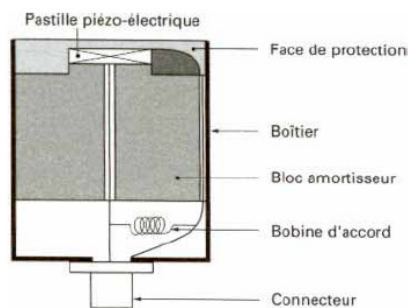


Figure II.3 : Structure d'un capteur ultrasonique (D'après [JAC12]).

En CND, la gamme des fréquences utilisées va de quelques kHz jusqu'à plus de 10 MHz ce qui correspondrait dans un acier à des longueurs d'onde longitudinale de 0,6 mm à plusieurs millimètres. Les ondes ultrasoniques se propageront alors (dans cette gamme de longueurs d'ondes) essentiellement en ligne droite, avec un faisceau constitué d'un lobe principal où se concentre la plupart de l'énergie (figure II.4). Près de la source ultrasonore, le faisceau est assez complexe donnant lieu à des maxima et des minima d'énergie sur l'axe de propagation. Cette zone de perturbation est connue comme étant la zone de Fresnel. Sa dimension est donnée par [JAC12] :

$$L = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (\text{II.2})$$

avec D étant le diamètre du capteur.

Au-delà de cette zone, l'énergie devient monotone et le faisceau diverge avec un angle:

$$\theta \cong 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (\text{II.3})$$

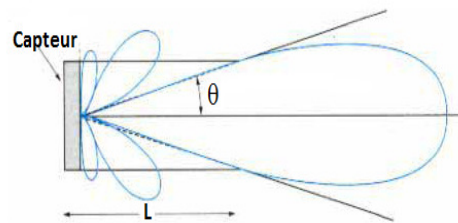
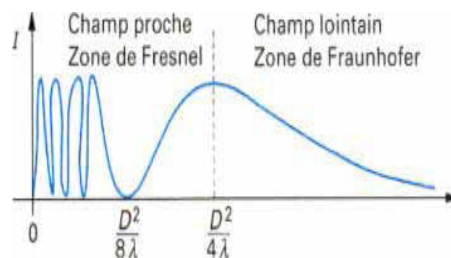
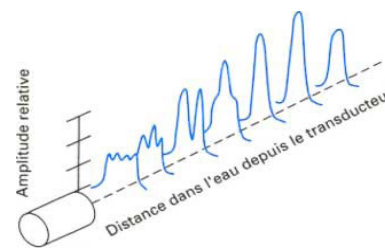


Figure II.4 : Divergence du faisceau d'ultrasons (D'après [JAC12]).

Il s'agit donc du champ lointain de l'onde ultrasonique (ou zone de Fraunhofer) qui se situe à quelques centimètres du transducteur, où le faisceau a un étalement de quelques dizaines de degrés.



(a)



(b)

Figure II.5 : Intensité acoustique sur l'axe du faisceau (a). Distribution de l'amplitude perpendiculairement à l'axe du faisceau ultrasonore, en différents points de l'axe (b) (D'après [JAC12]).

II.3.2.2. Description du capteur piézoélectrique de type P143-01

Pour les études des géomatériaux au laboratoire plusieurs types de capteurs ont été rapportés dans la littérature : le tableau II.1 résume certain de ces capteurs qui ont été par ailleurs étudiés avant de faire le choix des capteurs de notre système.

Table II.1 : Quelques types des capteurs utilisés dans laboratoire.

Références	Type des capteurs	Dimension (mm)	Fréquence résonant (kHz)	Méthode de mesure
[JAV10]	Piézoélectrique	5x7,5	100 - 230	Au contact (onde P, S _{sh} , S _{sv})
[JER05]	Piézoélectriques	10x10	1000	Au contact (onde P, S)
[SCO04]	Piézoélectrique		600	Au contact (onde P, S _{sh} , S _{sv})
[SAR06]	Piézoélectrique		1000	Au contact (onde P, S _{sh} , S _{sv})
[MAR06]	Piézoélectrique	12,7x19,05	2250	En immersion (onde P)
[FET10]	Panametrics V191	28,5x28,5	500	Au contact (onde P, S)
[KER11]	Senscomp 600	38x38	50	Sans contact (onde P)

Les différences entre ces capteurs résident dans la plus part du temps dans la fréquence de résonance et de leurs dimensions en négligeant bien entendu les différences de fabrication, propre à chaque fournisseur.

En se concentrant sur les capteurs à basse fréquence (le terme basse fréquence est utilisé ici pour désigner les fréquences inférieures à 200kHz) notre attention a été concentrée sur les capteurs piézoélectriques P143-01, produits de la société Physics Instruments. Ce capteur a une forme parallélépipédique de 10 mm de largeur et 7,5 mm de hauteur, avec une fréquence résonante de 150 KHz. La particularité de ce capteur est sa composition en trois couches (figure II.6) : la première couche du capteur (notée Z) est sensible aux (ou peut produire des) ondes de compression (onde P). La deuxième et la troisième couche (notées respectivement X et Y) sont sensibles aux (ou peuvent produire des) ondes de cisaillement (onde SV et SH) polarisées dans le plan des couches du capteur, dans deux directions orthogonales entre elles. La direction de propagation de toutes les ondes produites par le capteur est perpendiculaire au plan (commun) des couches.

Ces capteurs en plus de leurs dimensions plus petites que la plupart des autres capteurs résonants dans la même gamme de fréquences (100kHz à 150kHz), ont un autre avantage car ils permettent, de par leur architecture, de réaliser au même point trois mesures pour lesquelles on devrait utiliser 3 capteurs traditionnels placés au même point du solide.

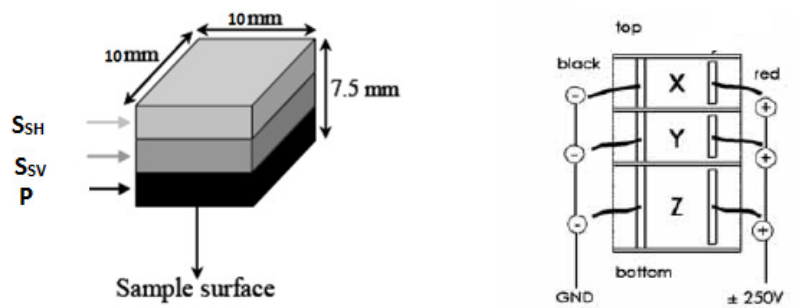


Figure II.6 : Le schéma principe d'un capteur piézoélectrique P143-01.

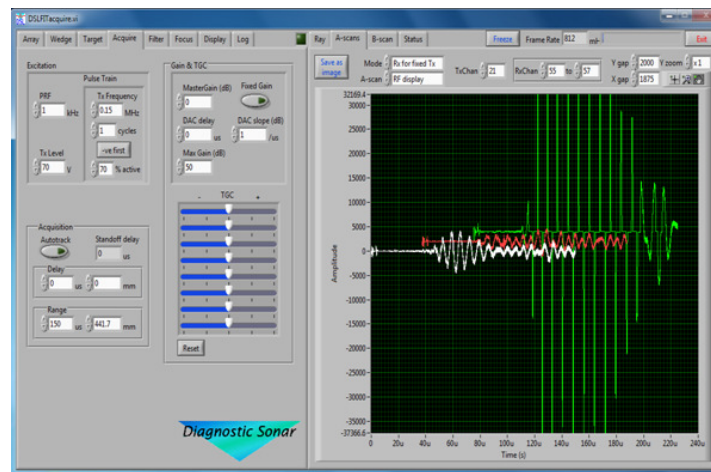


Figure II.7 : Exemple d'acquisition des trois signaux émis par une céramique P143-01 sur un échantillon PVC.

II.3.2.3. Exigences sur les éléments de contrôle et de commande du système

Afin de pouvoir suivre l'évolution de l'endommagement en cours de chargement il faudra pouvoir réduire en maximum le temps de chaque mesure de façon à ce que la mesure ultrasonore puisse être mise en correspondance à un niveau donnée de contrainte. En plus si ces mesures ultrasonores doivent être utilisées pour réaliser une tomographie (par vitesse ou par atténuation) il sera nécessaire de réaliser de façon automatique des mesures circulaires sur un nombre important de capteurs et tout cela dans un temps très court de façon à ce qu'on puisse envisager que tous les signaux récupérés au cours d'un cycle de mesure, puisse être considérés comme étant pris au même instant coïncidant avec un seul état de contrainte/déformation/endommagement du matériau. Les vitesses typiques d'application de la sollicitation mécanique au cours des essais de compression simple au laboratoire sont d'ordre de $\sim 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, alors que l'erreur de mesure acceptée dans nos équipements est d'ordre

de 10^{-4} . Cela signifie que le temps d'un cycle de mesures circulaires ne doit pas dépasser une dizaine de secondes de façon à ce que, du point de vue de la métrologie utilisée, ces mesures soient considérées comme instantanées. On précise que dans le cadre de cette thèse on utilisera le terme « cycle de mesures ultrasonores » pour désigner le processus où chaque capteur du système devient tour à tour émetteur (alors que les autres sont à son écoute le temps de son émission) et récepteur (pendant le temps que tous les autres à leurs tours vont devenir, des émetteurs).

La durée du signal à enregistrer est un facteur important qui doit être pris en compte dans les choix des modules de traitement interne de la carte d'acquisition (voir plus loin). En fait la vitesse de communication du module d'acquisition avec le disque dur est plusieurs fois plus faible que la vitesse de communication avec générateur. Cela pose alors le problème d'un stockage provisoire des signaux enregistrés au cours d'un cycle de mesures avant que celles-ci soient envoyées vers le disque dur. On demande alors que le système d'acquisition soit équipé d'une mémoire interne pour un stockage provisoire de l'information. La mémoire dédiée à une voie d'acquisition est égale à la mémoire interne totale divisée par le nombre des voies d'acquisition.

La mémoire dédiée à une voie d'acquisition est un paramètre très important car elle déterminera pour une discrétisation temporelle donnée du signal, la durée maximale et donc la distance maximale entre deux capteurs. Inversement si on limite la distance maximale entre les capteurs alors la résolution de discrétisation spatiale du signal est directement proportionnelle avec la taille de mémoire dédiée. Rappelons que la résolution de la discrétisation du signal conditionne directement la précision de mesure du temps d'arrivée d'un signal et donc la précision de mesure des vitesses.

La multiplication du nombre des capteurs demanderait soit la multiplication du nombre des générateurs des signaux, soit tout en gardant une seule source de signaux électriques, l'utilisation d'un multiplexeur qui prendrait en charge la distribution des signaux de façon à ce que, selon une stratégie définie par l'utilisateur, un signal, dans un moment donné soit envoyé à un capteur donné. C'est cette deuxième option, faisant intervenir un multiplexeur, qui a été choisie dans notre travail.

II.4. Description du système de mesures ultrasonores

En ayant en ligne de mire un système capable de fournir des données ultrasonores suffisantes, nous avons proposé un système dont la mise en place a été réalisée en grosse partie par un fournisseur (Diagnostic Sonar). Le système comprend un générateur de signaux, un groupe de

multiplexeurs, des préamplificateurs pour chaque voie et une carte d'acquisition, tous pilotés par une interface conçue et travaillant sous logiciel Labview.

Les composants du système de mesures ultrasonores mise en place sont présentés dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Les composants du système de mesures ultrasonores.

Description
Generic Array Interface Module
Channel Ultrasound Digitizer Adapter Module
Transmit FlexRIO Board
Channel Receiver/Preamplifier Adapter Module
Channel Multiplexer Module
Programmable High Voltage Power Supply with 4 Pulser
Mechanical Housing
VHDCI Interconnect Cable
High Voltage Interconnect Cable
Interface Cable
Sensors P143-01
Software Labview

Il s'agit donc d'une part des composants utilisés pour émission, réception et amplification du signal électrique digitalisé comprenant un générateur, la carte d'acquisition, les préamplificateurs et les multiplexeurs et d'autre part des composantes de transformation électrique/ultrasonique représentés par les capteurs. Le système mise en place comprend 96 voies d'acquisition qui peuvent le cas échéant devenir 128 en ajoutant plus de capteurs. Le schéma de principe de fonctionnement des composants d'émission/amplification/acquisition est présenté sur la figure II.8.

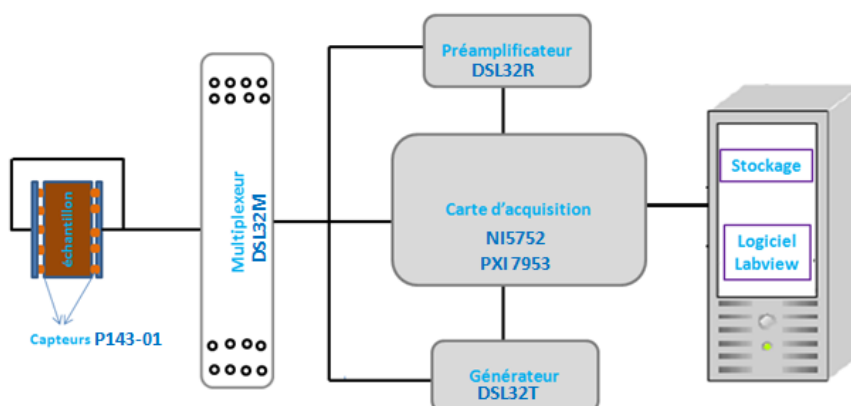


Figure II.8 : Schéma du principe de fonctionnement du système ultrasonique.

Le signal électrique créé par le générateur, après digitalisation passe au multiplexeur permettant d'acheminer cette pulsion vers un des émetteurs. Pendant ce temps, les autres capteurs travailleront comme récepteurs. Les signaux capturés par les récepteurs vont d'abord être amplifiés avant d'être envoyés vers la carte d'acquisition et stockés ici provisoirement dans une zone tampon, et finalement envoyés vers l'unité de stockage (disque dur). L'analyse et le traitement des signaux se feront dans un deuxième temps à partir des signaux enregistrés dans le disque dur.

Une description succincte des caractéristiques techniques des éléments clés du système est proposée ci-dessous.

- Générateur des signaux électriques

Il s'agit du composant qui servira pour produire le signal électrique qui sera envoyé vers les transducteurs piézoélectriques. Le générateur utilisé dans notre système permet d'envoyer vers les émetteurs des impulsions électriques modulables avec une amplitude maximale de 150V. La fréquence de cette pulsion peut changer de 0 à 20 MHz (figure II.9).



Figure II.9 : Module générateur des signaux (D'après [DIA]).

- Cartes d'acquisition

Il s'agit sans doute du cerveau du système. Dans notre système ces cartes comprennent deux modules : l'une c'est un adaptateur/ numériseurs et l'autre une carte d'acquisition proprement dite dans laquelle est ajoutée une mémoire intégrée de 128Mo. Le module d'adaptation et de numérisation à 32 voies peut échantillonner sur toutes les voies à 50 Mega échantillons par secondes avec une résolution de 12 bits. Ses entrées différentielles de 100 Ω , ont des fonctionnalités intégrées de conversion analogique-numérique (CA/N) comme des filtres anti-repliement sélectionnables et un contrôle de gain variable dans le temps et programmable. Ce module est optimisé pour des applications de contrôle par ultrasons et de contrôle non destructif plus largement. Ce module peut être couplé parfaitement avec une carte

d'acquisition de type FPGA (Field-Programmable Gate Array). Cette dernière est programmable (via Labview) et l'utilisateur peut y implémenter ses propres algorithmes de traitement incorporé et de contrôle à haute-vitesse, notamment des transformées de Fourier rapide (FFT), du filtrage, de la détection de pic et du fenêtrage. La carte FPGA permet entre autre de synchroniser plusieurs modules générateur pour des systèmes à un grand nombre de voies et utilise ses 16 sorties numériques pour interagir avec les amplificateurs de puissance externes afin de créer un tableau de voies d'émetteur à haute-tension avec un contrôle de phase par voie. Pour certaines applications CND, l'utilisateur a la possibilité d'ajouter un conditionnement supplémentaire du signal et des circuits de protection d'entrées [NI].



Figure II.10 : Module adaptateur de numérisation 32 voies pour applications (D'après [DIA]).

La carte d'acquisition offre un système d'entrée-sortie (E/S) souple et personnalisable.



Figure II.11 : Carte d'acquisition du système comprenant le module FPGA et le module E/S programmable FlexRIO (D'après [DIA]).

La nouvelle architecture FPGA Virtex-5 du fournisseur National Instrument est optimisée pour une exécution plus rapide et plus efficace, en utilisant des boucles cadencée à un seul cycle dans LabVIEW FPGA. Ceci signifie qu'il est possible d'optimiser davantage le code

LabVIEW FPGA pour l'adapter aux FPGA Virtex-5 et d'exécuter plus d'opérations par cycle d'horloge.

Chaque broche de la carte FPGA est accessible par le module E/S et peut attendre de vitesses LVDS (signalisation différentielle basse tension) jusqu'à 1 Gbits/s et de vitesses asymétriques jusqu'à 400 Mbits/s.

- Module de pré-amplifications

Il s'agit d'un module récepteur de 32 canaux qui assure la protection de transmission-réception, suivie par une faible pré-amplification des signaux avec des sorties adaptées à couplage direct dans le convertisseur analogique-numérique .



Figure II.12 : Module préamplificateur 32 canaux (D'après [DIA]).

- Multiplexeur

Les multiplexeurs utilisés dans notre système sont des modules à empiler de 32 canaux bidirectionnels chacun, qui servent d'interface entre les voies d'émission et les voies de réception. Actuellement le système comprend 3 multiplexeurs et a la possibilité d'accueillir un quatrième (augmentant le nombre de voies d'acquisition en 128) par un simple ajout de carte.

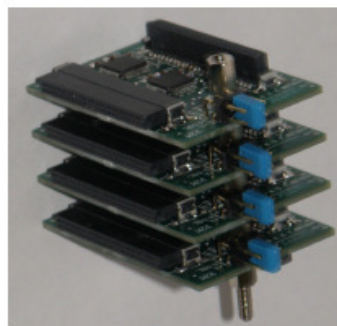


Figure II.13 : Module de multiplexeur 32 canaux (D'après [DIA]).

II.5. Eléments externes au système

II.5.1. Les couplants

Entre le système de mesures ultrasonores par transmission et le matériau à caractériser on place souvent un couplant dont l'objectif est de rassurer que aucune poche d'air n'existe dans le contact entre le capteur et la surface de l'échantillon. Les couplants couramment utilisés pour les ultrasons sont constitués d'huiles visqueuses ou d'adhésifs époxy. Ce type de couplants est très efficace sur des surfaces planes, mais sur des surfaces courbées les résultats sont médiocres ([WES04], [FET10], [ESL10]). Dans de telles conditions on utilise la cire qui semble plus appropriée pour suivre les surfaces incurvées des roches et remplir tout l'espace entre les capteurs et le matériau à tester (figure II.14)[WES04].

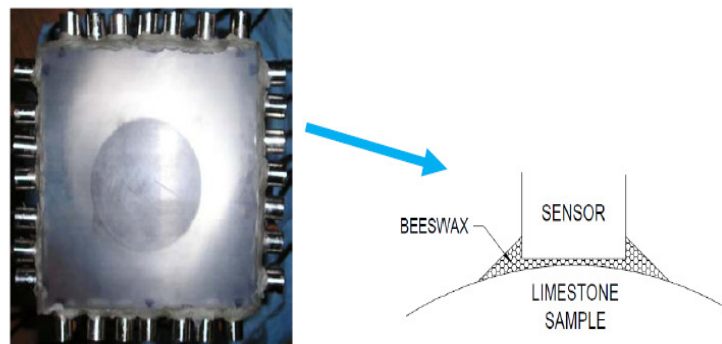


Figure II.14 : Utilisation de la cire d'abeille comme couplant ultrasonore (D'après [WES04]).

Cependant, l'inconvénient de l'utilisation de la cire d'abeille est la nécessité de faire fondre la cire, et refroidir ensuite l'échantillon. Cela aura une incidence sur la qualité du travail de capteur. D'autres solutions proposent d'utiliser de la silicone ou de l'époxy comme couplant, mais après les avoir testé nous avons trouvé très difficile à nettoyer la surface de capteur après une première utilisation ce qui causerait des problèmes pour les utilisations répétitives.

Après plusieurs essais, nous avons donc décidé d'utiliser comme couplant un caramel industriel facilement trouvable et pas cher. Ce couplant est tout à fait satisfaisant au niveau de remplissage des vides et ne laisse pas de poches d'air entre le capteur et la surface d'échantillon. Cependant, nous avons eu besoin d'ajouter un système de fixation de capteurs par des bandes de caoutchouc permettant ainsi le maintien fixe des capteurs au cours des mesures et leur réutilisation rapide par la suite.

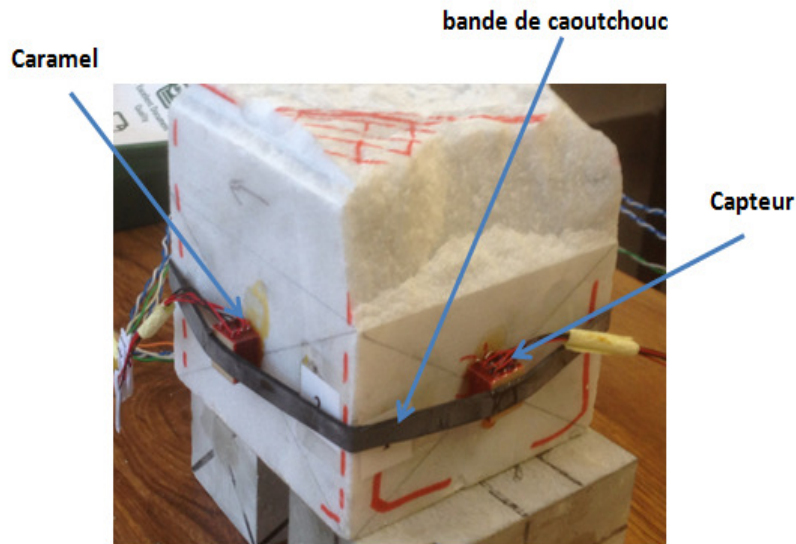


Figure II.15 : Couplage entre les capteurs et la surface d'échantillon en utilisant comme couplant du caramel et un système de fixation par bandeaux élastiques.

II.5.2. Protection des capteurs et conception des barrettes de capteurs

L'utilisation direct des capteurs PI 143-01 est peu pratique : non seulement le nombre important des capteurs rend rapidement le système très encombrants et la manipulation de chaque capteur très délicate, mais nous avons constaté qu'au cours de cette manipulation les fils du capteur étaient très petits et fragiles et se cassaient très facilement. Une fois cassés, leur soudage nécessite beaucoup de temps en plus d'un savoir-faire high-tech pas toujours disponible. Il était donc devenu nécessaire de prévoir une protection des capteurs et au premier lieu la protection des fils de contact avec le capteur. Pour cela nous proposons d'utiliser une plaque élastique, de taille proche du capteur (1x3cm). Une des surfaces du capteur est collée définitivement sur cette plaque et l'autre surface sera ensuite mise en contact avec l'échantillon à caractériser. Les fils du capteur sont soudés avec la plaque dans les broches sortant de la plaque. Pour chaque fiche nous créons 4 points de soudure dont 3 points pour les voies X,Y,Z du capteur et 1 point pour sa masse (GND) (figure II.16) . Enfin des câbles équipés des prises femelles assurent la connexion entre le système et les capteurs. Dans cette configuration l'utilisateur branche directement une fiche sur un câble numéroté indiquant précisément la voie d'acquisition dédiée.

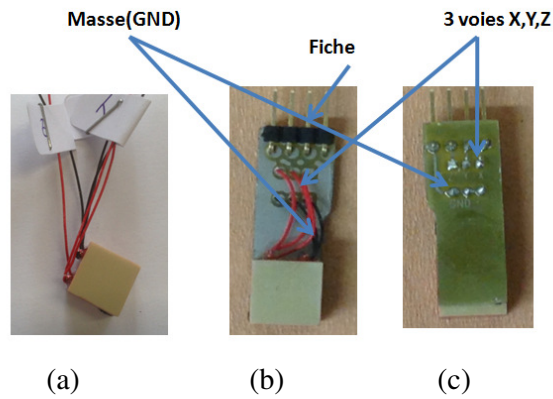


Figure II.16 : Schéma de la plaque de protection de capteur (a) capteur origine ; (b) fiche capteur : vue de devant; (c) fiche capteur vue derrière.

Pour la tomographie par ultrasons, souvent on a besoin de plusieurs capteurs à l'instar des Arrayed Phases évoqués précédemment. Tout en gardant la possibilité d'ajuster un capteur seul selon la géométrie locale de la surface nous avons créé un dispositif permettant de grouper plusieurs capteurs dans une barrette (figure II.17) dont la longueur et les autres dimensions sont ajustées en fonction des échantillons à étudier. Par exemple pour les capteurs positionnés dans la direction verticale d'un échantillon en cours d'un essai de compression simple (et dont la hauteur est de 78mm) nous avons fabriqué des barrettes de 5 capteurs avec une distance entre deux capteurs voisins de 0.4 cm. Dans le cas évoqué nous avons utilisé des barrettes en aluminium qui sont alors facilement fixées sur l'échantillon (figure II.17).

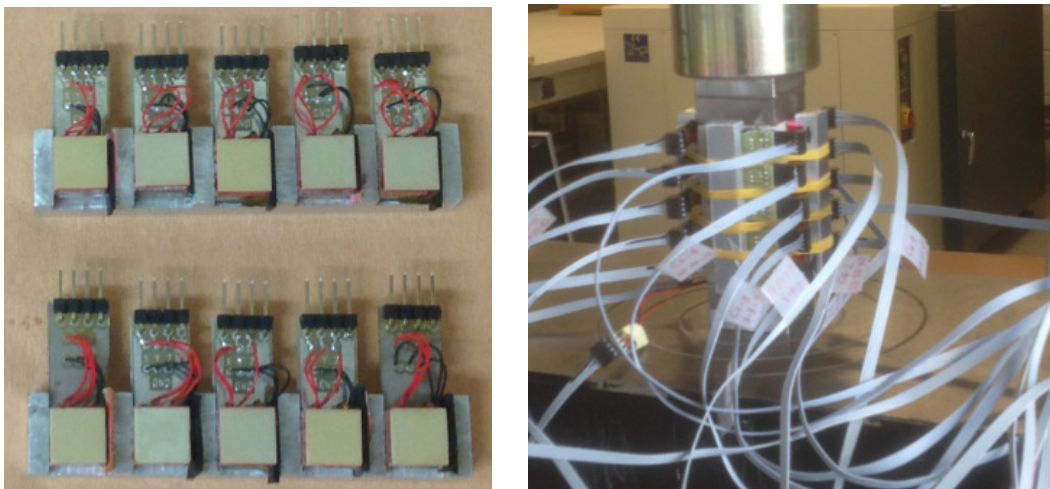


Figure II.17 : Schéma de fixation des capteurs dans des barrettes pour la tomographie à ultrasons.

II.6. Conclusion

Un dispositif expérimental spécifique a été proposé, conçu et mise en place combinant, une presse mécanique (ou tout autre dispositif permettant de réaliser des essais de compression uniaxiale ou bien triaxiale) et un système de production, transmission et acquisition d'ondes ultrasonores. Le système permet d'effectuer des mesures sur des ondes de compression (P) et de cisaillement (S) polarisées dans deux directions perpendiculaires. Une attention particulière a été dédiée au système de contrôle et de commande du système afin d'automatiser des mesures cycliques au cours des essais. A l'heure actuelle le système permette de travailler avec trois types des ondes et sur un nombre important de capteurs (maximum 96 capteurs) avec un potentiel d'augmentation de ce nombre dans le futur. Le traitement des signaux est dissocié du système proprement dit afin d'avoir la liberté de faire des traitements spécifiques et alternatifs. Notons néanmoins qu'il est tout à fait possible (et le système actuel le permet) d'ajouter un traitement automatique au niveau de la carte d'acquisition pour réaliser une imagerie en temps réel.

Chapitre III. Application du système DSLFIT pour caractériser l'endommagement des géomatériaux à base cimentaire sous la compression uniaxiale

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, le système développé est décrit dans le chapitre II a été utilisé pour caractériser l'endommagement des géomatériaux à matrice cimentaire sous compression uniaxiale. Il s'agit d'une première application où les matériaux caractérisés sont généralement simples et avec peu ou pas du tout de fissuration initiale. On commence le chapitre par une description de la procédure d'élaboration des éprouvettes du matériau objet de cette étude suivi par la mise en place des dispositifs expérimentaux et de résultats obtenus. Les analyses et les discussions de ces résultats notamment vis-à-vis des renseignements concernant les mécanismes d'endommagement en jeux occuperont une grande partie du chapitre. On termine finalement le chapitre avec quelques conclusions et la précision des perspectives ouvertes par cette première application.

III.2. Élaboration du matériau

Dans le domaine du Génie Civil, les matériaux à base cimentaire sont sans doute les matériaux les plus utilisés. Cette utilisation massive est due à leurs propriétés physiques et mécaniques à la hauteur des exigences des utilisateurs, mais surtout à leur modulabilité. Ce type de matériau est obtenu à partir d'un mélange de granulats (sable, gravillons) et de ciment qui, après l'ajout d'eau, se transforme en une suspension dense et pâteuse. Suite à un ensemble de réactions d'hydratation, un composite solide est formé. Le durcissement du matériau se développe rapidement dans les premiers jours après le coulage et reste quasi stable après environs 28 jours. Ainsi, après quelques semaines de durcissement, ce matériau est capable de remplir ses fonctions au sein de l'ouvrage auquel il est destiné [FET10].

Dans le cadre de cette thèse, les mortiers sont choisis comme les matériaux à étudier, pour leur simplicité de la mise en place et de constitution ce qui permet la répétitivité des échantillons avec peu d'écart d'un échantillon à l'autre, pour peu que la procédure de leur formulation soit suivie rigoureusement.

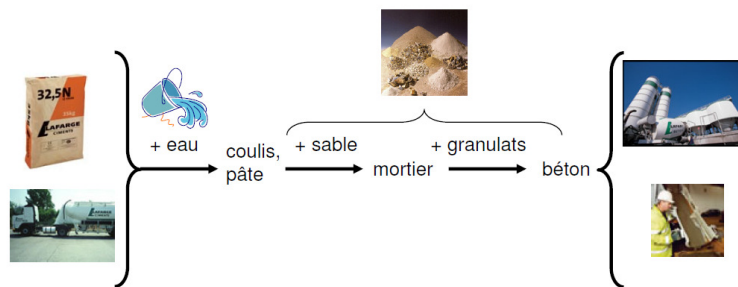


Figure III.1 : Description du processus d'élaboration des géomatériaux à base cimentaire (pâte de ciment, mortier et béton (D'après [MCC01])).

III.2.1. Généralité sur les constituants des mortiers

La qualité et les propriétés mécaniques des mortiers en générale sont contrôlées en grande partie par la formule utilisée pour leur préparation. Traditionnellement ces formules sont décrites par les rapports des principaux constituants, à savoir les rapports eau/ciment (E/C) et sable/ciment (S/C).

III.2.1.1. Le ciment

Suivant la norme NF EN 197-1, le ciment est obtenu à partir d'un ou plusieurs des constituants définis ci-dessous [NF197-1]:

- Clinker Portland (K) : Le clinker Portland est obtenu par cuisson, au moins jusqu'à fusion partielle, d'un mélange fixé avec précision de matières premières (farine crue, pâte ou suspension) contenant du CaO , SiO_2 , Al_2O_3 apportés par les calcaires et argiles de roches soigneusement sélectionnées. Ce constituant entre dans la composition de tous les ciments.

- Laitier granulé de haut fourneau (S) : Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue de composition convenable provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Le laitier granulé de haut fourneau doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi en cimenterie.

- Pouzzolanes naturelles (Z) ou naturelles calcinées (Q) : Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique) soit après activation thermique, des propriétés pouzzolaniques.

- Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W) : Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de

chaudières alimentées au charbon pulvérisé.

- Schistes calcinés (T) : Sous réserve de caractéristiques convenables définies dans la norme les schistes calcinés peuvent être utilisés.

- Calcaires, (L, LL) : Ce sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium -CaCO₃- supérieure à 75 %.

- Fumées de silice (D) : Les fumées de silice sont des particules très fines (environ 1 µm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium.

- Sulfate de calcium : Le sulfate de calcium généralement du gypse doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise.

- Constituants secondaires : Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants décrits dans les paragraphes ci-dessus, sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux du ciment. Ils ne peuvent excéder 5 % en masse.

- Additifs : Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans ceux énumérés ci-dessus et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment. La quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1 % en masse de ciment (exception faite des pigments). La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure ou égale à 0,5 % en masse de ciment.

Dans notre étude, le ciment Portland au calcaire CEM II/B-LL 32,5R a été choisi pour élaborer les échantillons. Les composants de ce type de ciment sont résumés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Le pourcentage des composants du ciment CEM II/B-LL 32,5R.

Composition en masse										
Constituants principaux										
Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumées de silice	Pouzzelanes		Cendres volantes		Schistes calcinés	Calcaires		Constituants secondaires
			Naturelle	Naturelle calcinée	siliceuses	calciques		L	LL	
K	S	D	P	Q	V	W	T			
65-79	-	-	-	-	-	-	-		21-35	0-5

III.2.1.2. Le sable

La norme CEN196-1-ISO679 conditionne le sable utilisé qui est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité. Le sable est aussi conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun $1\,350 \pm 5$ g. La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences de la norme CEN 196-1 et de la norme ISO 679 :2009.

Tableau III.2 : La composition granulométrique du sable CEN196-1-ISO679.

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

III.2.1.3. L'eau

Les dosages de l'eau et du ciment sont deux facteurs très importants qui contrôlent in fine l'ouvrabilité et la résistance de la pâte de ciment et donc du mortier. Plus le rapport eau/ciment est grand, plus l'ouvrabilité sera grande. En effet, plus il y a d'eau, plus la pâte de ciment aura tendance à remplir aisément les formes. Cependant lorsque le rapport eau sur ciment est trop élevé, on observe le phénomène de ressuage qui se manifeste par l'apparition d'une flaque au-dessus de mortier ou béton frais. D'ailleurs, au niveau des granulats, on constate la présence d'eau à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment. La résistance en est réduite, car l'eau s'évapore et il y a des vides entre le granulat et la pâte. De manière générale, l'eau se présente dans l'espace poreux du mortier sous forme liquide ou sous forme de vapeur. On peut distinguer : l'eau libre, l'eau capillaire, l'eau adsorbée sur la surface solide et l'eau chimiquement liée dans les hydrates.

- L'eau libre : c'est l'eau qui, restée en excès après la réaction d'hydratation, échappe aux forces superficielles des particules solides. Elle se trouve généralement dans les gros capillaires. Son départ n'entraîne pas de changements de volume importants (retrait).

- L'eau capillaire (eau non libre) : c'est la phase d'eau présente dans les petits capillaires. Elle y est contenue par des tensions capillaires.

- L'eau adsorbée (eau zéolitique): elle est liée à la surface solide soit par des forces de

Van der Waals, soit par des liaisons hydrogènes. Ces forces décroissent lorsque l'on s'éloigne de la surface des pores.

- L'eau chimiquement liée faisant partie intégrante des groupements C-S-H.

III.2.2. Confection des éprouvettes

Différentes séries d'éprouvettes de mortier normalisé de taille 4x4x16cm ont été confectionnés dans le cadre de ce travail. La différence dans la formulation des éprouvettes se situe aux différents rapports E/C et S/C (tableau III.3). La procédure suivie pour confectionner ces éprouvettes est celle préconisée par la norme NF EN 196-1. Après démoulage, toutes les éprouvettes ont été conservées sous l'eau pendant une durée de 28 jours. La conservation se passe dans une salle particulière où la température est maintenue constante à $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Après 28 jours ces éprouvettes sont coupées en deux pour obtenir des échantillons d'éclatement de 2. Les échantillons de forme parallélépipédique (base carrée 4 cm x 4 cm et hauteur de 8 cm) sont ensuite équipés convenablement avant de subir une compression uniaxiale avec suivi continu des signaux ultrasoniques. Avant tout essai, afin de permettre l'enregistrement des signaux ultrasonores de qualité suffisante pour chaque échantillon les opérations suivantes ont été réalisées :

- Toutes les surfaces des échantillons ont subi un ponçage, les surfaces lisses permettent d'assurer un bon contact entre les capteurs et les échantillons.
- Les dimensions et la masse après ponçage ont été prises pour déterminer d'une part la masse volumique des échantillons (tableau III.3) et d'autre part les dimensions précises des échantillons, indispensables dans la phase de détermination des vitesses des ondes.

Tableau III.3 : Récapitulatif des formulations des éprouvettes de mortier.

Epreuve	Mortier		
	Rapport E/C	Rapport S/C	ρ (kg/m ³)
EC0.4SC1	0.40	1/1	2127
EC0.4SC1.5	0.40	1.5/1	2216
EC0.4SC2	0.40	2/1	2276
EC0.5SC1	0.50	1/1	2092
EC0.5SC1.5	0.50	1.5/1	2138
EC0.5SC2	0.50	2/1	2165



(a)



(b)

Figure III.2 : Conservation des éprouvettes de mortier sous l'eau à la température ambiante à 20°C (a) ; Échantillons utilisés pour les essais de compression (b).

III.3. Dispositif expérimental d'essais de compression uniaxiale avec mesures continues des signaux ultrasonores

Le dispositif expérimental mis en place comprend deux parties distinctes : l'une correspond au système de sollicitation mécanique alors que l'autre représente le système de sollicitation et d'acquisition des signaux ultrasonores. Le schéma de principe du dispositif de mesures ultrasoniques sous compression uniaxiale est présenté sur la figure III.3. Il faut préciser ici que la compression des échantillons est réalisée à une vitesse de déformation constante de $4 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$.

La génération et l'acquisition des ondes ultrasonores, une fois transmises dans l'échantillon qui subit la compression uniaxiale, est réalisée via les capteurs piézoélectriques collés sur la surface de l'échantillon.

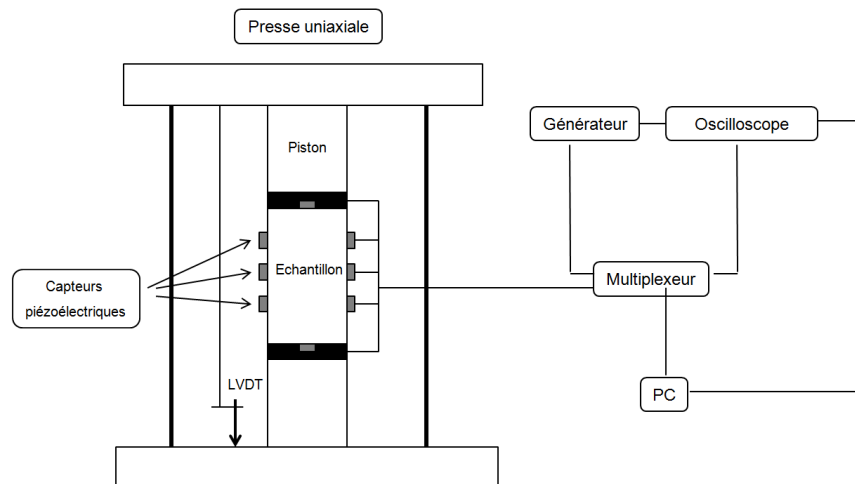


Figure III.3 : Diagramme du dispositif de mesure ultrasonique au cours d'essai de compression uniaxiale.

III.3.1. Disposition des capteurs piézoélectriques

La disposition des capteurs piézoélectriques est présentée sur la figure III.4. Il s'agit de 7 paires de céramiques piézoélectriques à trois couches, capables d'émettre ou de recevoir une onde P et deux ondes S de deux polarisations orthogonales. En plus des capteurs placés en face à face dans les faces opposées des échantillons, une paire de capteurs a été collée sur les bases opposées de l'échantillon permettant d'acquérir les ondes élastiques propagées suivant la direction verticale (direction parallèle au chargement). Pour cela, deux calles en acier ont été trouées pour créer deux niches où sont placés ces capteurs, tout en permettant la transmission du chargement via le piston de la presse. Chaque surface latérale d'échantillon dispose d'une barrette de 3 capteurs qui visent à acquérir les ondes ultrasoniques suivant les directions horizontales ou inclinées de 45° . Le dispositif permet d'émettre et ensuite d'acquérir les ondes ultrasonores au cours de chargement avec une fréquence réglée par l'opérateur. Le traitement, a posteriori de ces signaux permet de déterminer les vitesses des ondes longitudinales $V_{P,0}$, $V_{P,90}$, $V_{P,45}$ et transversales $V_{S,0}$, $V_{S,90}$ (qui peuvent être également notées V_{SH} , V_{SV}) et éventuellement leurs coefficients d'atténuation. Donc au total pour ce type de test nous avons utilisé 14 capteurs piézoélectriques à trois couches qui exigent 42 voies du système d'ultrasons.

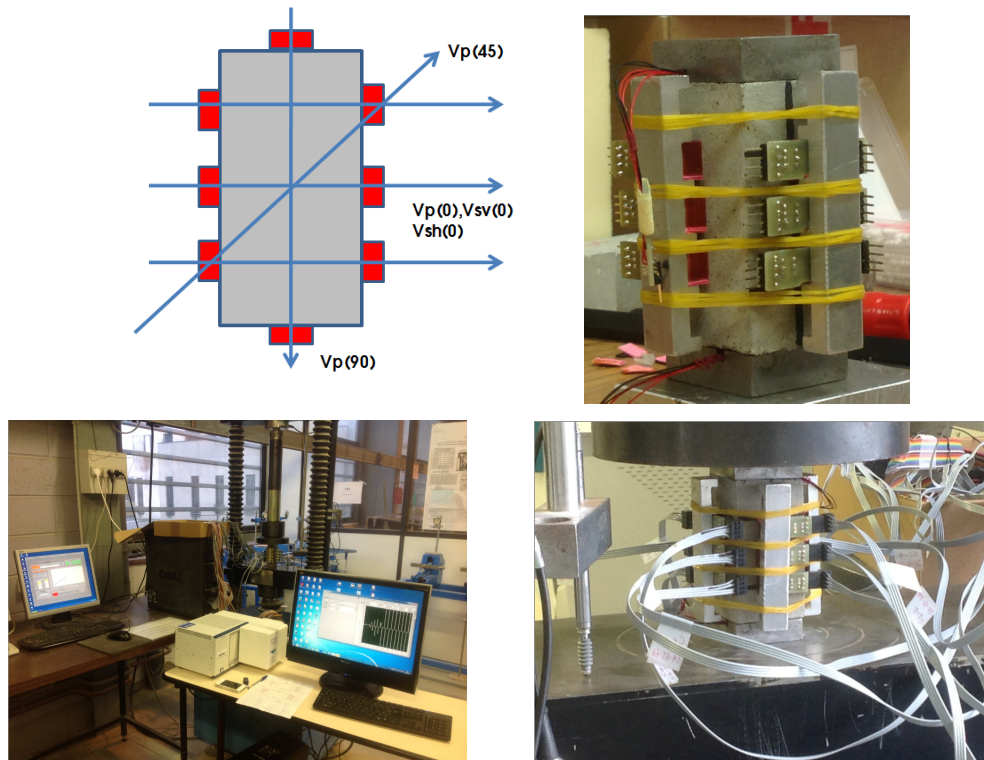


Figure III.4 : Disposition des capteurs piézoélectriques sur les surfaces de l'échantillon et la mise en place du système d'essai uniaxiale.

III.3.2. Protocole de l'acquisition des ondes ultrasoniques

Après la disposition de tous les capteurs piézoélectriques sur la surface d'échantillon, une vérification du fonctionnement de ces capteurs est nécessaire avant de commencer le chargement mécanique. Cette étape consiste dans un premier temps à établir dans le système ultrason les paramètres nécessaires comme par exemple la fréquence et le nombre de voie des capteurs utilisés. La fréquence choisie est compatible avec la fréquence de résonance des capteurs piézoélectriques. Pour rappel, dans le cadre de ce travail les capteurs PI 143-01 utilisés ont la fréquence résonnant de 150kHz. Sur la figure III. 5 est illustrée l'interface du système avec les paramètres d'acquisition à définir.

Dans un deuxième temps on doit choisir la forme et l'amplitude de l'impulsion à utiliser. De nombreuses études dans la littérature ont montré que la forme d'impulsion peut influencer la qualité du signal reçu après la propagation au sein de l'échantillon. En pratique, le choix porte souvent sur l'impulsion de type carré. Pour ce qui concerne l'amplitude d'impulsion, ce paramètre dépend des matériaux étudiés et de la distance entre les capteurs. Dans le système actuel, l'amplitude maximale qui peut être choisie est de 150V.



Figure III.5 : Choix de la fréquence et du nombre de voies du système.

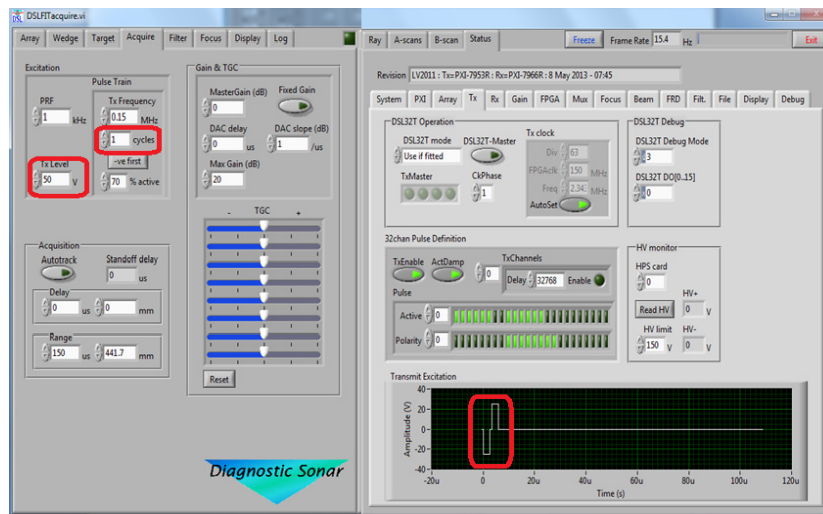


Figure III.6 : Choix de l'impulsion pour l'émetteur.

On fixe ensuite les paramètres d'acquisition notamment ceux d'amplification et de la longueur du signal (en μs) à enregistrer. L'amplification ne doit pas être choisie très forte car ceci amplifie aussi le bruit de fond et peut complètement brouiller le signal. A titre d'information la valeur maximale d'amplification dans ce système est de 50dB. Concernant la longueur du signal (paramètre « range » indiqué sur la figure III.7), ce paramètre dépend du type de matériau étudié, le nombre des voies d'acquisition et la mémoire interne de la carte FPGA du système. Avec le matériau étudié dans le cadre de cette thèse ce paramètre est fixé à 100 microsecondes pour tous les types d'onde.

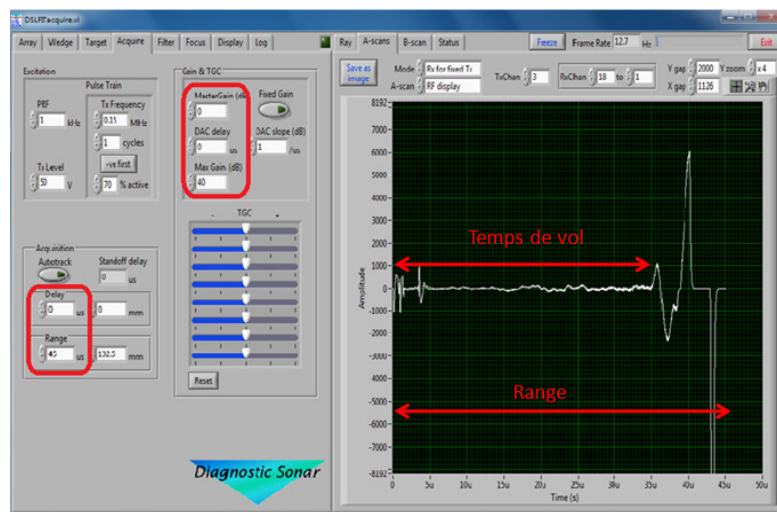


Figure III.7 : Choix des paramètres d'acquisition.

Le fonctionnement du système est automatique : grâce à l'interface de programmation et le système des multiplexeurs, à chaque instant de mesure programmé, un capteur est choisi comme émetteur et les autres capteurs seront des récepteurs. Une fois la transmission à partir d'un capteur étant finie, le système passe à l'autre capteur qui devient à son tour un émetteur et ainsi de suite jusqu'au dernier capteur. Donc un cycle de mesure se termine lorsque tous les capteurs ont effectué leur rôle d'émetteur. Le système est ensuite prêt à commencer un autre cycle de mesures qui sera déclenché automatiquement après une période de temps défini par l'opérateur. Ce temps d'attente entre deux mesures est programmable entre 1 seconde et 24 heures au maximum. Ce paramètre doit être bien choisi pour ne pas dépasser la capacité de stockage d'ordinateur (si elle était très faible) mais il ne doit non plus être trop important car les événements à observer ne sont pas capturés. Pendant la phase d'acquisition les signaux sont enregistrés automatiquement vers un système de stockage de données à grande capacité pour un traitement a posteriori. Ces signaux sont sauvegardés d'une part sous la forme des fichiers de type .CFG groupant sous un format défini tous les paramètres utilisés dans le processus d'acquisition et d'autre part en forme de fichiers PNG qui contiennent les informations de la forme des ondes réceptionnées. Un module écrit en LABVIEW permet par la suite d'exporter ces données sous la forme Excel ou Txt pour tout traitement éventuel.

Une fois le fonctionnement normal du système des ultrasons est testé, l'essai de compression uniaxiale peut commencer. Il s'agit d'un essai monotone (sans cycles de déchargement) mené jusqu'à la rupture des éprouvettes. Au cours de chargement mécanique on mesure en continu le déplacement vertical via un capteur LVDT (Low Voltage Displacement Transducer) fixé sur le plateau métallique inférieur de la presse ainsi que les ondes élastiques par le système décrit précédemment.

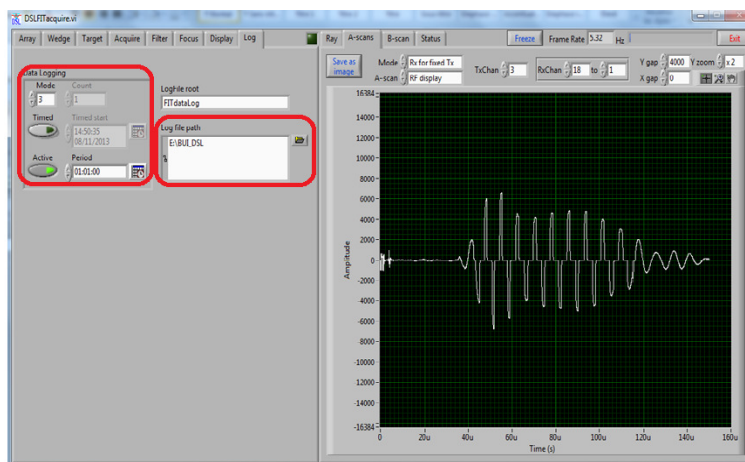


Figure III.8 : Choix des paramètres d'enregistrement automatique.

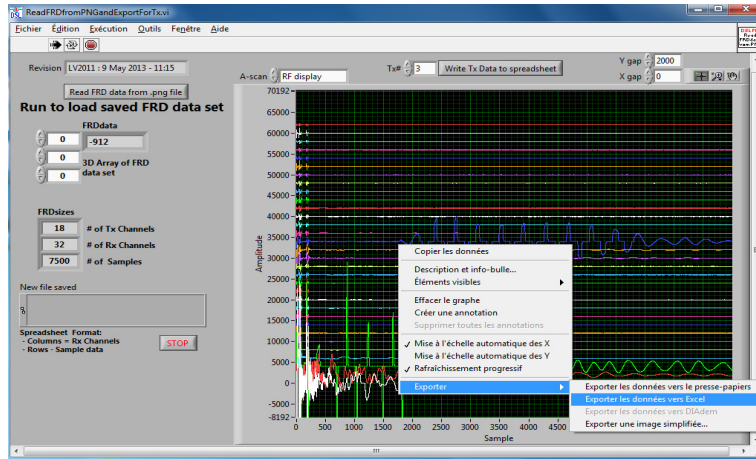


Figure III.9 : Exporter des données des signaux pour le traitement.

III.4. Résultats des essais : interprétation et discussion

Pour avoir une vision globale du comportement du matériau, sur la figure III.10 sont présentées les courbes contrainte-déformation enregistrées au cours des essais pour toutes les éprouvettes étudiées. De manière générale, les résultats obtenus semblent concordant avec ceux présentés dans la littérature ([UCH97], [QAS03], [SHO10]) (voir aussi le chapitre I) qui ont mis en évidence un comportement complexe caractérisé par plusieurs phases. La première phase présente un comportement légèrement non linéaire, suivie par une phase élastique linéaire. Lorsque les mesures sont réalisées par des jauges, le non linéarité de cette première phase est expliqué par la fermeture des fissures préexistantes ([ESL10], [FOR05]). Pour les mesures externes avec LVDT néanmoins cette première phase est due à la mise en place des échantillons et le serrage du système, et on n'observe pas de fermeture de fissures dans les échantillons de cette étude. La deuxième phase correspondant à un comportement linéaire continue jusqu'à environ 60% de contrainte de rupture, après quoi les courbes deviennent non-linéaires et une diminution des modules est observée. Particulièrement, lorsque la contrainte s'approche la contrainte du pic (à partir d'environ 90%) toutes les courbes montrent un comportement fortement non linéaire, conséquence de la coalescence et propagation instable des fissures. Ces tendances d'évolution des courbes contrainte-déformation et ces renseignements vont être vérifiés par la suite avec les mesures ultrasonores.

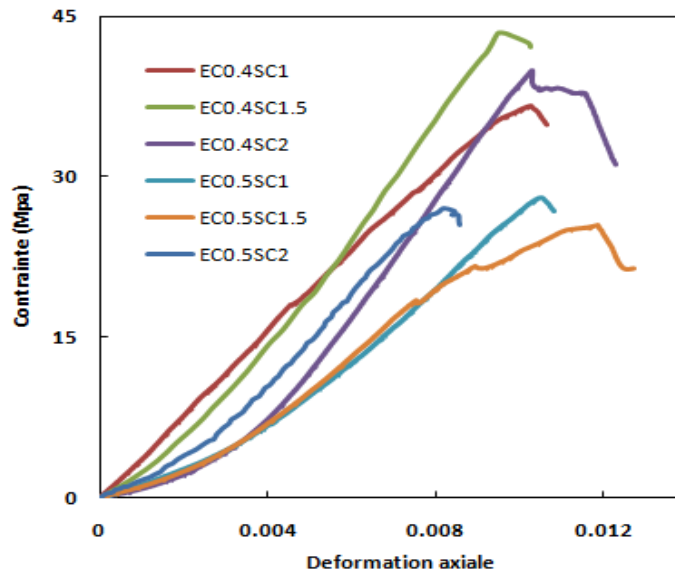


Figure III.10 : Courbes de contrainte - déformation axiale des échantillons, obtenues en cours des essais de compression uniaxiale.

III.4.1. Traitement des mesures ultrasonores

En cours d'un essai de compression uniaxiale, un très grand nombre de signaux ultrasonores sont enregistrés par le système. Ce nombre est d'autant plus grand que le nombre des capteurs et la fréquence des cycles de mesures ultrasonores soient grands. Dans le but de déterminer les vitesses ultrasonores et également d'atténuation suivant différentes directions, nous avons choisi de traiter pour chaque cycle de mesures onze signaux d'ondes longitudinales (P) et six signaux d'ondes transversales (S). Ce choix est guidé d'une part par la qualité des signaux obtenus et d'autre part par l'objectif à évaluer les valeurs moyennes des vitesses $V_{P,90}$, $V_{S,90}$ (direction verticale qui est parallèle au chargement), $V_{P,0}$, $V_{S,0}$ (direction horizontale qui est perpendiculaire au chargement) et $V_{P,45}$ (direction orientée 45° par rapport l'axe horizontale). A titre d'exemple, la vitesse $V_{P,0}$ est calculée à partir des résultats obtenus à partir de 6 paires de capteurs disposés sur les surfaces latérales(figure III.4). Le nombre total des signaux traités pour chaque essai est donc égal au nombre de cycles de mesures (nombre des niveaux de contraintes choisi pour faire les mesures) multiplié par le nombre des signaux (17 dans ce cas) choisis pour être traités. Ce grand nombre de signaux à traiter soulève la nécessité d'une procédure de traitement automatique des signaux afin d'obtenir des résultats finaux dans un délai raisonnable. Il s'agirait en fait de déterminer pour chaque signal le temps de vol (donné nécessaire pour calculer la vitesse) et le coefficient d'atténuation.

Dans le cadre de ce travail, après plusieurs tentatives avec d'autres méthodes, nous utilisons la méthode AIC (Akaike Information Criterion) (voir figure III.11c) dont le principe est décrit dans le premier chapitre. Cette méthode est appliquée pour tous les signaux mesurés à l'état initial de l'échantillon (avant le chargement) et au cours de chargement des éprouvettes. L'autre méthode de corrélation croisée est également utilisée pour piquer les temps de vol des signaux au cours de chargement en comparant avec ceux de même nature à l'état initial d'échantillon considérés comme signaux de référence.

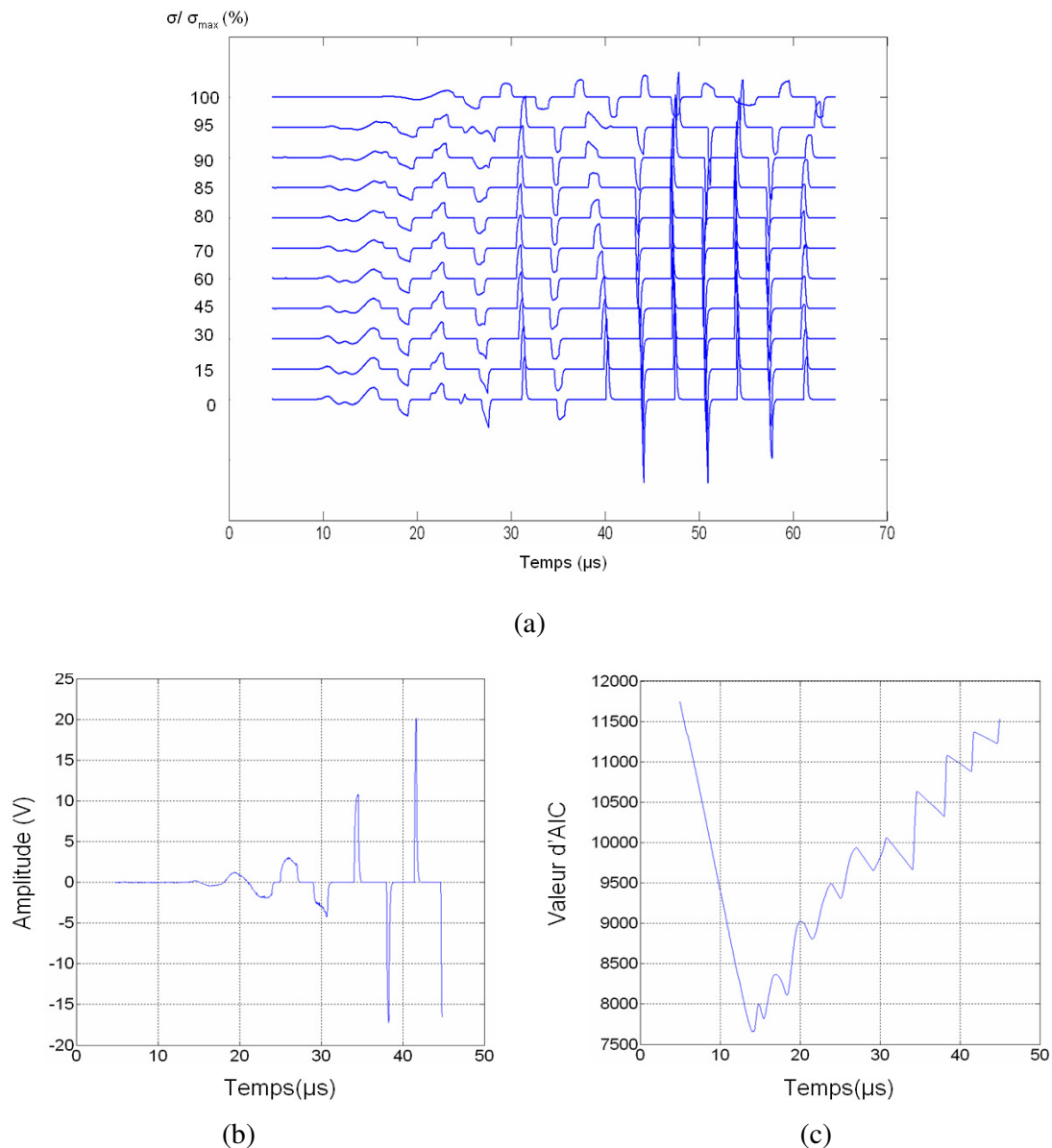


Figure III.11 : Signaux de même nature acquis à différents stades de chargement (a) ; signal à l'état initial (b) et le résultat AIC correspondant (c).

Afin de valider la méthode, une comparaison des temps de vol prédit automatiquement par la méthode AIC et les temps de vol évalués manuellement a été réalisée (tableau III.4). Les erreurs relatives très faibles pour toutes les vitesses montrent l'efficacité de la méthode AIC. Pour ce qui concerne l'atténuation des ondes, nous utilisons la méthode du rapport de spectre dont le principe est également abordé dans le cadre de l'étude bibliographique du premier chapitre. Pour cela, un échantillon d'aluminium de la même géométrie des éprouvettes étudiées peut être pris pour effectuer les mesures des signaux de référence. Les spectres des signaux sont obtenus à partir de la transformation de Fourier rapide en utilisant la fonction FFT (Fast Fourier Transformation) du logiciel MATLAB. Le coefficient d'atténuation peut alors être déterminé à partir de la pente de la courbe représentant le rapport des spectres $\ln(A'/A)/L$ en fonction de la fréquence. La fonction de régression linéaire disponible dans MATLAB a été utilisée pour déterminer la pente de la courbe du rapport de spectre comme illustré sur la figure III.12. Il est intéressant de noter ici que l'utilisation d'échantillon aluminium permet d'évaluer la valeur absolue du coefficient d'atténuation des signaux. Toutefois, dans le cas où on préfère déterminer la variation d'atténuation (la différence du coefficient d'atténuation à chaque stade de contrainte par rapport à l'état initial $\Delta\alpha(f) = \alpha_\sigma(f) - \alpha_0(f)$) on a considéré comme référence des signaux de la même nature à l'état initial (l'état avant le chargement).

Tableau III.4 : Comparaison des vitesses ultrasons déterminées par la méthode AIC et manuel pour différents types de matériau.

	Vitesses des ondes ultrasonores (m/s)								
	Mortier EC0.40SC1			Aluminium			PVC		
	V _P	V _{s,90}	V _{s,0}	V _P	V _{s,90}	V _{s,0}	V _P	V _{s,90}	V _{s,0}
AIC	3830	2420	2310	5100	2970	2847	2285	1356	1264
Manuel	3830	2407	2311	5100	2963	2859	2285	1349	1270
Ecart (%)	0	0.53	0.04	0	0.24	0.42	0	0.5	0.47

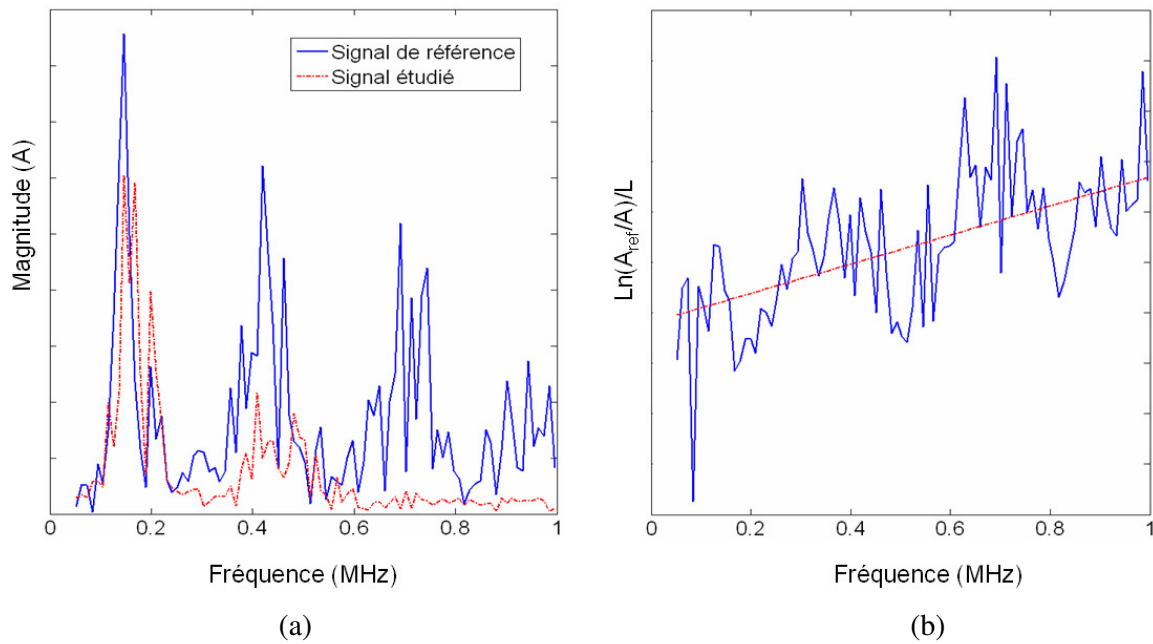


Figure III.12 : Spectre obtenu par FFT des signaux (a) ; courbe du rapport des spectres (b).

III.4.2. Variation des vitesses ultrasonique en fonction de chargement

Les résultats des vitesses des ondes ultrasonores mesurés à l'état initial sur les mortiers de différents rapports E/C et S/C sont résumés dans le tableau III.5. De manière générale, on peut constater une augmentation de ces vitesses en fonction du rapport S/C alors qu'un rapport E/C plus important conduit à des vitesses plus faibles. Ces tendances sont compréhensibles et s'expliquent par une rigidité du granulat de sable plus importante que celle de la pâte de ciment, alors que l'augmentation du rapport E/C conduit à une porosité plus importante du mortier. Il faut remarquer également que l'écart entre les vitesses longitudinales (ou transversales) mesurées à l'état initial suivant différentes directions sont assez faibles. Cette observation nous permet de considérer pour les matériaux testés un comportement globalement isotrope à l'état initial.

Tableau III.5 : Vitesses ultrasoniques mesurées à l'état initial des mortiers.

Échantillon	E/C=0.4					E/C=0.5				
	$V_{P,0}$ (m/s)	$V_{P,90}$ (m/s)	$V_{P,45}$ (m/s)	$V_{S,0}$ (m/s)	$V_{S,90}$ (m/s)	$V_{P,0}$ (m/s)	$V_{P,90}$ (m/s)	$V_{P,45}$ (m/s)	$V_{S,0}$ (m/s)	$V_{S,90}$ (m/s)
SC1	3830	3880	3840	2310	2420	3630	3590	3570	2150	2240
SC1.5	4010	3980	3970	2520	2460	3780	3740	3750	2290	2340
SC2	4150	4240	4130	2590	2650	3820	3860	3830	2380	2440

Nous présentons, sur les figures III.13 et III.14, la variation des vitesses ultrasonores (rapport des vitesses à chaque niveau de contrainte avec la vitesse à l'état initial) des éprouvettes en fonction de la sollicitation mécanique. La première remarque sur ces résultats est que ces vitesses restent quasi constantes dans un premier temps puis elles diminuent au fur à mesure avant de décroître rapidement lorsque la contrainte dépasse une certaine valeur. Plus précisément, ces vitesses sont stables jusqu'à une contrainte de l'ordre de 40% à 50% de la contrainte de rupture, voire jusqu'à 60% pour quelques éprouvettes. En outre, la contrainte à partir de laquelle une chute importante des vitesses est observée se situe à environ 85% à 90% de la contrainte de rupture. Cette valeur de contrainte semble indépendante du rapport E/C ou S/C. Cette observation est concordante avec celles présentées dans la littérature ([SAN10], [QAS03], [SHO10]).

Ce comportement est assez général et concerne tous les types d'ondes sauf les ondes longitudinale suivant la direction verticale $V_{p,90}$. Celle-ci diminue que très légèrement même au delà de la contrainte critique. Les différences des vitesses dans la direction axiale et latérale montrent en effet une anisotropie induite au cours de chargement qui est d'autant plus forte que le chargement augmente. Les résultats présentés sur les figures III.13 et III.14 montrent que les vitesses mesurées dans la direction verticale sont toujours plus élevées que celles mesurées dans la direction horizontale tout au long de l'essai de compression uniaxiale. Quantitativement, cette anisotropie peut être évaluée grâce aux paramètres de Thomsen [THO86] faisant appel à l'anisotropie du tenseur de rigidité élastique du matériau:

$$\varepsilon = \frac{C_{3333} - C_{1111}}{2C_{1111}}; \quad \gamma = \frac{C_{1313} - C_{1212}}{2C_{1212}}; \quad (\text{III.1})$$

avec :

$$\begin{aligned} C_{1111} &= \rho.V_{11}^2 = \rho.V_{p,0}^2; & C_{3333} &= \rho.V_{33}^2 = \rho.V_{p,90}^2; \\ C_{1313} &= \rho.V_{13}^2 = \rho.V_{SV,0}^2; & C_{1212} &= \rho.V_{12}^2 = \rho.V_{SH,0}^2; \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Dans la formule III.1, ε quantifie l'anisotropie des ondes longitudinales, γ évalue l'anisotropie des ondes transversales [SAR06]. L'évolution des ces paramètres d'anisotropie en fonction du chargement est présentée sur la figure III.15. On constate une augmentation des paramètres ε , γ lorsque la contrainte uniaxiale augmente. La variation des paramètres ε , γ est significative à partir d'une contrainte axiale égale à 50% de la contrainte maximale et une très forte variation à partir de 85% de la contrainte au pic.

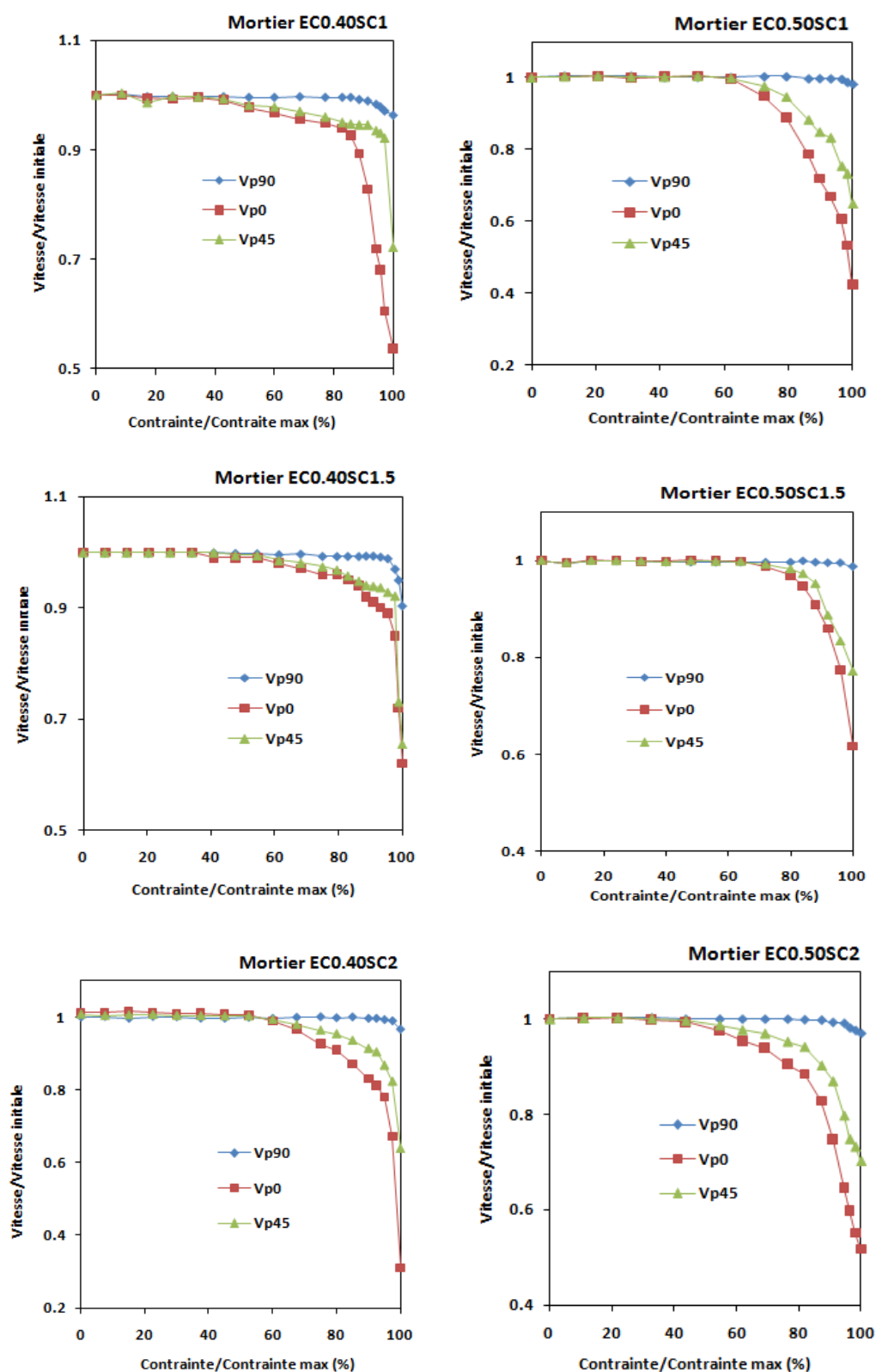


Figure III.13 : L'évolution des vitesses longitudinales en fonction de chargement des différentes éprouvettes de mortier.

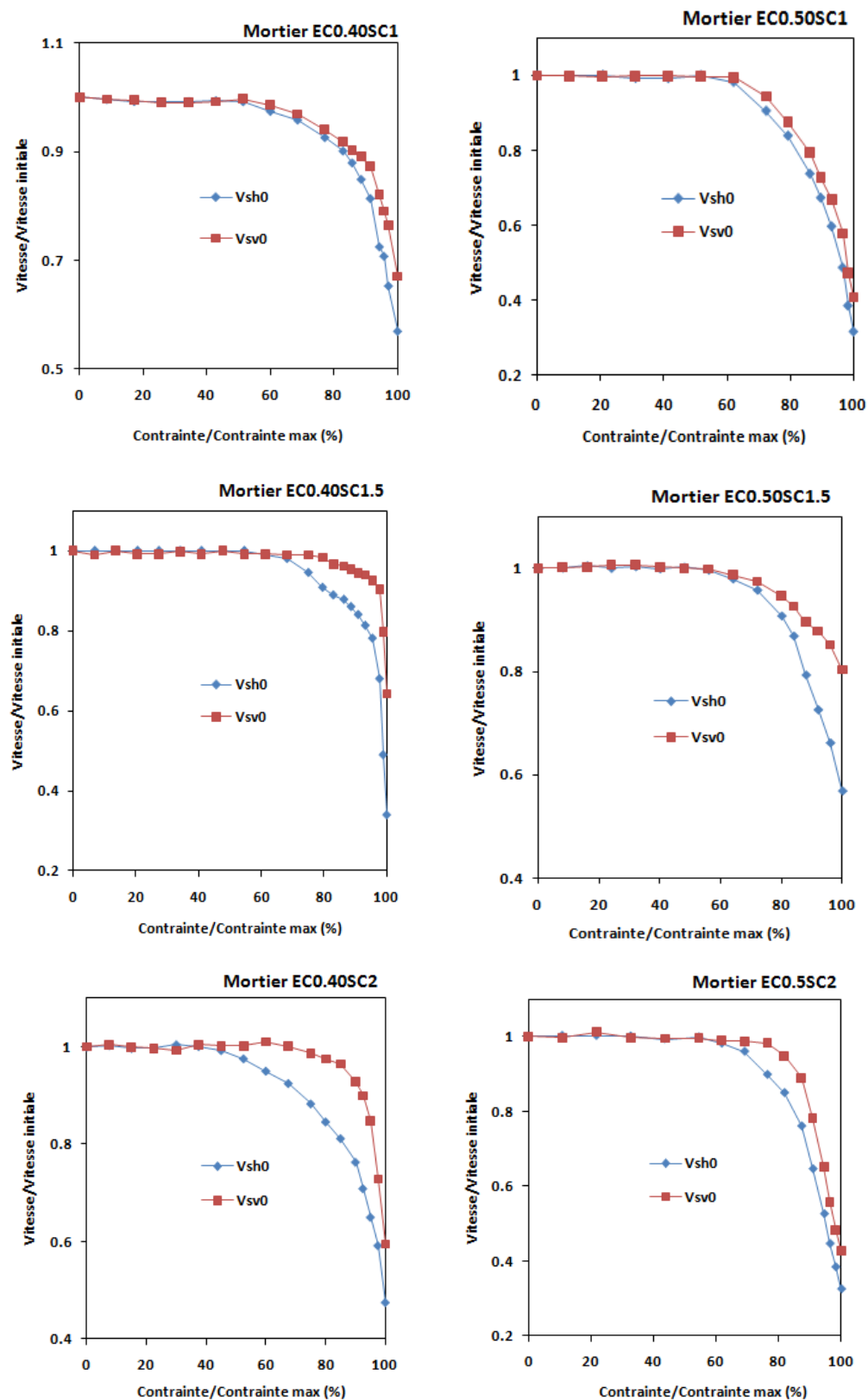


Figure III.14 : L'évolution des vitesses transversales en fonction de chargement des différentes éprouvettes de mortier.

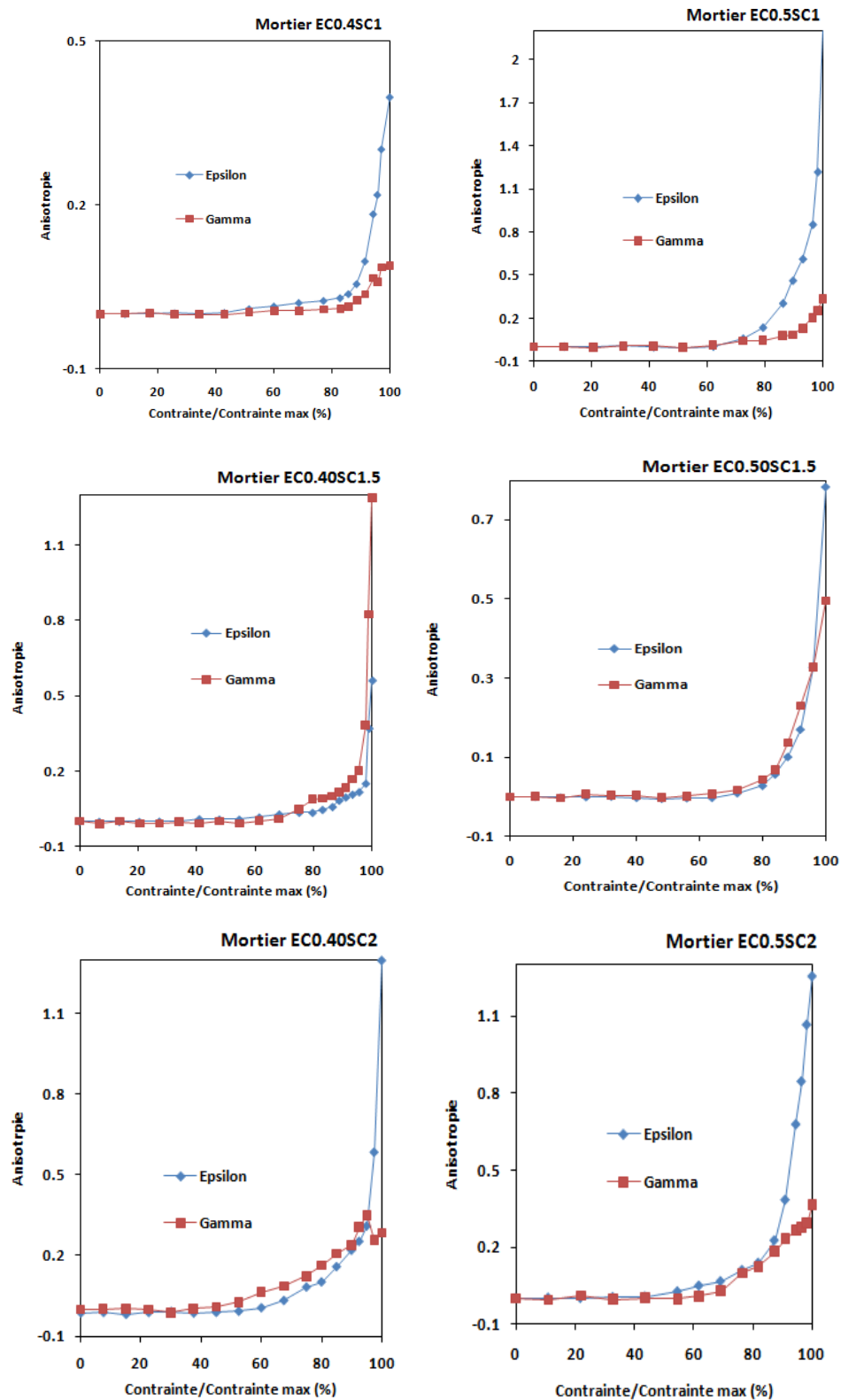


Figure III.15 : Évolution des paramètres d'anisotropie de Thomsen en fonction de chargement des différentes éprouvettes de mortier.

Finalement, sur les figures III.16 et III.17 nous présentons la variation du coefficient d'atténuation des ondes ultrasonores au cours de chargement par rapport à l'état initial des éprouvettes. Rappelons que dans ces calculs on définit un coefficient d'atténuation relatif puisque les signaux de références sont ceux obtenus à l'état initial. Le calcul est effectué par la méthode du rapport des spectres des signaux de la même nature. Le fait d'utiliser des signaux à l'état initial comme les références a l'avantage qu'on n'a pas besoin d'effectuer les mesures sur un autre matériau en aluminium. En plus, la comparaison des signaux mesurés par les mêmes capteurs fixés sur l'éprouvette dans la même configuration permet de réduire les erreurs dans le calcul des valeurs absolues du coefficient d'atténuation qui dépend fortement de la méthode de mise en place et la qualité du contact entre capteurs et matériaux. D'ailleurs, la variation du coefficient d'atténuation sera un paramètre important pour capturer l'endommagement local au sein d'un matériau grâce à la méthode de tomographie détaillée dans le prochain chapitre.

L'évolution de l'atténuation des ondes ultrasonores sous l'effet de contrainte de compression (figures III.16 et III.17) montre la même tendance que celle des vitesses à savoir une variation faible voire négligeable de l'atténuation pour les contraintes inférieures à 50% de la contrainte de rupture et une augmentation importante d'atténuation à partir des contraintes dépassant 80% de la contrainte maximale. De la même façon, la relation entre ces valeurs de contrainte critique et les rapports E/C et S/C n'est pas clairement observée.

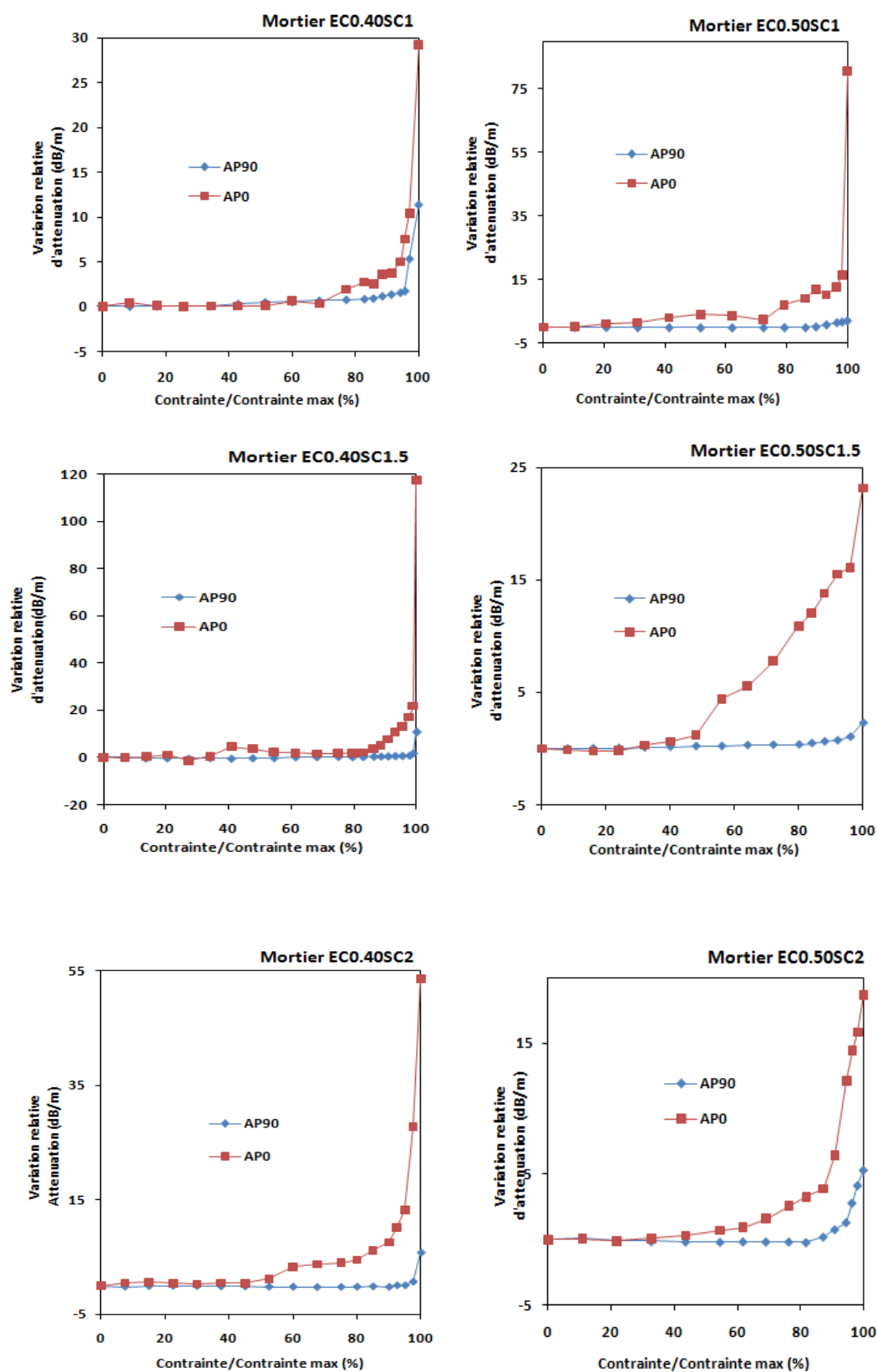


Figure III.16 : Variation du coefficient d'atténuation des ondes longitudinales au cours de chargement par rapport à l'état initial des différentes éprouvettes de mortier.

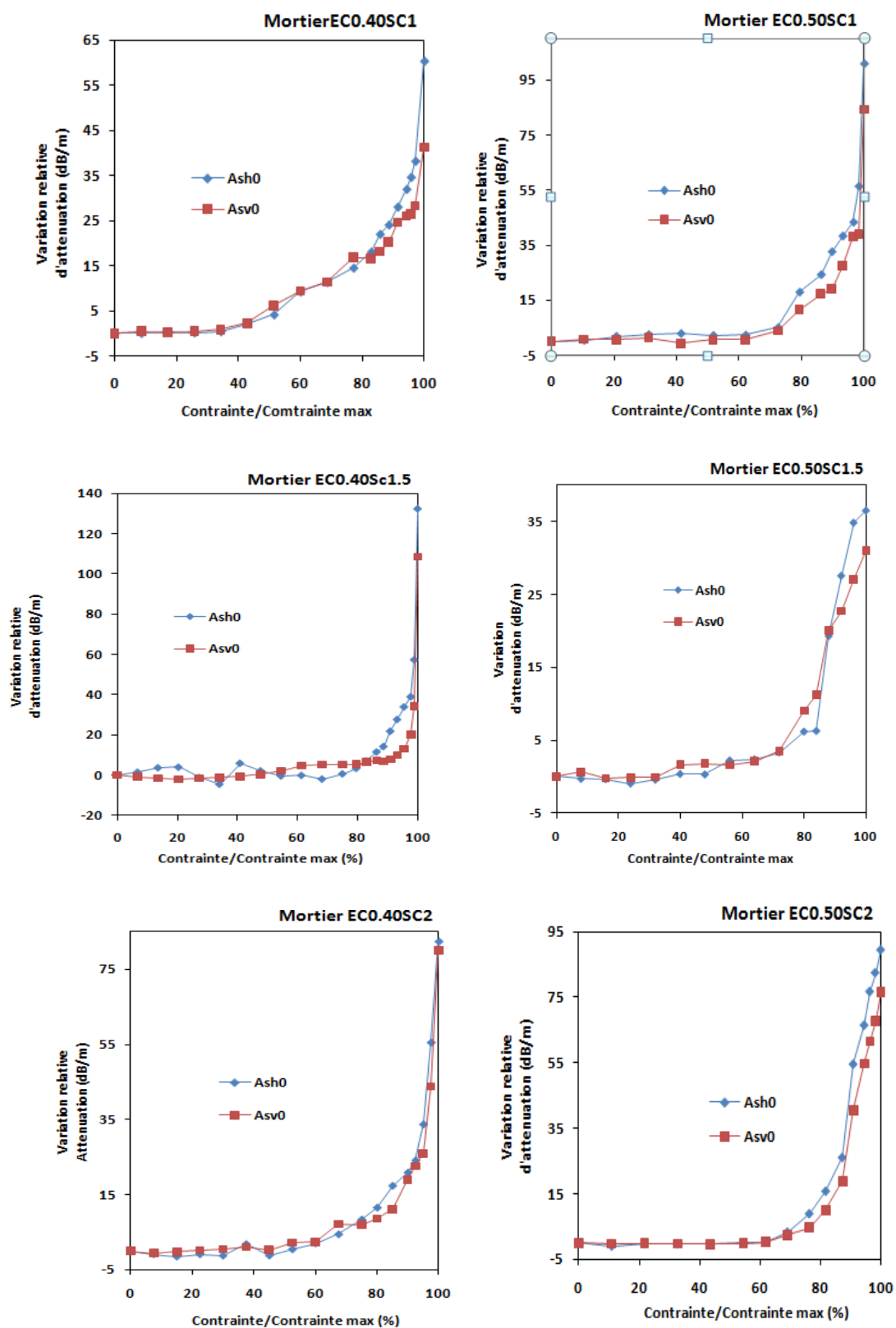


Figure III.17 : Variation du coefficient d'atténuation des ondes transversales au cours de chargement par rapport à l'état initial des différentes éprouvettes de mortier.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons utilisé le système développé dans le chapitre II pour caractériser l'endommagement des géomatériaux à matrice cimentaire comme les mortiers au cours des essais de compression uniaxiale. Différents paramètres d'ondes ultrasonores comme les vitesses et l'atténuation sont évalués en continu au cours des essais. Les résultats expérimentaux montrent un comportement qui dépend étroitement de l'état de contrainte appliqué : un comportement initialement isotrope reste quasi stable jusqu'à environ 50% de la contrainte de rupture représenté par des valeurs quasi constantes des vitesses et d'atténuation. A partir de ce stade, une diminution légère des vitesses (correspondant à une augmentation d'atténuation) de toutes les ondes indique le développement de l'endommagement au sein des éprouvettes. Lorsque la contrainte de compression dépasse une valeur critique, de l'ordre de 85% de la contrainte maximale, on remarque une chute brutale des vitesses. Toutefois, l'intensité de la diminution des vitesses suivant différentes directions n'est pas identique ce qui caractérise en effet un comportement devenu anisotrope au cours du chargement.

Parallèlement à la variation des vitesses, la caractérisation de l'endommagement des géomatériaux par l'atténuation des ondes ultrasonores semble un outil performant et efficace. L'évolution de ces paramètres des ondes ultrasonores au cours d'essai de compression illustre d'une part la dégradation des propriétés mécaniques à l'échelle macroscopique et d'autre part, elle reflète la variation microstructurale conséquence aux différents mécanismes de la nucléation, de la croissance et de la coalescence des microfissures ou bien de la décohésion de l'interface des phases constituantes du matériau. Vu l'approche choisie dans ce chapitre, où pour le traitement des signaux, l'échantillon a été considéré homogène pendant toute le chargement, les mécanismes locaux d'endommagement ne sont pas considérés.

L'étude quantitative de certains de ces mécanismes sur l'endommagement du matériau fait l'objet du cinquième chapitre basé sur une modélisation par une approche micromécanique de l'endommagement en comparant les prédictions numériques avec les résultats expérimentaux obtenus dans ce chapitre.

Chapitre IV. Tomographie d'endommagement par ultrasons

IV.1. Introduction

L'intérêt de la méthode ultrasonore n'est pas limité à la mesure des vitesses ou d'atténuation des ondes ultrasonores à certains endroits d'une éprouvette. Elle peut être également utilisée pour construire des images qui peuvent être apparentés à des images d'endommagement progressif au sein du matériau ([CHO95], [CHO05], [SCO04], [LEI09], [HAL11], [CHA11]). A titre d'exemple [CHO95] a étudié le comportement d'un échantillon de granite lors d'un essai de compression uniaxiale. A partir des images du champ de vitesse une anisotropie initiale du matériau due à la microfissuration préexistante est mise en évidence. Puis sous l'influence de la contrainte axiale, les images illustrent une augmentation plus rapide des lenteurs suivant les directions perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette que celles suivant la direction parallèle à la direction du chargement. Dans son rapport [SCO04] a étudié l'endommagement d'une roche calcaire au cours d'un essai de compression triaxiale en produisant les cartographies des vitesses des ondes ultrasonores. Les résultats indiquent que le champ de vitesse est stable avant de décroître lorsque la contrainte approche la contrainte de rupture. L'image des champs de vitesses correspondant à une contrainte après le pic montre une zone centrale dans l'échantillon où les vitesses diminuent fortement. Cette zone est concordante avec la zone facturée observée après la rupture d'éprouvette. [CHA11] a utilisé la méthode ultrasonore pour identifier la zone de déformations localisées et de caractériser l'évolution de la bande de cisaillement au cours de chargement des roches calcaires. Une autre étude intéressante par [LEI09] a montré la capacité de la méthode ultrasonore dans le domaine de stockage de CO₂. Ces auteurs ont réussi à capturer des images du remplacement de l'eau par CO₂ au cours d'un essai d'injection effectué sur des roches calcaires.

Dans le cadre de ce travail, nous utilisons cette technique de tomographie pour observer l'endommagement des éprouvettes au cours d'un essai de compression simple. Pour cela, dans un premier temps, nous présentons brièvement la notion de la tomographie et les algorithmes de reconstruction des images. Les résultats obtenus sur les éprouvettes initialement endommagées sont ensuite abordés permettant de valider la procédure avant l'application de cette procédure pour les éprouvettes saines sous compression uniaxiale.

IV.2. Généralités sur la tomographie

La tomographie regroupe l'ensemble des méthodes non destructives permettant d'étudier la composition et la structure interne d'un objet opaque. Son nom vient du grec « *tomos* » (section) et « *graphein* » (écrire). Cette méthode permet de cartographier en deux ou trois dimensions un ou plusieurs paramètres physiques, grâce à des mesures d'ondes ou de rayonnements émis, transmis ou réfléchis par l'objet étudié. Plusieurs méthodes sont disponibles comme la tomographie ultrasonore, magnétique, électrique, neutron, rayons X ou gamma. Dans le cadre de ce travail, la tomographie par ultrasons a été choisie.

Les ultrasons présentent une totale innocuité ce qui rend leur utilisation très attrayante en médecine mais également en contrôle non destructif (CND) où la fréquence des contrôles par un manipulateur est grande. C'est dans le domaine médical que l'imagerie ultrasonore est la plus répandue, elle est appelée échographie. Le principe de l'échographie repose sur la construction d'une image à partir de l'amplitude de l'écho rétrodiffusé. Cependant une telle technique est limitée puisqu'elle utilise seulement une fraction de l'information disponible dans l'onde réfléchie [FRA96]. L'application de tomographie ultrasonore dans les études des matériaux constitue un domaine actif de recherche. Elle a pour objet de mesurer la distribution spatiale d'un ou plusieurs paramètres acoustiques propres au milieu tels que l'atténuation, l'impédance ou la vitesse de propagation des ondes. Elle peut également donner accès à l'élasticité voire même la température du milieu [BAS94]. La tomographie ultrasonore quantitative permet, dans une certaine mesure, de caractériser les constituants d'un milieu [KLE94].

En général, on distingue la tomographie en réflexion et la tomographie en transmission comme illustrée sur les figures IV.1 et IV.2. La première représente la tomographie des ondes diffractées qui permet de traiter la totalité du champ diffracté par un objet. Cette tomographie en réflexion (et par extension en diffraction), basée sur la réflectivité du milieu (l'impédance acoustique) donne accès, dans sa version qualitative, à une cartographie des contours des objets [PHI 06]. Dans cette technique le transducteur est généralement utilisé successivement en émetteur et en récepteur. L'obtention des différents points de vue se fait par rotation du transducteur autour de la cible. Ici le transducteur émet un faisceau conique, mais un transducteur émettant un faisceau parallèle peut également être utilisé. Il existe des transducteurs capables d'acquérir une succession de plans échographiques selon une géométrie multi-éventail (cone beam). Des recherches sur la technologie des transducteurs matriciels sont en cours ([PHI06], [PHI97]), [FRA96]). L'un des principaux intérêts de la

tomographie en réflexion par rapport à la tomographie en transmission (présentée ci-dessous) est la rapidité des acquisitions. Si l'on modifie astucieusement la forme du signal émis, il est possible de simplifier la reconstruction en s'affranchissant notamment du filtrage avant épandage [MOS86].

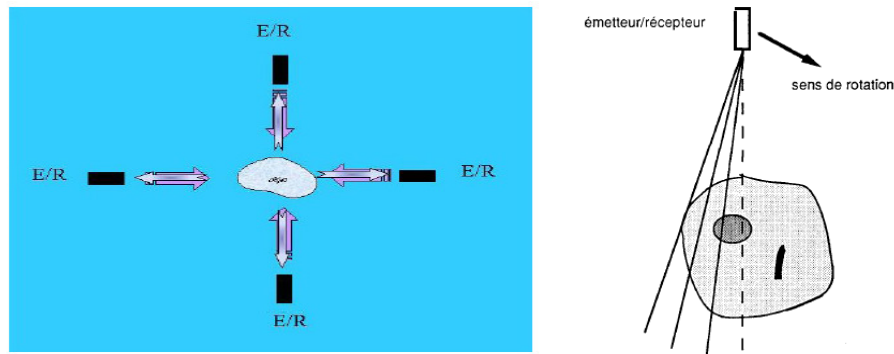


Figure IV.1 : Principe de l'acquisition en tomographie ultrasonore par réflexion
(D'après [PHI06], [FRA96]).

La deuxième classe, dite tomographie en transmission, basée sur les mesures du temps de vols ou de l'atténuation [GRE81] sur le trajet de propagation, permet d'atteindre une cartographie des fluctuations relatives de vitesses ou d'atténuation suivant ce même trajet. Le principe d'acquisition en transmission est assez simple comme illustré sur la figure IV.2. Dans ce cas, le système est constitué d'un émetteur, qui peut être un transducteur focalisé à pastille piézoélectrique, et dans l'autre côté de l'objet, un transducteur identique utilisé en mode récepteur. L'information transmise à travers toute la coupe explorée est obtenue en enregistrant une série de signaux par déplacement pas à pas de l'ensemble émetteur/récepteur.

L'obtention de plusieurs angles de vue se fait par rotation de l'ensemble émetteur/récepteur autour d'un axe de rotation. Des systèmes plus pratiques existent maintenant où l'émission et la réception sont composées respectivement d'une barrette d'éléments piézoélectriques. L'acquisition de la série de signaux relative à une coupe se fait sans déplacement mécanique par balayage électronique des éléments. Quelques autres dispositifs expérimentaux orientés 3D existent, mais sont généralement en exemplaire unique et sont la propriété de laboratoires de recherche. L'acquisition d'informations 3D se fait généralement par déplacement mécanique d'un système à barrettes [FRA96].

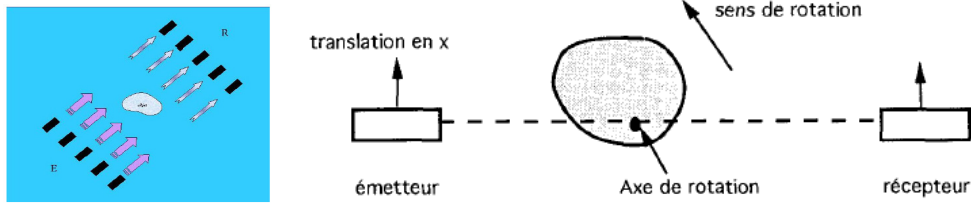


Figure IV.2 : Principe de l'acquisition en tomographie ultrasonore par transmission (D'après [PHI06], [FRA96]).

IV.3. Algorithmes de reconstruction de tomographie

Pour obtenir l'image d'un objet à partir de la connaissance de ses projections, nous utilisons les algorithmes de reconstruction dont la base théorique a été développée à partir des années 1950 ([NGU08], [BOS02]). La tomographie par ultrasons se caractérise par une géométrie dite «parallèle », c'est-à-dire un faisceau rectiligne, balayé perpendiculairement à la cible (en première approximation). La reconstruction est ainsi réalisée par des plans de coupe successifs, horizontaux si le faisceau est horizontal. La distribution en volume sera obtenue par la superposition numérique des plans adjacents [NGU08].

La géométrie de l'expérience comme présentée sur la figure IV.3 est modélisée à l'aide de deux repères, l'un associé à l'échantillon $(0, x, y)$, l'autre au faisceau $(0, s, u)$. Les équations permettant de passer d'un système de coordonnées à l'autre comme suivante :

$$\begin{cases} x = s \cos \theta - u \sin \theta \\ y = s \sin \theta + u \cos \theta \end{cases} \leftrightarrow \begin{cases} s = x \cos \theta + y \sin \theta \\ u = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Chaque projection est modélisée par la transformée de Radon $p(s, \theta)$ [RAD17] de la fonction $f(x, y)$ représentant la grandeur locale à reconstruire, que nous appellerons densité. La transformée de Radon représente l'intégrale des valeurs $f(x, y)$ le long de la ligne L , appelée rayon de projection, qui est définie par deux paramètres : s est sa distance à l'origine et θ est l'angle entre l'axe Ox et l'axe Os , qui est perpendiculaire à la direction de projection donnée par l'axe Ou .

$$p(s, \theta) = R[f(x, y)] = \int_L f(x, y) du$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} f(s \cos \theta - u \sin \theta, s \sin \theta + u \cos \theta) du \quad (\text{IV.2})$$

Le rayon de projection L matérialise la direction du faisceau incident. Le pas d'intégration représente une variation élémentaire de longueur sur cette droite d'intégration L . Lorsque les valeurs des projections sont représentées par un code de couleurs en fonction des positions θ et s , on obtient un sinogramme. Chaque ligne horizontale du sinogramme représente la projection du plan de coupe considéré à un angle donné. L'image à reconstruire est un ensemble de pixel dont le contenu local est déterminé à partir de ces projections. C'est donc bien un problème d'inversion qu'il faut résoudre ([NGU08], [RAD17]).

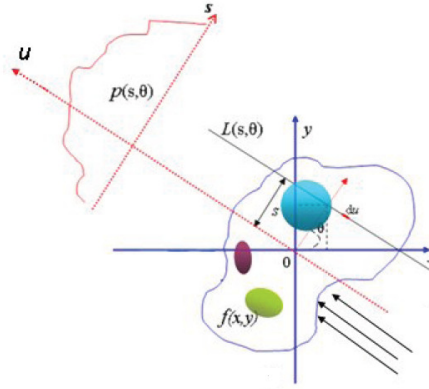


Figure IV.3 : Vue d'un plan de coupe de l'objet analysé et mesure des projections. Allure schématique du sinogramme correspondant à ce plan de coupe (D'après [NGU08]).

IV.3.1. Méthodes analytiques de reconstruction d'image

IV.3.1.1. Méthode de rétroprojection directe

Dans cette méthode on définit une fonction $\hat{f}$ à partir de l'ensemble des projections ($p_\theta, \theta \in [0, \pi]$):

$$\hat{f}(x, y) = \int_0^\pi p(s, \theta) d\theta \quad (\text{IV.3})$$

Il est possible de trouver, à chaque point du plan de coupe considéré la rétroprojection directe qui consiste à superposer les contributions de l'ensemble des rayons passant par le point, c'est à dire en intégrant $p(s, \theta)$ pour toutes les valeurs de θ .

Les méthodes analytiques expriment le problème de la reconstruction dans une espace continue et leur mise en œuvre nécessite une étape de discrétisation des formules de reconstruction ; l'intégrale précédente s'écrit alors :

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{k=1}^{n_\theta} p(s, \theta_k) \Delta\theta \quad (\text{IV.4})$$

avec n_θ est le nombre total de projections, θ_k est la $k^{\text{ème}}$ position angulaire, $\Delta\theta$ est le pas angulaire entre deux projections successivement : $\Delta\theta = \frac{\pi}{n_\theta}$.

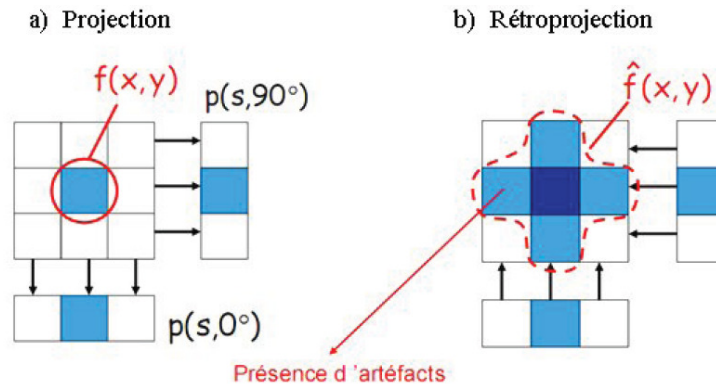


Figure IV.4 : Reconstruction tomographique d'un objet simple composé d'un seul voxel non nul au centre (a) ; la rétroprojection directe génère des artefacts en étoile autour du voxel central (b) (D'après [NGU08]).

Néanmoins cette méthode ne fournit qu'une estimation grossière de la distribution f . En effet elle génère à l'extérieur de l'objet que l'on souhaite reconstruire des pixels/voxels non nuls, alors qu'ils ne contiennent aucune information en réalité. En conséquence, des artefacts, dits «artefacts en étoile» apparaissent sur l'image reconstruite comme figure IV.4. Le résultat obtenu $\hat{f}$ n'est pas une inversion exacte de la projection. Il nous faut utiliser une méthode qui permette l'élimination de ces artefacts : c'est la méthode de rétroprojection filtrée, qui est basée sur un calcul dans le plan de Fourier [NGU08].

IV.3.1.2. Méthode de rétroprojection filtrée

Pour supprimer l'effet de «flou» (artefacts en étoile) apparaissant dans la méthode de rétroprojection directe, un filtre spécifique peut être utilisé. C'est le principe de la

rétroprojection filtrée. La transformée de Fourier monodimensionnelle $P(v, \theta)$ de la projection $p(s, \theta)$ est présentée par l'équation suivante ([LEF94][NGU08]):

$$P(v, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(s, \theta) e^{-i2\pi v s} ds \quad (IV.5)$$

En remplaçant $p(s, \theta)$ par l'équation (IV.2), il devient :

$$P(v, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) du \right] e^{-i2\pi v s} ds \quad (IV.6)$$

Puis, un changement de variable permet d'obtenir l'expression de la transformée de Fourier bidimensionnelle de l'objet:

$$\begin{aligned} P(v, \theta) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-i2\pi v (x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-i2\pi (x(v \cos \theta) + y(v \sin \theta))} dx dy \\ &= F(v \cos \theta, v \sin \theta) \end{aligned} \quad (IV.7)$$

Le résultat marquant est donc que la transformée de Fourier à une dimension de projection $p(s, \theta)$ est égale à la transformée de Fourier à deux dimensions de $f(x, y)$ le long de l'axe de fréquences qui est perpendiculaire à la direction de projection et dont l'équation paramétrique est donnée par la relation $(v_x = v \cos \theta, v_y = v \sin \theta)$. Ceci constitue le théorème de la coupe centrale, pivot de l'inversion de la transformée de Radon. Finalement, la transformée de Fourier inverse permet ainsi d'estimer $f(x, y)$ à partir de $F(v_x = v \cos \theta, v_y = v \sin \theta)$:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(v_x, v_y) e^{i2\pi (x v_x + y v_y)} dv_x dv_y \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(v \cos \theta, v \sin \theta) e^{i2\pi v s} v dv d\theta \end{aligned} \quad (IV.8)$$

D'après le théorème de la coupe centrale, en passant des coordonnées cartésiennes (v_x, v_y) aux coordonnées polaires (v, θ) du plan fréquentiel et en notant que $P(v, \theta) = P(-v, \pi + \theta)$, il devient :

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P(v, \theta) |v| e^{i2\pi v s} dv d\theta \quad (IV.9)$$

L'intégrale interne dans cette expression représente mathématiquement une projection filtrée $p^*(s, \theta)$ sous la forme :

$$p^* = \int_{-\infty}^{+\infty} P(v, \theta) |v| e^{i2\pi v s} dv \quad (\text{IV.10})$$

Le filtre fréquentiel utilisé, appelée «filtre de rampe», prend la forme : $G(v) = |v|$

Ce calcul revient donc à effectuer une rétroprojection de projections filtrées $p^*(s, \theta)$, c'est à dire :

$$f(x, y) = \int_0^\pi p^*(s, \theta) d\theta \quad (\text{IV.11})$$

Il apparaît donc que la fonction f peut être obtenue de façon analytique exacte à partir de la transformée de Fourier des projections mesurées. L'action du filtrage dans la méthode de rétroprojection filtrée peut être expliquée comme suit : après filtrage par le filtre $|v|$, les projections filtrées peuvent contenir des valeurs négatives. La sommation de ces valeurs négatives et positives se compense de telle sorte que l'on obtient une image f correspondant à l'image réelle de l'objet, alors que les artefacts en étoile apparaissant par rétroprojection directe sont, en théorie, éliminés [NGU08].

Ainsi l'algorithme de rétroprojection filtrée apparaît comme la succession de 3 grandes étapes : acquisition des projections $p(s, \theta)$; calcul des projections filtrées $p^*(s, \theta)$; rétroprojection, c'est à dire sommation sur tous les angles θ des projections filtrées $p^*(s, \theta)$ afin d'obtenir l'image f .

Toutefois il faut se rappeler que le problème traité jusqu'ici est un problème continu : on a reconstruit une fonction f continue à partir de projections p continues. Ceci suppose notamment un nombre de projections mesurées infini. Ces conditions ne sont évidemment pas réalisées en pratique, car les systèmes d'acquisition permettent d'obtenir des projections pour un nombre fini d'angles. De plus, les projections sont enregistrées sur des points discrets, il y a donc un nombre fini de rayons de projection. De ce fait, l'image obtenue n'est pas la solution mathématiquement exacte du problème d'inversion, mais seulement une approximation de la fonction f . En particulier il faut noter que la densité reconstruite peut parfois prendre des valeurs négatives dues à des artefacts de reconstruction [NGU08].

Le fait que le pas d'échantillonnage w des projections (distance entre deux rayons consécutifs) ne soit pas infiniment petit conduit à une limitation de bande sur les fréquences spatiales ν :

$$|\nu| \leq \nu_c \quad (\text{IV.12})$$

La fréquence maximale ν_c est dite «fréquence de coupure». Elle est reliée au pas d'échantillonnage w par :

$$\nu_c = \frac{1}{2w} \quad (\text{IV.13})$$

L'application de la limitation de bande conduit à modifier le filtre $G(\nu)$ en le limitant par une fenêtre rectangulaire sur l'intervalle $[-\nu_c; +\nu_c]$:

$$G(\nu) = \begin{cases} |\nu| & \text{si } |\nu| \leq \nu_c \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.14})$$

Expérimentalement, le spectre en fréquence de l'objet analysé s'étend en réalité au-delà de la fenêtre $[-\nu_c; +\nu_c]$ car il existe toujours des structures plus fines que le pas d'échantillonnage, en particulier aux bords aigus de l'objet. La limitation de bande conduit alors à l'apparition de fréquences parasites lors de la reconstruction. En outre, le processus de détection des données fait apparaître du bruit dans les projections collectées. Cela affecte directement l'exactitude de l'image reconstruite. On peut partiellement remédier à ces problèmes en remplaçant le filtre de rampe par un filtre lissant, qui réduit le poids des composantes de haute fréquence. Le choix du filtre lissant est dicté par un compromis entre la réduction du bruit et la dégradation de la résolution spatiale qui en résulte.

IV.3.2. Méthodes algébriques

Contrairement aux méthodes analytiques, les méthodes algébriques expriment le problème de la reconstruction dans un espace discret. Les algorithmes obtenus sont alors considérés comme de « bonnes approximations » des formules continues. On définit un vecteur p des projections $(p_j; 1 \leq j \leq M)$; avec M étant égal au nombre total de rayons de projection. On définit un vecteur f de la grandeur locale $(f_i; 1 \leq i \leq N)$; avec N le nombre de pixels à reconstruire. On a :

$$p_j = \sum_{i=1}^N R_{ji} f_i; \quad (1 \leq j \leq M) \quad (\text{IV.15})$$

La matrice des coefficients R est appelée matrice de projection. Le coefficient R_{ji} caractérise la contribution du pixel i au rayon de projection j comme illustrée sur la figure IV.5. Il exprime la probabilité qu'un événement du pixel i soit détecté dans la projection j .

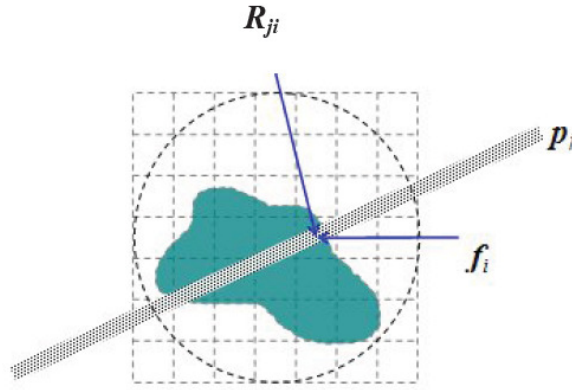


Figure IV.5 : Géométrie du problème de reconstruction pour les méthodes itératives. Le coefficient R_{ij} modélise le recouvrement du pixel i et du rayon j (D'après [NGU08]).

Cette formulation mathématique permet d'exprimer le problème comme la résolution d'un système linéaire classique. L'inversion directe de la matrice permettrait de résoudre le problème de reconstruction une fois pour toutes, pour une géométrie d'acquisition donnée. Cependant ceci n'est pas réalisable en pratique, en raison de la taille de la matrice qui n'est pas souvent carrée [FRA96]. En outre, il faut noter qu'une grande partie des éléments de matrice sont nuls, puisque seul un nombre restreint de pixels contribue à une projection donnée. Notons enfin que, les données expérimentales étant inévitablement bruitées, ce système d'équations peut être inconsistant, c'est à dire qu'il n'admet pas en général une solution unique [NGU08], [FRA96].

Pour toutes ces raisons, l'inversion de cette matrice n'est pas effectuée de manière directe, mais par itérations successives dont le principe général consiste à partir d'une estimation initiale $f^{(0)}$, et à corriger pas à pas cette estimation. Pour obtenir la distribution $f^{(k+1)}$ à l'ordre $(k+1)$ des itérations, on modifie $f^{(k)}$ par des facteurs de correction déterminés en comparant les projections calculées et les projections réelles p .

On distingue les différentes catégories d'algorithmes itératifs, selon la façon d'effectuer cette correction. Les méthodes itératives classiques, comme la méthode ART (Algebraic

Reconstruction Technique) et la méthode SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) sont les techniques les plus utilisées dans la littérature.

La méthode ART a été publiée pour la première fois par Gordon [GOR70]. Dans cette méthode la correction étant effectuée rayon par rayon. L'algorithme ART s'écrit succinctement comme suivante :

$$f_j^{(k+1)} = f_j^{(k)} + \frac{p_i - \sum_{l=1}^N R_{il} f_l^{(k)}}{\sum_{l=1}^N R_{il}^2} R_{ij}; \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (\text{IV.16})$$

Dans l'équation (IV.16), le deuxième terme à gauche est la correction pour la projection i qui actualise la valeur du pixel j . Donc pour chaque rayon il est utilisé pour corriger tous les pixels qu'il traverse. Le processus itératif est arrêté lorsque l'écart entre les projections expérimentales et les valeurs calculées est estimé suffisamment petit. L'algorithme ART présente l'avantage de converger assez rapidement. En revanche il est instable en présence de données bruitées [GOR74], [NGU08]. Pour réduire cet artéfact, un paramètre de relaxation $\lambda_k < 1$ est ajouté dans la partie de correction comme par exemple dans les deux versions modifiées de ART méthodes MART (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) et AART (Adaptive Algebraic Reconstruction Technique) (voir [ATK07], [LUI04]).

A l'inverse, les méthodes de type SIRT consistent à corriger simultanément un pixel i en utilisant les rayons p_j qui le traversent, comme indiqué sur la figure IV.6. Mathématiquement ces méthodes s'expriment dans l'équation (IV.17). Ce type de méthode est surtout employé pour la reconstruction à partir de données bruitées. Dans ce cas, ces méthodes sont plus consistantes que les méthodes ART. Cependant expérimentalement, ces méthodes convergent moins vite vers une solution que les méthodes ART. Une itération de SIRT correspond environ à n_θ itérations de ART (n_θ étant le nombre de projections).

$$f_j^{(k+1)} = f_j^{(k)} + \lambda_k \frac{\sum_{i=1}^M \left[\frac{p_i - \sum_{l=1}^N R_{il} f_l^{(k)}}{\sum_{l=1}^N R_{il}^2} R_{ij} \right]}{\sum_{i=1}^M R_{ij}}; \quad (\text{IV.17})$$

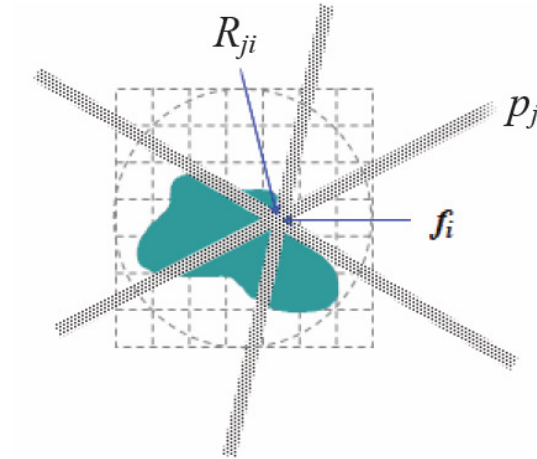


Figure IV.6 : Principe de la méthode SIRT (D'après [NGU08] , [GOR74]).

Les avantages des méthodes ART et SIRT sont retenus dans l'autre méthode dite SART (Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique) qui convertit les données de haute qualité dans quelques itérations. Par exemple, la valeur du pixel j actualisée à l'itération $(k+1)$ dans la formule SART s'écrit :

$$f_j^{(k+1)} = f_j^{(k)} + \lambda_k \frac{\sum_{i \in C_\varphi} \left[\frac{p_i - \sum_{l=1}^N R_{il} f_l^{(k)}}{\sum_{l=1}^N R_{il}} R_{ij} \right]}{\sum_{i \in C_\varphi} R_{ij}}; \quad (IV.18)$$

où C_φ est l'ensemble des rayons dans la projection φ .

La convergence de cette méthode est assurée lorsque le paramètre de relaxation dans l'équation (IV.18) vérifie la condition $0 < \lambda_k < 2$.

IV.4. Application de la tomographie par ultrasons pour caractériser l'endommagement des géomatériaux à matrice cimentaire

Le système d'ultrasons détaillé dans le deuxième chapitre a été utilisé dans cette partie pour reconstruire les images de l'endommagement des géomatériaux à matrice cimentaire. Pour

obtenir une haute qualité des images, plusieurs capteurs sont mis en place dans le but d'augmenter au maximum la densité des mesures. Pour rappel, notre système présenté dans le deuxième chapitre permet d'utiliser au maximum 96 voies qui correspondent aux 32 capteurs PI 143.01 à trois couches.

Pour ce qui concerne la méthode de reconstruction des images à partir des données ultrasonores, nous avons choisi la méthode SART. Pour cela, un package écrit en MATLAB disponible dans la littérature a été utilisé (voir [HAN12] pour plus de détails). Il faut préciser également que nous nous intéressons ici de la tomographie en transmission qui permet de donner en même temps les images des vitesses et d'atténuation de tous types d'ondes ultrasonores. Cela signifie que dans les formules précédentes les variables à déterminer, stockés dans le vecteur f , représentent soit les lenteurs (l'inverse des vitesses), soit les coefficients d'atténuation des pixels. De même, le vecteur des projections p désignera soit les temps de vols soit les rapports des amplitudes $\ln(A/A_{ref})$ selon qu'il s'agit d'une tomographie de vitesses (lenteurs) ou d'atténuation. En plus, au cours de chargement, la tomographie peut être réalisée à différents niveaux de contrainte illustrant ainsi la variation des lenteurs et des coefficients d'atténuation au sein des pixels avec la contrainte de compression σ . Dans ce dernier cas, le vecteur f indique l'ensemble des variations des lenteurs des pixels $f_i = \Delta s_i = s_i^\sigma - s_i^{\sigma=0}, (i=1, 2, \dots, N)$ (ou bien l'ensemble des variations des coefficients d'atténuation $\Delta \alpha_i = \alpha_i^\sigma - \alpha_i^{ini}$) alors que p est l'ensemble des variations du temps de vol

$$p_j = \Delta T_j = T_j^\sigma - T_j^{\sigma=0}, (j=1, 2, \dots, M) \quad \text{des} \quad \text{projections}$$

$$(p_j = \Delta \ln(A_j / A_{ref}) = \ln(A_j^\sigma / A_{ref}) - \ln(A_j^{\sigma=0} / A_{ref}), (j=1, 2, \dots, M) \text{ correspondant}).$$

Mathématiquement, on peut montrer que :

$$\Delta T_j = T_j^\sigma - T_j^{\sigma=0} = \sum_{i=1}^N R_{ji}^\sigma s_i^\sigma - \sum_{i=1}^N R_{ji}^{\sigma=0} s_i^{\sigma=0} \approx \sum_{i=1}^N R_{ji} (s_i^\sigma - s_i^{\sigma=0}) = \sum_{i=1}^N R_{ji} \Delta s_i \quad (\text{IV.19})$$

Ainsi, dans l'équation (IV.19) nous avons négligé la variation de la géométrie de l'éprouvette sous le chargement (condition de petites déformations) et donc la matrice de projection R reste constante au cours de chargement.

Finalement sur la figure IV.7 sont résumées les différentes étapes du processus de la réalisation d'une tomographie par ondes ultrasonores.

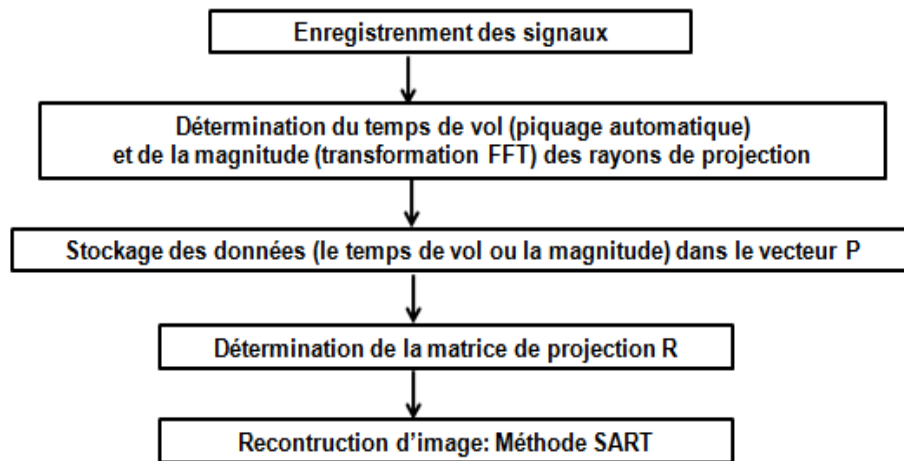


Figure IV.7 : Différentes étapes pour reconstruire les tomographies ultrasons.

IV.4.1. Tomographie des éprouvettes contenant un défaut macroscopique

Dans un premier temps, le système et les algorithmes choisis ont été testés sur une éprouvette en pâte de ciment, de taille 4x7x14cm sans chargement et contenant un vide créé artificiellement (figure IV.8). En fonction de la taille de l'éprouvette, 20 capteurs PI 143.01 ont été choisis dont deux barrettes de 8 capteurs chacune sont collées sur deux faces verticales et deux autres barrettes de 4 capteurs chacune sont collées sur deux autres faces horizontales. Ceci est possible dans ce cas puisqu' aucun chargement n'est prévu. Au total 256 rayons de mesures sont utilisés pour produire les cartographies des vitesses et d'atténuation des ondes ultrasonores au sein d'éprouvette. On précise également que les images construites sont basées sur 96 pixels distribué sur un maillage régulier.

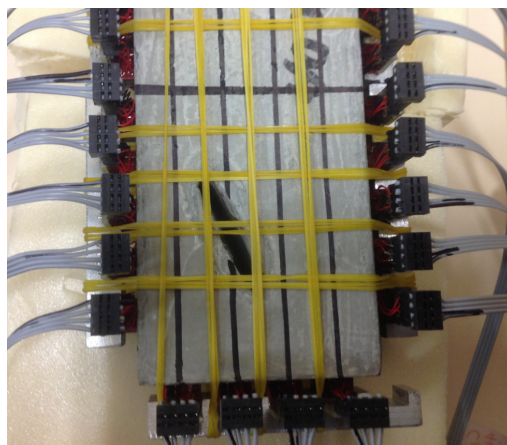


Figure IV.8 : Éprouvette initialement endommagée.

Sur la figure IV.9, nous présentons les images des vitesses et des coefficients d'atténuation des ondes ultrasonores de ce cas test. Sur les images des vitesses (figures IV.9 a, b, c) une zone en bas à gauche avec des vitesses plus faibles est constatée. Sur le même endroit, nous avons également des coefficients d'atténuation plus forts (figures IV.9 d, e, f). Nous pouvons par la suite effectuer une superposition des images des vitesses et des coefficients d'atténuation qui permet de donner les images plus visibles de la zone affaiblie au sein de l'éprouvette. Pour cela, nous fixons dans un premier temps les valeurs limites pour les vitesses et les coefficients d'atténuation pour chaque type d'onde ultrasonore. Les pixels dont la vitesse est inférieure à la limite de vitesses et le coefficient d'atténuation est supérieur à la limite d'atténuation prennent la valeur égale à 1 alors que les pixels qui ne vérifient pas ces conditions prennent la valeur 0. A titre d'exemple les limites des vitesses et des coefficients d'atténuation sont choisies respectivement $V_p^{\text{lim}} = 2680(m/s)$; $\alpha_{V_p}^{\text{lim}} = 34(dB/m)$ pour l'onde longitudinale et $V_s^{\text{lim}} = 2700(m/s)$; $\alpha_{V_s}^{\text{lim}} = 43(dB/m)$ pour les ondes transversales. Ces valeurs sont calibrées pour que l'image de la zone endommageable soit concordante avec celle de l'éprouvette. Comme attendues, les images de la superposition des images sur la figure IV.10 montrent clairement une zone de faiblesse qui correspond bien à la zone affaiblie de l'éprouvette (figure IV.8).

Il faut noter néanmoins l'existence des artefacts sur les bords des images qui influencent donc la qualité et créent également la distorsion des images. Les origines de ces artefacts d'après [OPI98] peuvent être le changement des conditions de mesure ou bien le mouvement et vibrations possibles des capteurs au cours de mesure. Dans le cadre de ce travail, nous essayons de minimiser au maximum ces risques en fixant les barrettes des capteurs par des bandeaux plastiques. Ainsi l'origine principale de ces artefacts, semble être (comme indiqué par [OPI98]), les trajectoires des ultrasons considérés dans notre travail comme étant rectilignes entre les émetteurs/récepteurs tandis qu'en pratique, dans un milieu inhomogène ces trajectoires sont courbés. Ce phénomène est d'autant plus important que le milieu traversé est hétérogène.

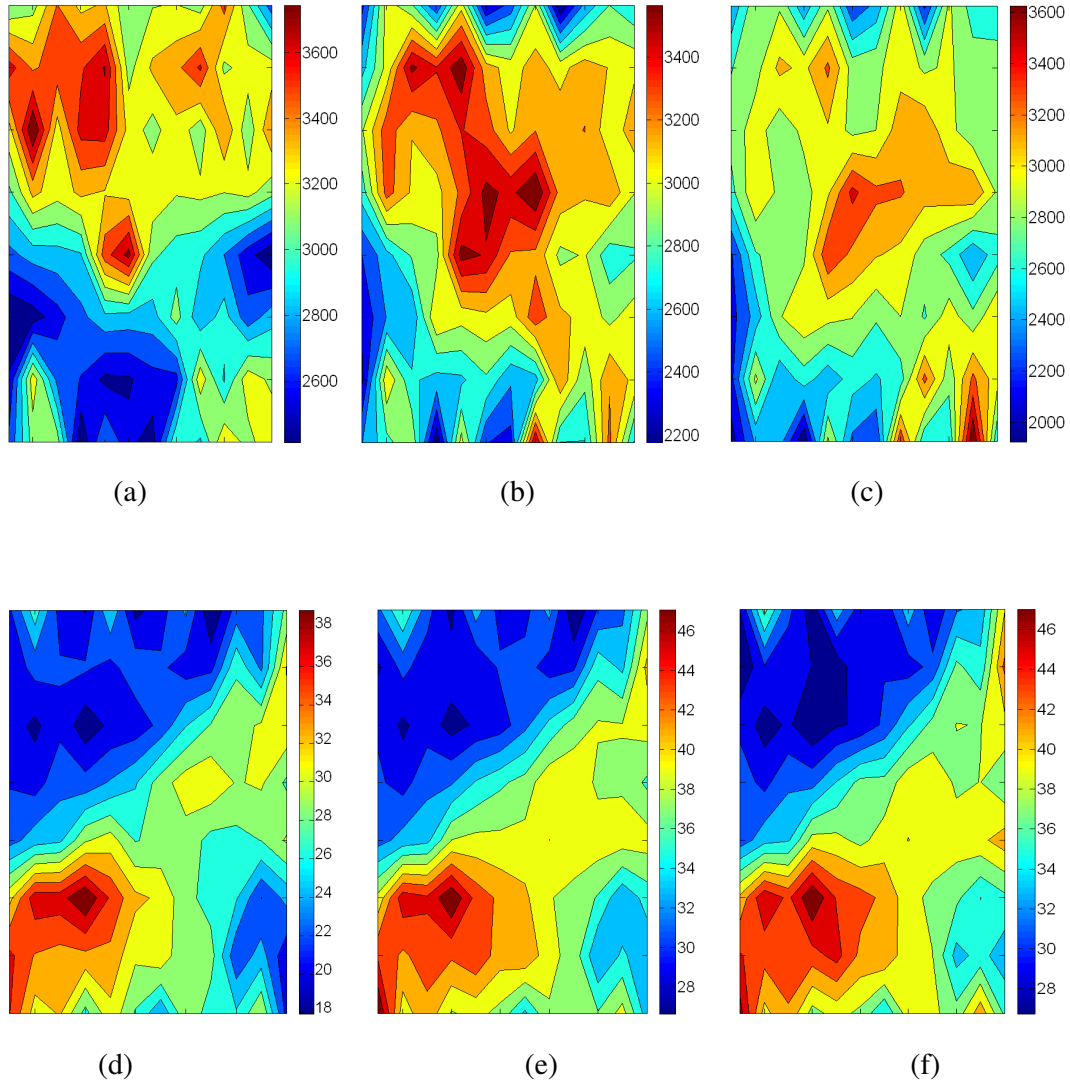


Figure IV.9 : Tomographie des vitesses (m/s) et des coefficients d'atténuation (dB/m) d'onde longitudinale V_P (a) et (d), d'onde transversale $V_{S,90}$ (b) et (e), d'onde transversale $V_{S,0}$ (c) et (f) de l'éprouvette initialement endommagée.

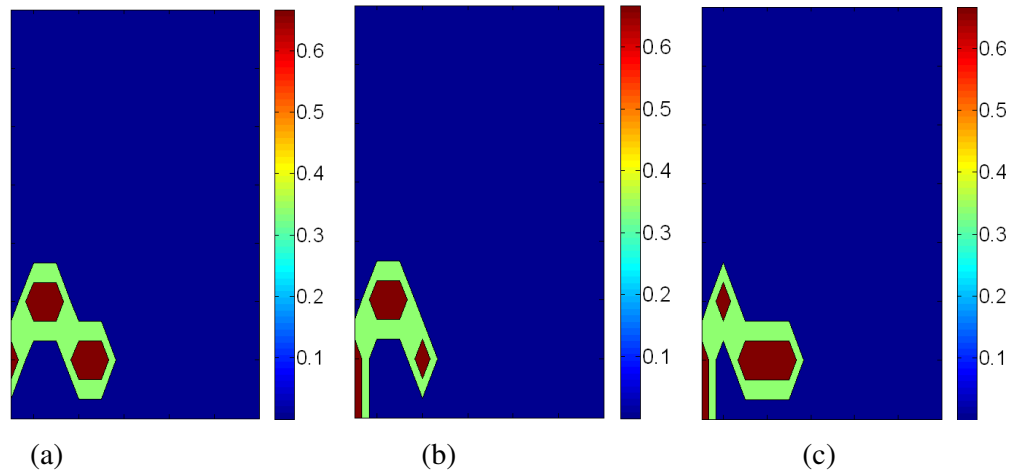


Figure IV.10 : Superposition des tomographies des vitesses (m/s) et des coefficients d'atténuation (dB/m) d'onde longitudinale V_p (a), d'onde transversale $V_{s,90}$ (b), d'onde transversale $V_{s,0}$ (c) de l'éprouvette initialement endommagée.

IV.4.2. Tomographie des éprouvettes d'un matériau cimentaire au cours de chargement

Une fois le système de mesure ultrasonore et l'algorithme de reconstruction de tomographie a été validée dans le test précédent, nous l'appliquons dans cette partie aux cas réels sur les éprouvettes de mortier saines. La mise en place du système de chargement et de la mesure continue des ondes ultrasonores est illustrée sur la figure IV.11. Notons que dans cette configuration, le nombre de rayons diminue due au fait qu'un seul pair de capteurs est utilisé pour la mesure suivant la direction verticale.

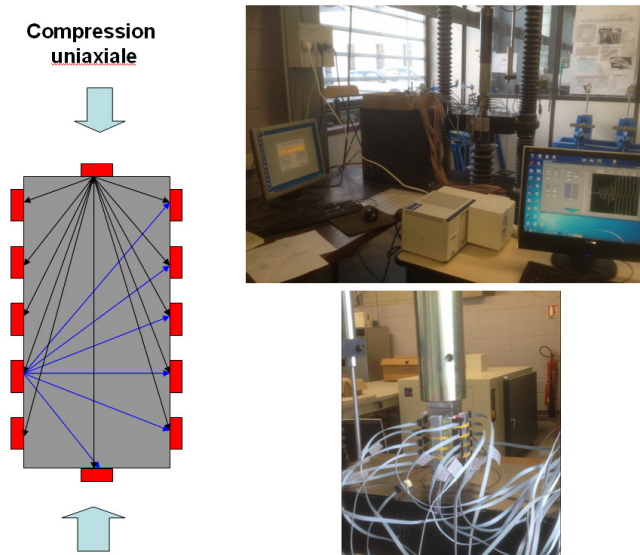


Figure IV.11 : Tomographie ultrasonique d'éprouvette sous la compression uniaxiale.

A titre d'exemple sur les figures (IV.12 à IV.18) sont montrées les tomographies des vitesses et d'atténuation à l'état initial ainsi que la variation relative des lenteurs et des coefficients d'atténuation à chaque palier de chargement par rapport à l'état initial d'une éprouvette typique.

En évitant les artefacts notamment au bord des éprouvettes, nous analysons et commentons d'avantage les résultats dans la partie centrale des éprouvettes.

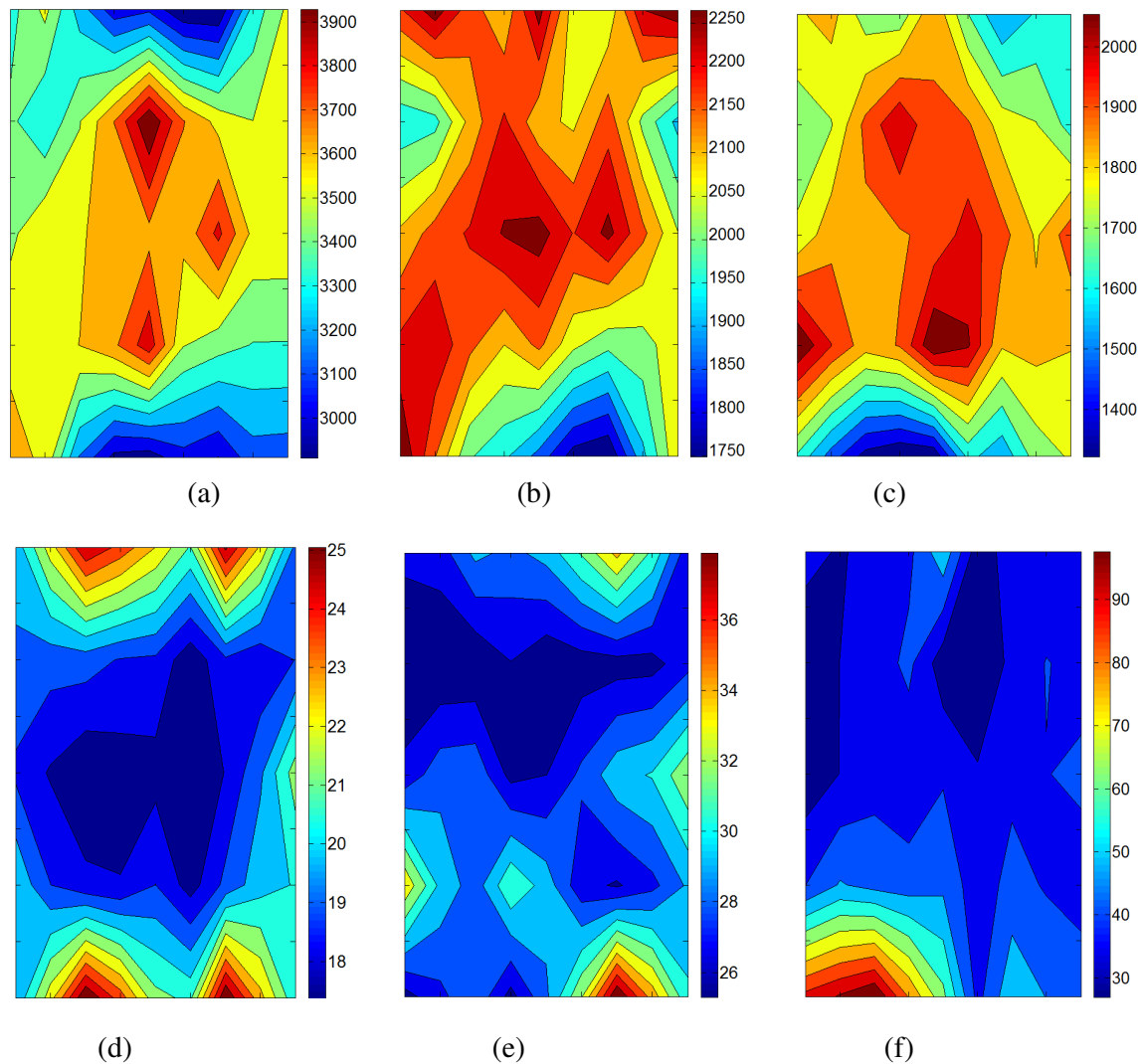


Figure IV.12 : Tomographie des vitesses (m/s) et des coefficients d'atténuation (dB/m) à l'état initial d'onde longitudinale V_P (a) et (d), d'onde transversale $V_{S,90}$ (b) et (e), d'onde transversale $V_{S,0}$ (c) et (f).

A l'état initial, on constate donc une distribution quasi uniforme des vitesses ou d'atténuation dans cette partie centrale de l'éprouvette. Comme un seul pair du capteur est disponible pour

la mesure suivant la direction verticale, on peut observer plus des artéfacts créés sur les deux frontières horizontales due au fait de la diminution des rayons des mesures qui intersectent les pixels dans ces zones (voir figure IV.12).

Pour les images à différents niveaux de contraintes au cours de chargement mécanique, on préfère reconstruire les images de la variation relative des paramètres (lenteurs et coefficients d'atténuation) par rapport l'état initial plutôt que celles des valeurs absolues. La tomographie de la variation relative reflète en fait plus correctement l'endommagement durant la sollicitation d'éprouvette (comme démontré dans les travaux de [CHO95] et [LEI09]). Sur les premières images de la variation de la lenteur d'ondes longitudinales (figure IV.13), une zone d'endommagement en haut à gauche semble à apparaître dès une valeur de contrainte $\sigma/\sigma_{\max} = 20\%$. Cette zone de faiblesse devient plus claire à partir d'une contrainte telle que $\sigma/\sigma_{\max} = 40\%$. Les valeurs absolues de la variation relative montrent une augmentation plus rapide dans l'intervalle de $\sigma/\sigma_{\max} = 20\%$ à $\sigma/\sigma_{\max} = 80\%$. Puis l'intensité de la variation continue à augmenter, avec une vitesse plus faible, jusqu'à la rupture d'éprouvette. Une extension de la zone d'endommagement est également constatée sur ces images lorsque la contrainte approche la contrainte de rupture.

Les résultats sur les figures (IV.14 et IV.15) montrent que les ondes transversales sont moins sensibles à ces variations que les ondes longitudinales. La zone endommagée dans les cas des ondes transversales ne peut être distinguée (parce que les artéfacts sont plus importants) qu'à partir d'une contrainte de $\sigma/\sigma_{\max} = 60\%$. En plus, l'augmentation de cette zone dans les niveaux de contraintes qui suivent est beaucoup moins claire par rapport au cas des ondes longitudinales.

Pour ce qui concerne la variation d'atténuation, on remarque une sensibilité quasi similaire quel que soit le type d'onde considéré (figures IV.16 à IV.18). La même zone de faiblesse que dans le cas de vitesses s'observe sur ces images qui devient plus claire à partir d'une contrainte de $\sigma/\sigma_{\max} = 40\%$. Les valeurs absolues de la variation relative du coefficient d'atténuation par rapport aux valeurs initiales, sont quasi analogues pour trois types d'ondes ultrasonores.

Finalement, sur la figure (IV.19) est présentée l'éprouvette à la fin d'essai. Une fracture est observée au cours d'essai en haut à gauche et s'étend jusqu'au coin en bas à droite en bonne concordance avec les images obtenues par la tomographie à ultrasons.

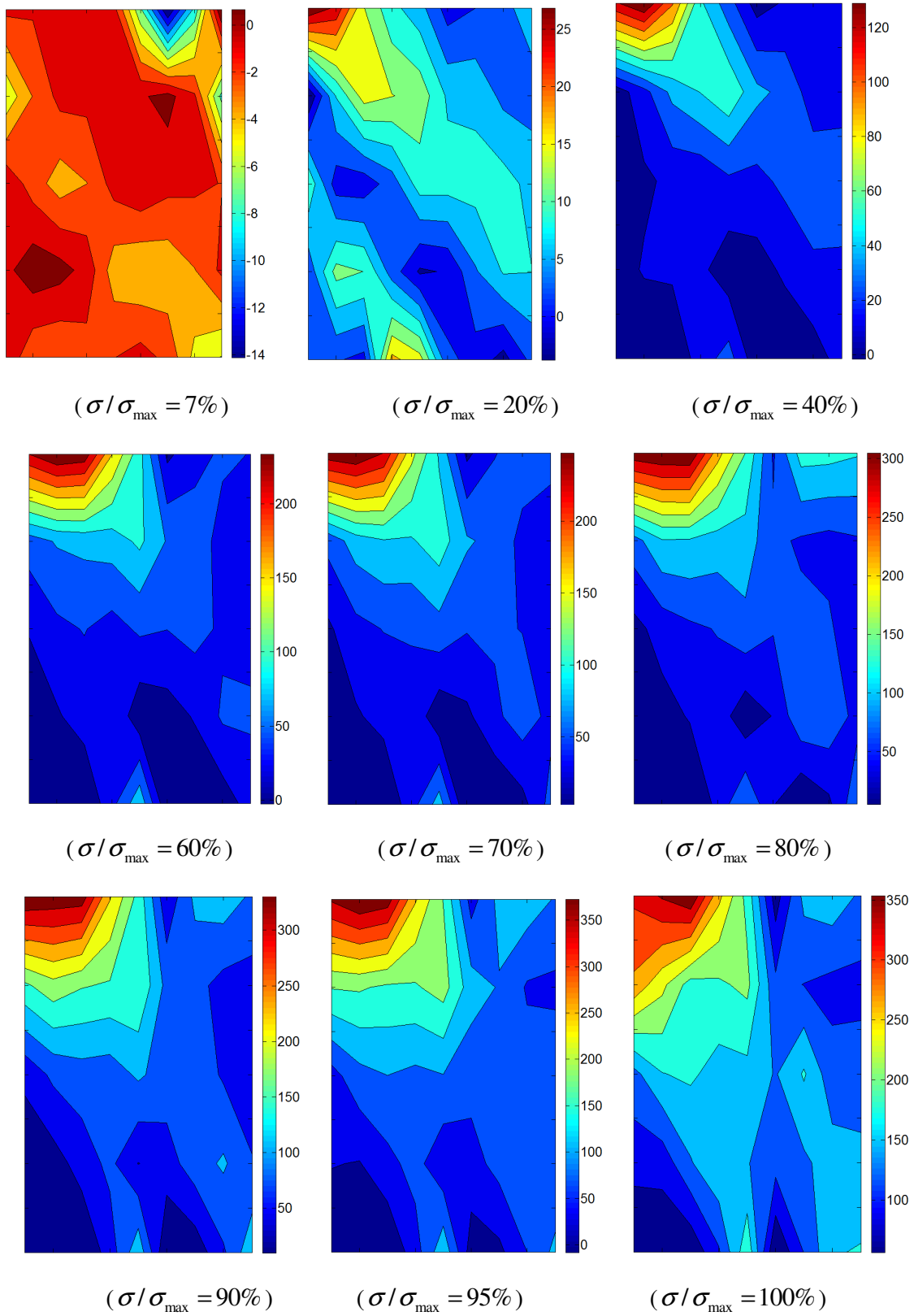


Figure IV.13 : Tomographie de la variation de lenteur ($s/\mu m$) d'onde longitudinale V_P à différents paliers de chargement.

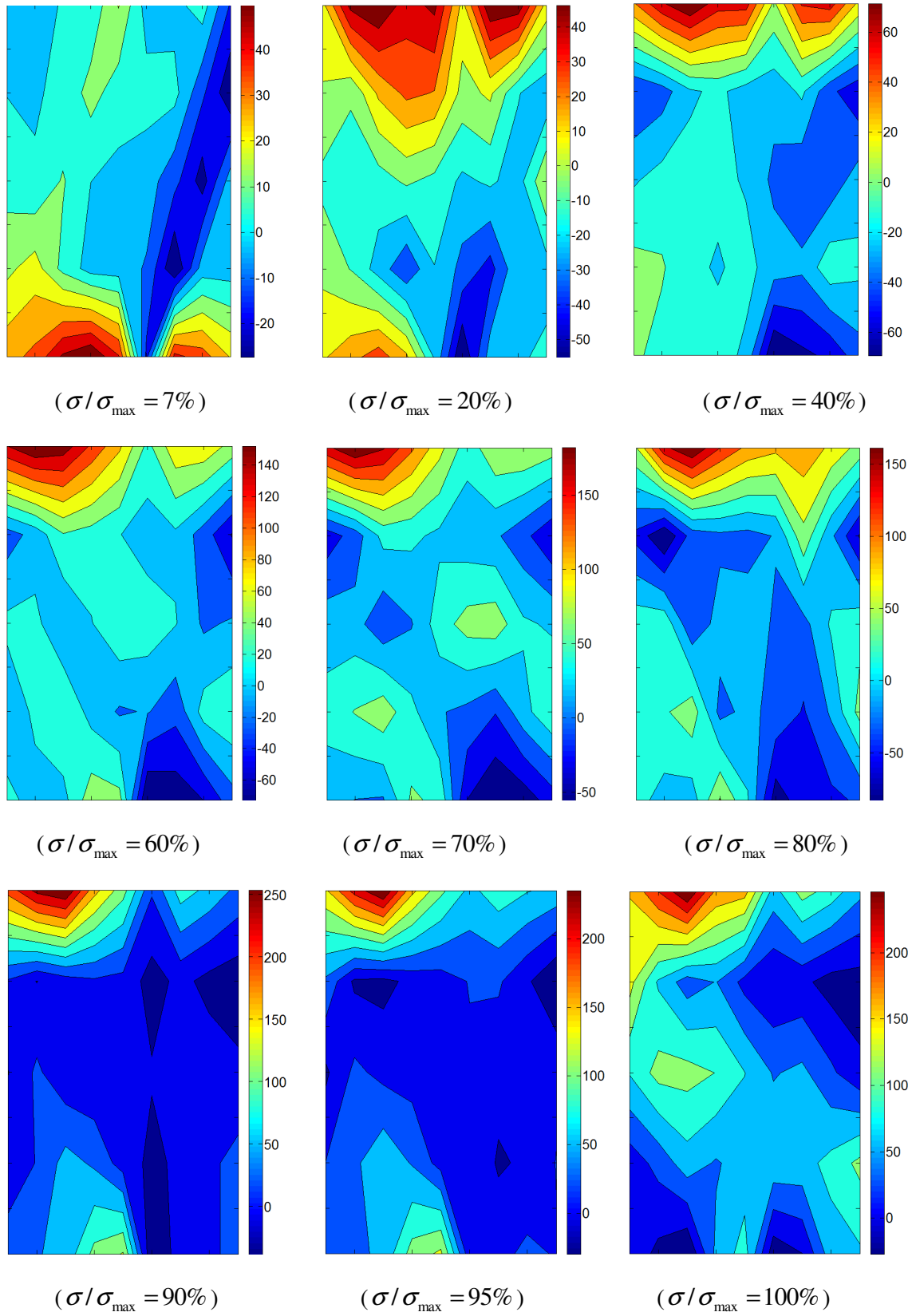


Figure IV.14 : Tomographie de la variation de lenteur ($s/\mu m$) d'onde transversale $V_{s,90}$ à différents paliers de chargement.

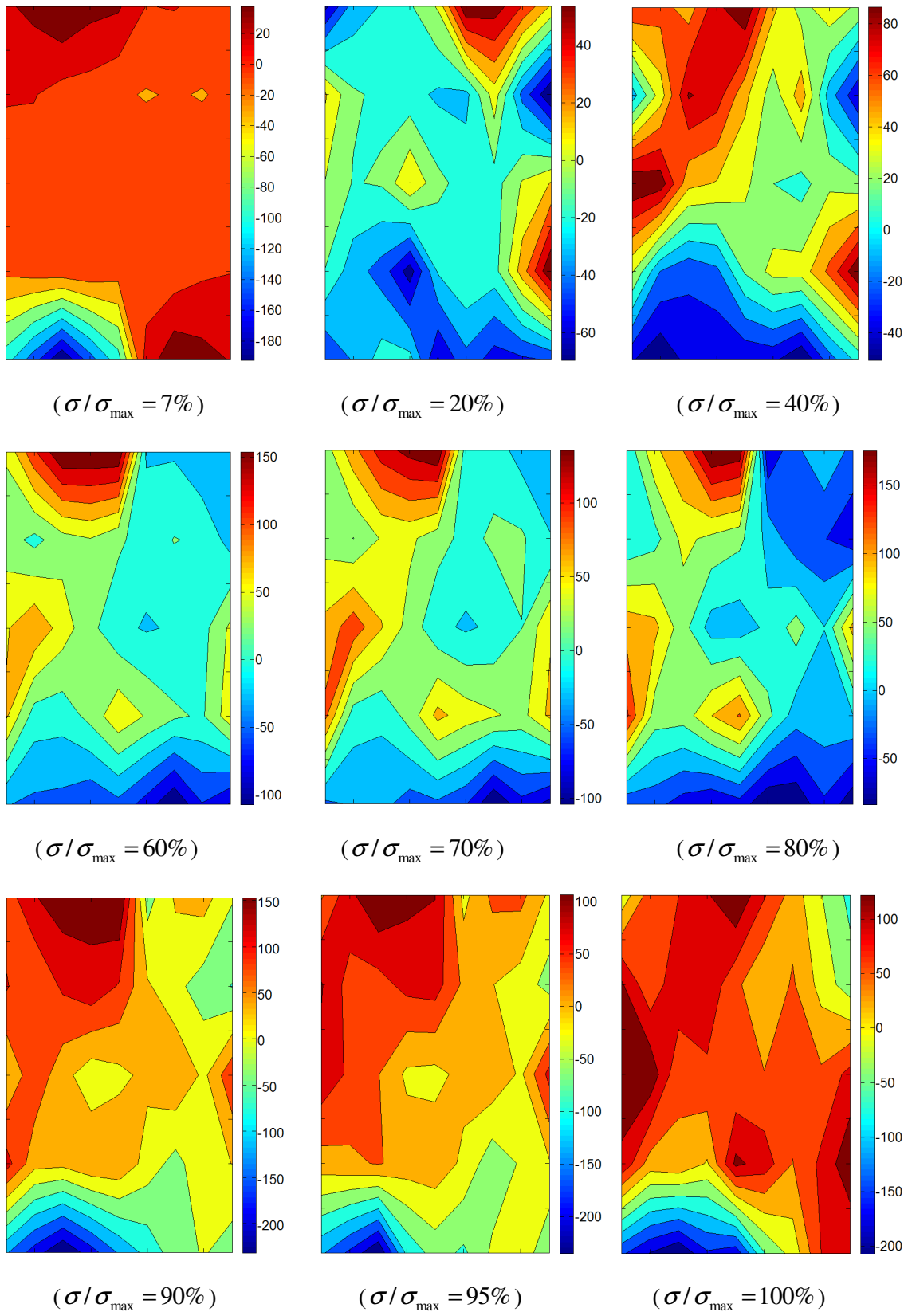


Figure IV.15 : Tomographie de la variation de lenteur ($s/\mu m$) d'onde transversale $V_{s,0}$ à différents paliers de chargement.

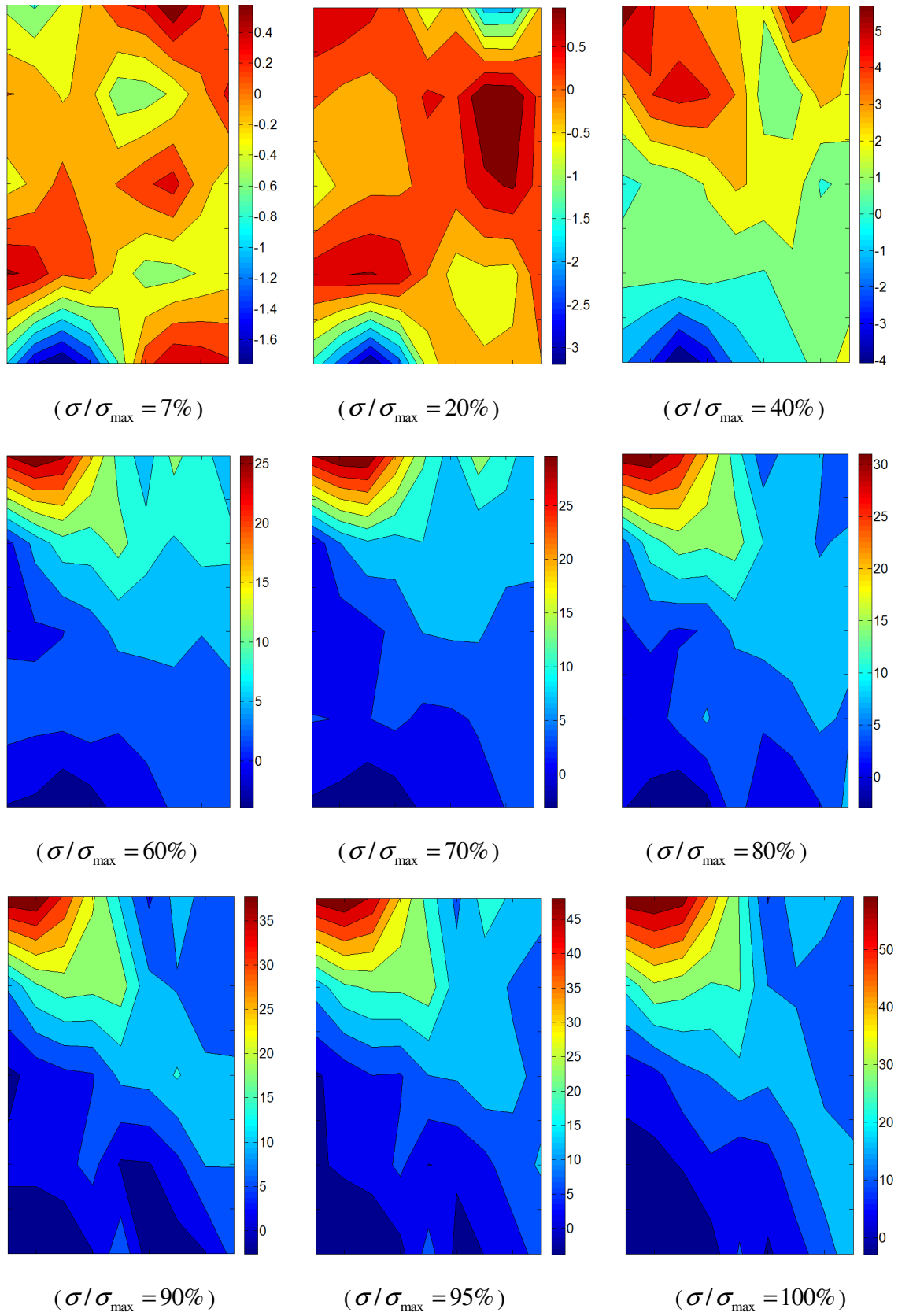


Figure IV.16 : Tomographie de la variation des coefficients d'atténuation (dB/m) d'onde transversale V_P à différents paliers de chargement.

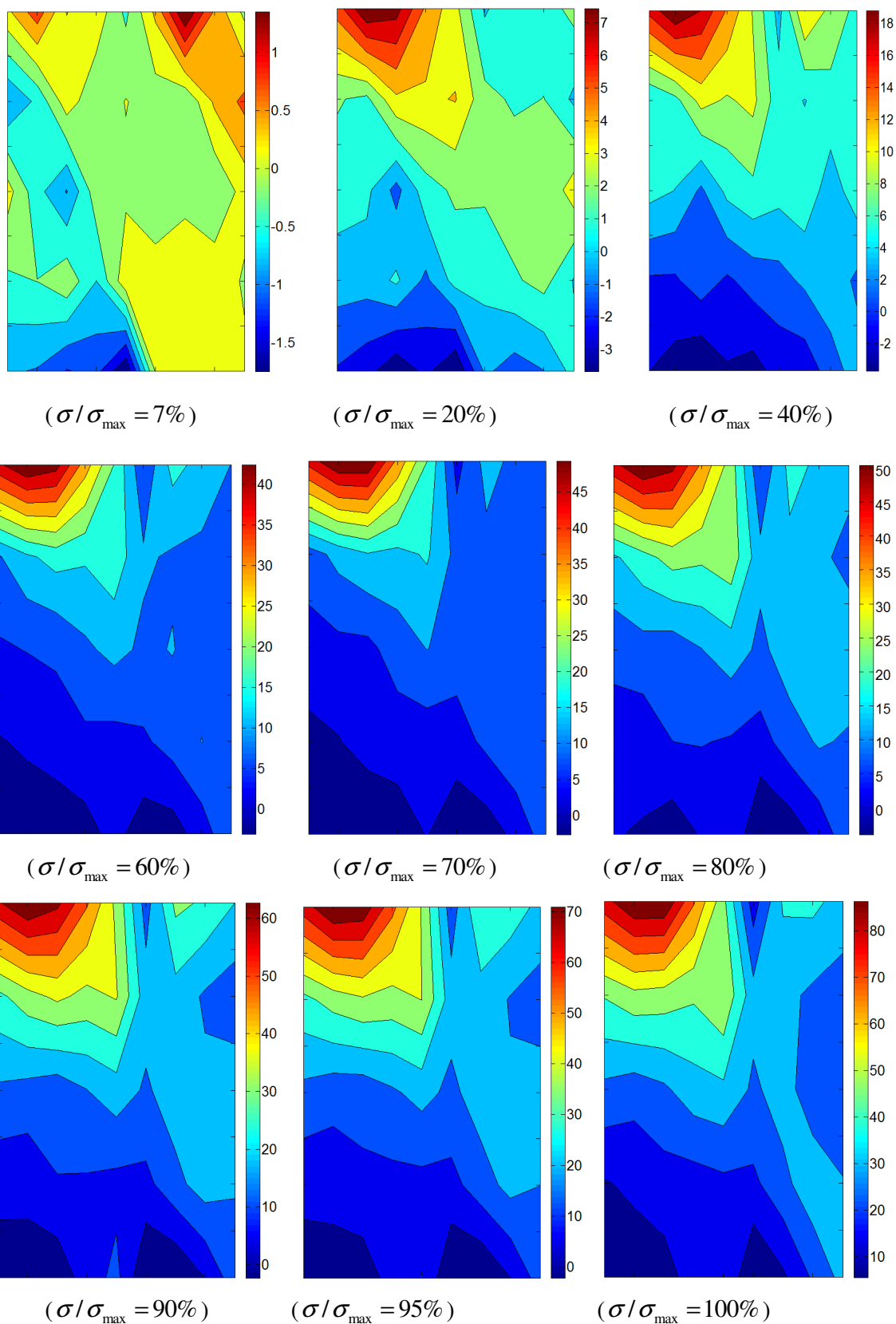


Figure IV.17 : Tomographie de la variation des coefficients d'atténuation (dB/m) d'onde transversale $V_{S,90}$ à différentes paliers de chargement.

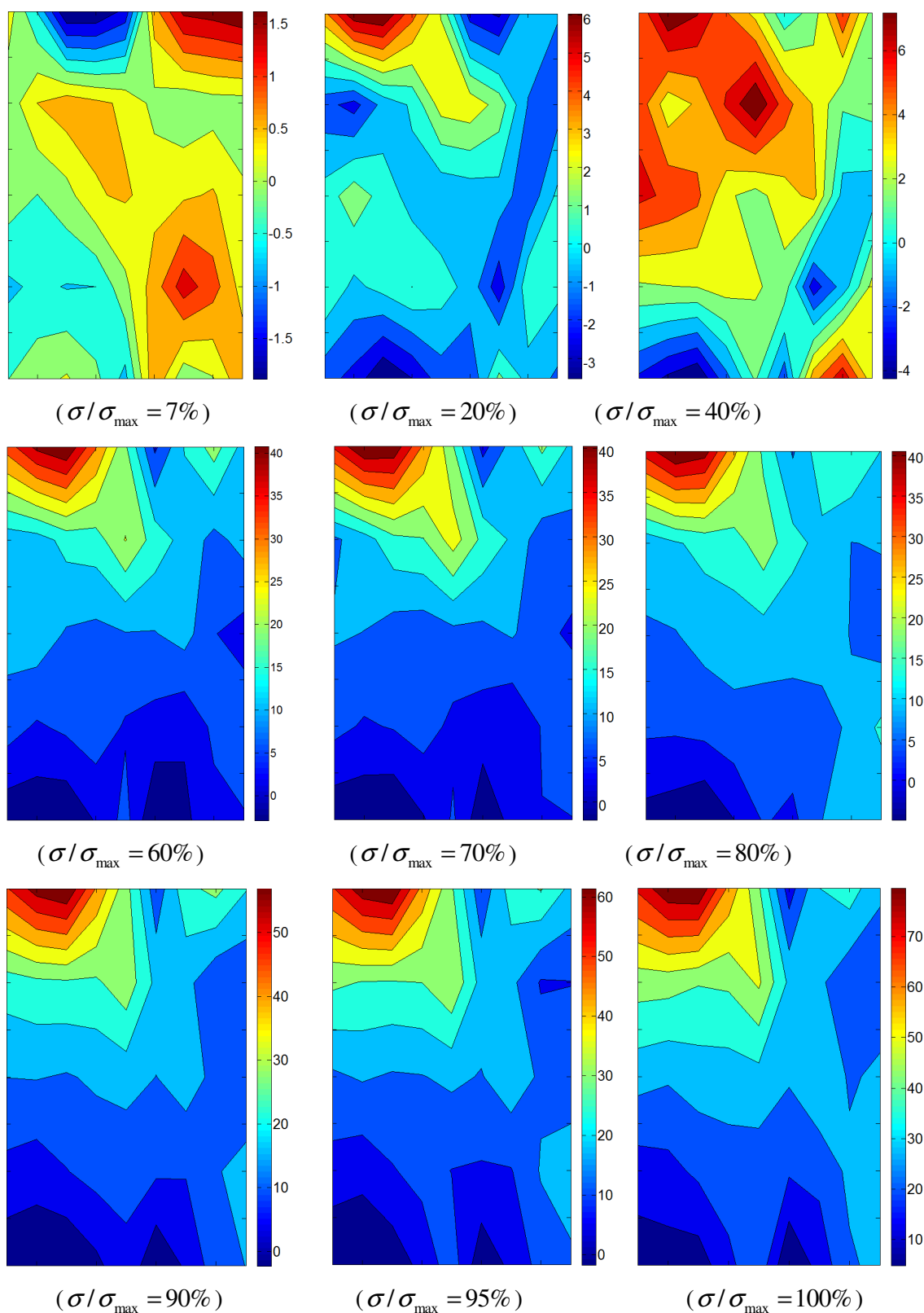


Figure IV.18 : Tomographie de la variation des coefficients d'atténuation (dB/m) d'onde transversale $V_{S,0}$ à différents paliers de chargement.



Figure IV.19 : L'état de rupture d'éprouvette à la fin d'essai.

IV.5. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté une application du système de mesures ultrasonores pour étudier l'endommagement progressif d'un mortier à travers les tomographies des vitesses et d'atténuation des ondes ultrasonores. Pour cela, les barrettes des capteurs ultrasons ont été mises en place et l'algorithme de reconstruction d'image par la méthode SART (Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique) a été adopté. La validation de l'approche est effectuée sur une éprouvette contenant un défaut avec géométrie connue, créé artificiellement. Puis l'application de la tomographie sur les éprouvettes saines des mortiers sous chargement, donne des résultats concordants avec l'observation visuelle de développement de macro fractures confirmant ainsi l'efficacité de cette technique pour la caractérisation d'endommagement progressif des géomatériaux au cours de chargement.

Néanmoins ces résultats restent qualitatifs et la résolution des images d'endommagement n'est pas suffisante pour pouvoir se prononcer avec certitude sur une image donnée de la présence ou pas d'une fissure quelconque. L'utilisation des ondes (P) pour la tomographie semble plus opportune que celles des ondes (S). Cela peut s'expliquer par les difficultés techniques à obtenir des signaux de bonne qualité qui compromet ensuite la précision des résultats. La tomographie relative en termes de coefficient d'atténuation semble plus stable et moins affectée par la qualité des signaux.

Chapitre V. Modélisation micromécanique de l'endommagement des matériaux à matrice cimentaire sous compression uniaxiale

V.1. Introduction

La modélisation de l'endommagement des géomatériaux, y compris les matériaux à matrice cimentaire, tant analytiques que numérique est largement étendue depuis quelques décennies. Plusieurs modèles ont été présentés dans la littérature dans le but de capter et d'illustrer différents aspects des mécanismes qui conduisent à un comportement non linéaire d'un échantillon sous contrainte accompagné avec (ou à cause de) une diminution des propriétés mécaniques du matériau. Néanmoins, un modèle complet permettant d'expliquer les réponses du matériau sous différents trajets de chargement est encore très loin de faire l'unanimité. Ceci est expliqué par des nombreuses difficultés liées aux mécanismes différents à tous les géomatériaux et à différentes échelles au sein d'un même matériau.

Généralement, les travaux de modélisation du comportement élasto-endommageable des géomatériaux peuvent être groupés en deux grandes approches : l'une dite phénoménologique vise à reproduire les résultats obtenus à partir des essais en utilisant les variables internes et l'autre, dite microscopique, vise à simuler les réponses du matériau en incluant les informations microstructurales observées et/ou mesurées à différentes échelles inférieures.

Dans la première approche, l'évolution de l'endommagement du matériau est décrite par l'évolution des variables internes qui sont contrôlés par des critères obtenues dans un cadre thermodynamique bien établi. Des travaux de ce type sont nombreux dans la littérature et on peut citer (sans être exhaustif) les travaux notamment de ([MAZ84], [MAZ89], [BOR02], [DES07], [CHA79]). Les variables internes peuvent être les scalaires ([MAZ86], [FAR98], [COM01], [MAR04]) pour simuler l'endommagement isotrope du matériau ou bien des tenseurs d'ordre deux ([KRA81], [DES07]) ou même d'ordre quatre [CHA79] pour tenir compte de l'aspect anisotrope d'endommagement. Ces variables internes, d'après ces auteurs, représentent la densité et l'orientation des microfissures qui évoluent au cours de chargement due à la propagation des fissures existantes. Malgré leurs faiblesses, notamment de la présence de plusieurs paramètres parfois sans signification physique claire, cette approche est

largement utilisée en ingénierie de part sa facilité de mise en œuvre et d'implantation dans des logiciels de calcul.

La deuxième approche basée sur le changement d'échelle permet de surmonter d'un certain nombre de défauts de l'approche précédente en liant la microstructure du matériau avec les paramètres représentant l'endommagement qui sont très souvent la densité des fissures et leurs orientations dans l'espace ([DEU02], [ZHU06], [PIC07], [MIH12]). En effet, dans cette approche, les propriétés effectives du matériau affaibli par les microfissures, sont déterminées via une technique d'homogénéisation (voir le premier chapitre pour sa définition). Le comportement macroscopique du matériau sous les sollicitations est contrôlé par l'état de fermeture/ouverture des fissures existantes et par leur évolution. Cette évolution du système de fissure est néanmoins méconnue à l'échelle de la microstructure et est en général modélisée de la même façon que celle utilisée par l'approche phénoménologique, à savoir, soit via des critères obtenus à partir des fonctions décrivant les forces thermodynamiques ([PIC07], [ZHU06]), soit des fonctions empiriques d'évolution et de croissance des microfissures issues par extension des principes de la mécanique linéaire de la rupture ou des observations en laboratoire ([REN98], [HOX00]).

D'après différents auteurs cités ci-dessus, le mécanisme principal de l'évolution des fissures dans les géomatériaux reste la propagation des fissures existantes. Néanmoins, la discussion dans les travaux de Van Mier [VAN97] montre que pour les matériaux à matrice cimentaire, le mécanisme de la nucléation de nouvelles fissures peut jouer un rôle essentiel. L'origine de ce mécanisme d'endommagement est l'existence des hétérogénéités (inclusions des granulats) dans la matrice cimentaire avec leurs contrastes mécaniques, hydriques et thermiques. A titre d'exemple sur la figure V.1 est illustré le phénomène de l'apparition des nouvelles fissures à partir d'un granulat immergé dans la pâte du ciment sous une compression axiale [VAN97]. En plus, en utilisant la solution analytique d'Eshelby, Mihai et Jefferson [MIH11] a confirmé le potentiel de ce type d'endommagement.

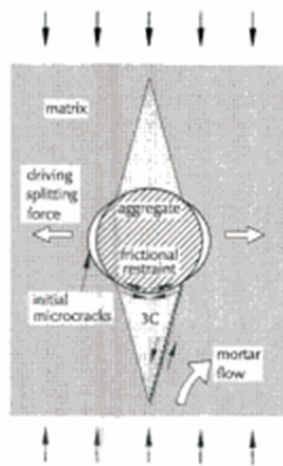


Figure V.1: La nucléation de nouvelles fissures à l'interface de l'inclusion et la matrice sous le chargement (D'après [VAN97]).

Dans le cadre de ce travail, notre choix de modélisation de l'endommagement porte sur l'approche micromécanique. L'idée de base est d'utiliser cette approche pour analyser les résultats expérimentaux obtenus et pour quantifier l'importance relative des différents mécanismes de l'endommagement des matériaux cimentaires. Plus précisément, les mécanismes de propagation des fissures existantes et de nucléation de nouvelles fissures sont pris en compte de manière phénoménologique en utilisant les fonctions statistiques pour présenter leur évolution au cours de chargement. L'approche micromécanique nous permettra alors d'évaluer l'évolution des propriétés mécaniques en cours de chargement et de déduire par comparaison avec les mesures par ultrasons la contribution de chacun des mécanismes. Pour cela, nous allons présenter dans un premier temps un modèle conceptuel reposant sur une brève description microstructurale des matériaux cimentaires. Ensuite, nous détaillerons les procédures d'homogénéisation en précisant les mécanismes d'endommagement en jeu. Les applications numériques et la validation expérimentale seront abordées par la suite. On finira ce chapitre avec quelques conclusions.

V.2. Description microstructurale et modèle conceptuel des matériaux à matrice cimentaire

Le matériau à matrice cimentaire (mortier, béton) est fortement hétérogène et composé de plusieurs phases comprenant la pâte de ciment durcie, les granulats, l'espace poreux et une zone auréole appelée la zone de transition d'interface (ITZ) autour de chaque granulat ([CON04], [ELA07], [PUN06], [PIC11]).

- La pâte de ciment elle-même hétérogène contient 50% à 70% du volume des C-S-H (Hydrates de Silicate de Calcium) et 25% à 27% du volume de Portlandite Ca(OH)_2 .
- Les granulats grâce à leurs rigidités importantes participent grandement à la résistance mécanique du matériau. Ils sont caractérisés par leur courbe granulométrique dont la forme morphologique peut avoir une influence essentielle aux propriétés du matériau final. Les granulats se divisent en deux groupes : fins et gros. Les fins consistent principalement des sables naturels avec la taille des particules de micromètre à quelques millimètres alors que la taille des gros granulats peut aller jusqu'au centimètre. Les granulats participent beaucoup moins à la réaction d'hydratation du ciment.
- La zone de transition d'interface, notée ITZ (Interfacial Transition Zone) est une zone de pâte hydratée particulière qui se forme lors de l'hydratation du ciment. Cette ITZ présente un rapport E/C plus élevé que le reste de la pâte, ce qui rend sa porosité plus élevée que celle de la pâte. Ainsi, du point de vue mécanique, l'ITZ présente une résistance plus faible que la pâte de ciment elle-même. L'épaisseur de l'ITZ augmente avec le diamètre du granulat et avec la quantité d'eau d'hydratation (c'est-à-dire avec le rapport E/C). Dans leur travail [SCR04] ont montré que l'épaisseur de ITZ est comparable avec la taille des particules de ciment et peut atteindre jusqu'à $100\mu\text{m}$. Néanmoins, il existe une zone adjacente d'environ $15-20\mu\text{m}$ d'agrégat où le changement est le plus remarquable.
- L'espace poreux se constitue par plusieurs types de pores qui sont présents aussi bien dans la matrice solide que dans les interfaces. Les pores se caractérisent par leur taille, leur forme, leur connectivité, leur volume et peuvent être classés en différentes catégories :
 - les pores d'air occlus proviennent essentiellement de l'air piégé lors du malaxage du matériau cimenté. Différentes techniques (damage, vibrations des coffrages, aiguilles vibrantes...) sont appliquées lors de la mise en œuvre, pour optimiser la compacité (serrage) et donc minimiser la quantité de bulles d'air. Cette catégorie de pores constitue 2% à 3% du volume total, avec des pores ayant une taille caractéristique millimétrique. Un matériau possédant une importante quantité d'air occlus aura également une meilleure durabilité face aux cycles de gel-dégel ;
 - les pores capillaires correspondent au volume qui n'a pas été rempli par les produits de l'hydratation. Ils forment un réseau interconnecté d'épaisseur micrométrique, rempli plus ou moins d'eau et ils sont les principaux responsables de la perméabilité du matériau. Ils jouent un rôle clé dans le processus de rupture du matériau;

- les pores de gel correspondent aux pores présents dans le gel C-S-H. Leur taille caractéristique est inférieure à quelques nanomètres et leur volume est négligeable devant le volume des autres pores. Ils sont par ailleurs isolés et ne semblent pas influencer la résistance du matériau. Même à une humidité ambiante très basse, l'eau demeure dans les pores de gel ;
- la microfissuration du matériau provient de divers phénomènes. En plus des microfissures causées par la contraction dite *Le Chatelier* (retrait de la pâte), lesquelles sont résorbées dans les pores capillaires, on peut rajouter celles provoquées par les réactions chimiques non souhaitées ou encore par le processus de séchage du matériau cimenté.

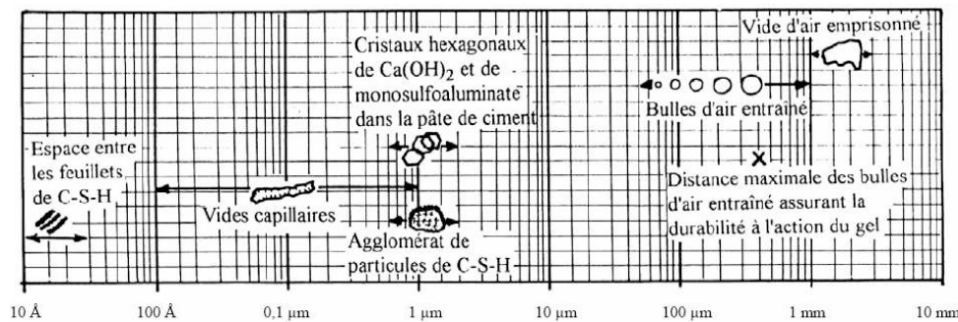


Figure V.2 : Les différentes classes de pores dans la pâte de ciment durcie en fonction de leur taille (D'après [MEH93]).

La brève description ci-dessus de la microstructure des matériaux à matrice cimentaire constitue une base nécessaire pour l'établissement d'un modèle conceptuel, l'objet d'une procédure de la modélisation micromécanique. Dans leur contribution, Constantinides et Ulm [CON04] propose un modèle conceptuel multi échelle du béton, constitué de quatre niveaux:

- Le premier niveau présente la plus petite échelle de $10^{-8}m$ à $10^{-6}m$ où les propriétés de la matrice d'hydratation à partir des différents types de C-S-H peuvent être connues.
- Le deuxième niveau présente une échelle de $10^{-4}m$ à $10^{-3}m$ où les propriétés de la pâte de ciment peuvent être identifiées à partir des propriétés de la matrice d'hydratation, des inclusions de clinker et des pores capillaires (Constantinides et Ulm [CON04]).
- Le troisième niveau (de $10^{-3}m$ à $10^{-1}m$) représente le mortier à l'échelle millimétrique à centimétrique, dont les propriétés homogénéisées peuvent être obtenues à partir des propriétés de la pâte de ciment et des inclusions de sable avec la prise en compte de la zone de transition d'interface ITZ.

- Le quatrième niveau (de $10^{-1}m$ à 10^1m) correspond à l'échelle de l'éprouvette de béton au laboratoire, voire de la structure in situ. Les propriétés macroscopiques de béton à cette échelle sont déterminées à partir des propriétés du mortier et des gros granulats en tenant en compte leur ITZ.

L'objectif de ce travail est de caractériser les propriétés effectives au cours de chargement des matériaux à matrice cimentaire avec la mise en évidence de l'influence des différents mécanismes d'endommagement. Ainsi, par souci de simplicité, le modèle conceptuel adopté comprend deux échelles d'hétérogénéité du matériau (figure V.3): la première échelle est celle de la matrice éventuellement fissurée dans laquelle sont plongés dans la deuxième échelle les granulats. Ce modèle correspond au troisième niveau de la structure présentée dans le travail de [CON04] si on se limitait à l'étude des mortiers où la matrice représenterait la pâte de ciment. Par contre, si le matériau considéré était du béton, dans ce modèle à deux échelles, la matrice désignerait le mortier et on se situe alors au quatrième niveau de la structure présentée par [CON04].

Dans ce modèle à deux échelles, la propagation des fissures se fait principalement au premier niveau et les fissures seront représentées par des vides ayant des formes aplaties (type penny-shaped) et de distribution initiale isotrope. Dans la deuxième échelle, le rôle des inclusions de granulats est mis en évidence, tandis que la zone de transition d'interface n'est pas prise en compte. En effet, cette zone contenant une porosité plus importante par rapport à la matrice est connue comme une zone critique où se manifestent différents mécanismes d'endommagement. Il s'agit la propagation des microfissures préexistantes dans cette zone vers la matrice ou bien la nucléation des nouvelles fissures à l'interface avec les inclusions due au grand contraste mécanique. Donc pour tenir compte ces mécanismes en négligeant la présentation explicite de la zone ITZ dans le modèle, nous avons confondu dans un premier temps la propagation des microfissures d'ITZ avec celle de la matrice cimentaire. Dans un deuxième temps nous considérons les inclusions des granulats qui sont initialement en contact parfait avec la matrice. Ces contacts peuvent néanmoins s'endommager par la nucléation des microfissures dans leur interface conduisant ainsi à des inclusions décohésives. Signalons que dans notre modèle les inclusions des granulats du sable prennent une forme sphérique simple.

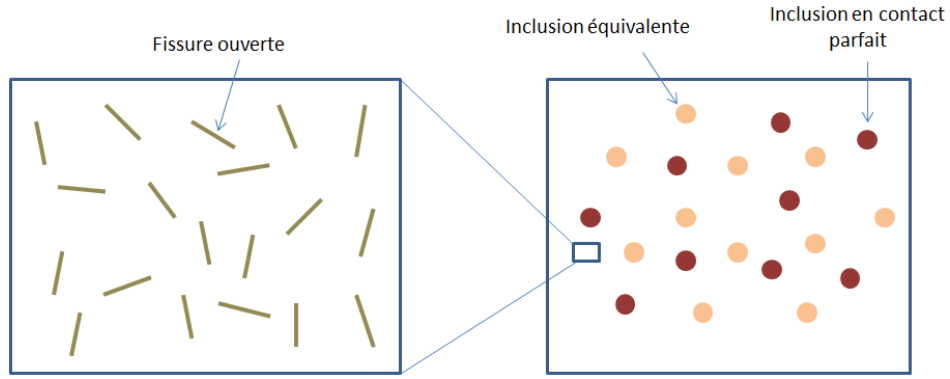


Figure V.3 : Modèle conceptuel à deux échelles du matériau à matrice cimentaire.

V.3. Deux étapes d'homogénéisation

Dans cette partie nous détaillons les deux étapes d'homogénéisation correspondant au modèle à deux échelles du matériau à matrice cimentaire. Dans chaque étape d'homogénéisation, le mécanisme d'endommagement correspondant, qui expliquerait l'évolution des propriétés mécaniques sous chargement, sera détaillé.

Première étape d'homogénéisation

Dans la première étape d'homogénéisation, on détermine les propriétés de la matrice fissurée à partir de la matrice cimentaire initial et d'un système des fissures préexistantes représentant l'espace poreux. Par ailleurs, au cours de chargement, sous une contrainte de compression, des nouvelles familles de fissures peuvent être créées due à la propagation des fissures préexistant. En utilisant le schéma d'homogénéisation de Mori Tanaka [MOR73], nous obtenons le tenseur élastique de la matrice fissurée :

$$C_{mf}^{MT} = C_{mc} : \left[I + \frac{4}{3} \pi \sum_{i=1}^N d_i^{ini} A_i^{ini} + \frac{4}{3} \pi \sum_{j=1}^M d_j^{nou} A_j^{nou} \right]^{-1} ; \quad (V.1)$$

Dans l'équation (V.1) C_{mc} présente le tenseur de rigidité de la matrice cimentaire; d_i^{ini} et A_i^{ini} (d_j^{nou} et A_j^{nou}) sont la densité et le tenseur de localisation des fissures préexistantes (respectivement des nouvelles fissures). En supposant les fissures préexistantes, ou les nouvelles fissures, ayant la même forme circulaire, la somme de toutes les familles de fissures est remplacée par une formule générale d'intégration dans l'espace:

$$C_{mf}^{MT} = C_{mc} : \left[I + \frac{4}{3} \pi d_0^{ini} \{A^{ini}\} + \frac{4}{3} \pi d_0^{nou} \{A^{nou}\} \right]^{-1} ; \quad (V.2)$$

où

$$\{A^{ini}\} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi A^{ini}(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta d\theta d\varphi; \quad (V.3)$$

$$\{A^{nou}\} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi W(\theta, \varphi) \cdot A^{nou}(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta d\theta d\varphi; \quad (V.4)$$

En effet, nous avons considéré dans l'équation (V.3) une distribution isotrope des fissures préexistantes alors que dans l'équation (V.4) une fonction statistique de distribution d'orientation (ODF) W qui désigne la densité de distribution dans l'espace des fissures ([DO 08], [GIR 07]) est utilisée pour tenir compte la distribution orientée des nouvelles fissures. Dans le contexte d'une matrice initialement isotrope, avec une distribution de nouvelles fissures ayant une symétrie de révolution, hypothèse adoptée ici pour les fissures induites par la contrainte, la distribution spatiale des nouvelles fissures est fonction d'un seul angle θ entre le vecteur normal de fissure et l'axe de symétrie Ox_3 (figure V.4b). Ici nous utilisons la fonction de distribution suivante :

$$W(\theta) = \frac{a_1}{((\cos \theta)^2 + a_1 (\sin \theta)^2)^{3/2}}; \quad (V.5)$$

Sur la figure V.4a, $W(\theta)=1$ (si le paramètre $a_1 = 1$) représente une distribution uniforme des fissures. Plus le paramètre a_1 est faible plus la densité de la fissuration est importante autour de l'angle $\theta = \pi/2$ qui correspond à l'angle d'orientation des fissures quasi-verticales. De telles valeurs faibles peuvent alors être utilisées pour décrire les distributions de fissures induites telles qu'observées en cours des essais de compression uniaxiale [SAY95].

En outre, pour modéliser l'évolution de la densité des nouvelles fissures nous utilisons dans ce travail la manière phénoménologique en supposant que la densité des nouvelles fissures varie en fonction de la contrainte macroscopique σ , dès que celle-ci dépasse une contrainte limite σ_{lim1} . En notant par d_o^{ini} la densité des fissures à l'état initial, l'expression d'évolution de la densité des nouvelles fissures est adoptée comme:

$$d_0^{nou} = \begin{cases} 0 & si: \sigma < \sigma_{lim1}; \\ d_0^{ini} \cdot a_2 \cdot \left(\frac{\sigma - \sigma_{lim1}}{\sigma_{pic}} \right)^2 & si \quad \sigma \geq \sigma_{lim1}; \end{cases} \quad (V.6)$$

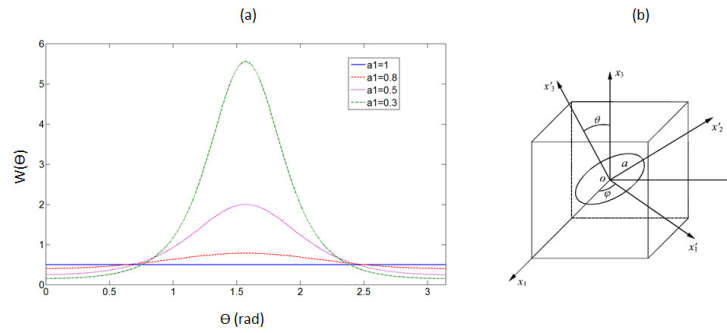


Figure V.4 : Fonction de distribution d'orientation (a) ; fissure orientée dans la matrice cimentaire (b).

Deuxième étape d'homogénéisation

La deuxième phase de l'approche micromécanique consiste à estimer les propriétés macroscopiques du matériau en ajoutant dans la matrice éventuellement fissurée obtenue après la première étape d'homogénéisation, les granulats. En outre, à cette échelle un autre type d'endommagement peut se développer due à la décohésion de l'interface des granulats avec la matrice. Ce phénomène physique souvent constaté ([VAN97], [JAN10]) est expliqué par la concentration locale des contraintes à l'interface des matériaux avec un contraste des propriétés mécaniques important. Cela conduit plus souvent à une décohésion autour de l'interface latérale comme illustrée sur figure V.5 (voir également [MIH11] pour plus de discussions).

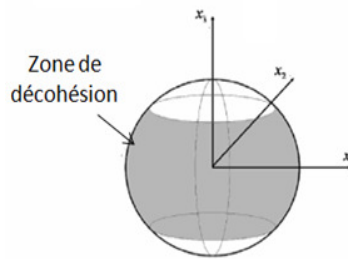


Figure V.5 : Zone de décohésion latérale de l'inclusion sous la compression.

Dans le schéma d'homogénéisation que nous adoptons, ces inclusions avec des interfaces imparfaites sont remplacées par celles mécaniquement équivalentes parfaitement adhérents avec la pâte de ciment mais avec des propriétés anisotropes. Le schéma de Mori Tanaka s'écrit à cette échelle:

$$C_{\text{hom}}^{MT} = C_{mf} + (f_g - f_{eq})(C_g - C_{mf}) : A_g^{MT} + f_{eq}(C_{eq} - C_{mf}) : A_{eq}^{MT}; \quad (\text{V.7})$$

Dans l'équation (V.7) les tenseurs de localisation des granulats en contact parfait et des inclusions équivalents A_i^{MT} ($i = g, eq$) sont calculés à partir du tenseur de rigidité de la matrice fissurée C_{mf} . On remarque qu'avec l'hypothèse de distribution à symétrie de révolution des fissures circulaires dans la matrice cimentaire isotrope, le tenseur de rigidité de la matrice fissurée (obtenu de la première étape) présente une anisotropie de type isotrope transverse.

$$\begin{aligned} A_i^{MT} &= A_i : \left[(1 - f_g)I + (f_g - f_{eq})A_g + f_{eq}A_{eq} \right]^{-1}; \quad (i = g, eq); \\ A_i &= \left[I + P(C_{mf}) : (C_i - C_{mf}) \right]^{-1}; \end{aligned} \quad (\text{V.8})$$

D'ailleurs d'après [SUN03], pour des inclusions latéralement dé-cohésive on peut déterminer le tenseur de rigidité équivalent C_{eq} à partir de celui isotrope C_{pc} des inclusions parfaitement adhérentes à l'état initial. Dans ce cas la seule composante non nulle de C_{eq} est le module d'Young dans la direction où la cohésion est encore préservé (direction verticale dans notre cas de la figure V.5) qui est égal au celui du tenseur de rigidité original.

Le développement de ce type d'endommagement décohésif est modélisé par une augmentation de la fraction volumique des inclusions équivalentes. De façon similaire avec le cas de propagation de fissure, une fonction statistique d'évolution de la densité de ce type d'inclusion est proposée:

$$f_{eq} = \begin{cases} 0; & si : \sigma < \sigma_{\text{lim}2}; \\ f_g \cdot \left(\frac{\sigma - \sigma_{\text{lim}2}}{a_3 \cdot \sigma_{pic} - \sigma_{\text{lim}2}} \right)^2 & si : \sigma \geq \sigma_{\text{lim}2}; \end{cases} \quad (\text{V.9})$$

où $\sigma_{\text{lim}2}$ présente la contrainte limite au-delà la décohésion commence à se développer.

V.4. Applications numériques et validation expérimentale

Nous présentons dans cette partie quelques résultats numériques dans le but de mettre en lumière l'influence des mécanismes d'endommagement décrits dans le paragraphe précédent sur les propriétés mécaniques du matériau et donc sur les vitesses ultrasonores. Notons que dans le cas du matériau anisotrope transverse, les relations suivantes entre les propriétés mécaniques du matériau (dans le repère principal) et les vitesses des ondes sont valables [HOR98]:

$$\begin{aligned}
C_{\text{hom},1111} &= \rho.V_{11}^2 = \rho.V_{P,0}^2; & C_{\text{hom},3333} &= \rho.V_{33}^2 = \rho.V_{P,90}^2; \\
C_{\text{hom},1313} &= \rho.V_{13}^2 = \rho.V_{SV,0}^2; & C_{\text{hom},1212} &= \rho.V_{12}^2 = \rho.V_{SH,0}^2; \\
C_{\text{hom},1133} &= (C_{\text{hom},1111} + C_{\text{hom},1313} - 2\rho V_{P,45}^2)^{1/2} \times (C_{\text{hom},3333} \\
&\quad + C_{\text{hom},1313} - 2\rho V_{P,45}^2)^{1/2} - C_{\text{hom},1313};
\end{aligned} \tag{V.10}$$

De la même façon les paramètres adimensionnels d'anisotropie de Thomsen s'écrivent en fonction des propriétés effectives comme:

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{hom},3333} - C_{\text{hom},1111}}{2C_{\text{hom},1111}}; \quad \gamma = \frac{C_{\text{hom},1313} - C_{\text{hom},1212}}{2C_{\text{hom},1212}}; \tag{V.11}$$

Quelques résultats de l'étude paramétrique sur les paramètres du modèle sont illustrés sur les figures (V.6 à V.9). Il s'agit de l'évolution des vitesses ultrasonores et des paramètres de Thomsen par rapport aux paramètres du modèle a_1 , a_2 , a_3 . Pour cela les valeurs suivantes sont choisies comme données d'entrer (issues de nos mesures ou de la littérature):

- contrainte maximale à la rupture : $\sigma_{\text{pic}}=30(\text{MPa})$,
- la fraction volumique des inclusions du granulat : $f_g=40\%$,
- les modules de compressibilité et de cisaillement du minéraux de granulats (quartz) : $k_g=37.8(\text{GPa})$, $\mu_g=44.3(\text{GPa})$,
- la densité initiale : $d_o^{\text{ini}} = 0.3$,
- les modules élastiques de la matrice cimentaire : $E_{mc} = 30(\text{GPa})$, $\nu_{mc} = 0.27$. Ces paramètres sont extraits à partir des travaux de [HER06].

Dans un premier temps, le mécanisme d'endommagement dû à la propagation des fissures est mis en évidence et illustré sur les figures (V.6 et V.7). Pour ces simulations, nous avons choisi $\sigma_{\text{lim1}} = 0.6\sigma_{\text{pic}}$ alors que $\sigma_{\text{lim2}} > \sigma_{\text{pic}}$ (ce qui signifie que le mécanisme de la décohésion n'est pas pris en compte dans ces premières simulations). On constate une diminution des toutes les vitesses longitudinales et transversales à partir de la contrainte $\sigma = \sigma_{\text{lim1}}$. Sur la figure (V.6) les résultats montrent une décroissance plus importante des vitesses lorsque le paramètre a_2 augmente. La valeur plus grande de ce dernier paramètre représente en effet une augmentation plus rapide de la densité des nouvelles fissures (figure V.6g) créées par la propagation des fissures préexistantes. Néanmoins, l'évolution des vitesses respectivement selon la direction verticale et horizontale est différente mettant en évidence une anisotropie induite des vitesses et donc des propriétés effectives du matériau sous la compression

uniaxiale. Le degré d'anisotropie induite est quantifié sur le figure (V.6e,f) à travers les coefficients de Thomsen.

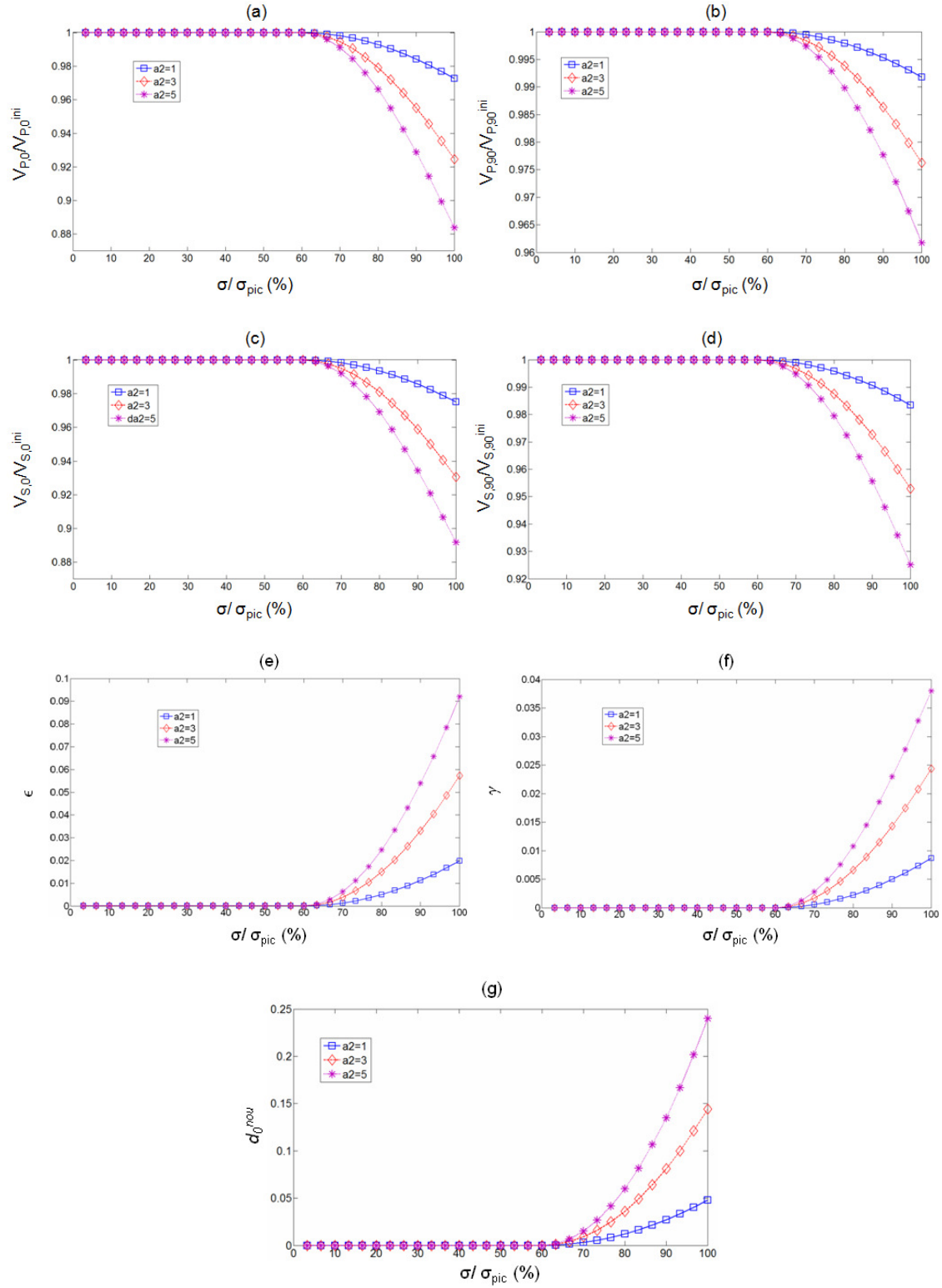


Figure V.6 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores et des coefficients de Thomsen en fonction de contrainte (cas d'étude paramétrique de a_2 avec $a_1=0.1$).

Cette anisotropie est expliquée par la distribution des fissures induites préférentiellement orientées dans la direction parallèle à l'axe verticale (la direction de la contrainte maximale en compression) ce qui conduit à une diminution plus importante des vitesses dans la direction horizontale.

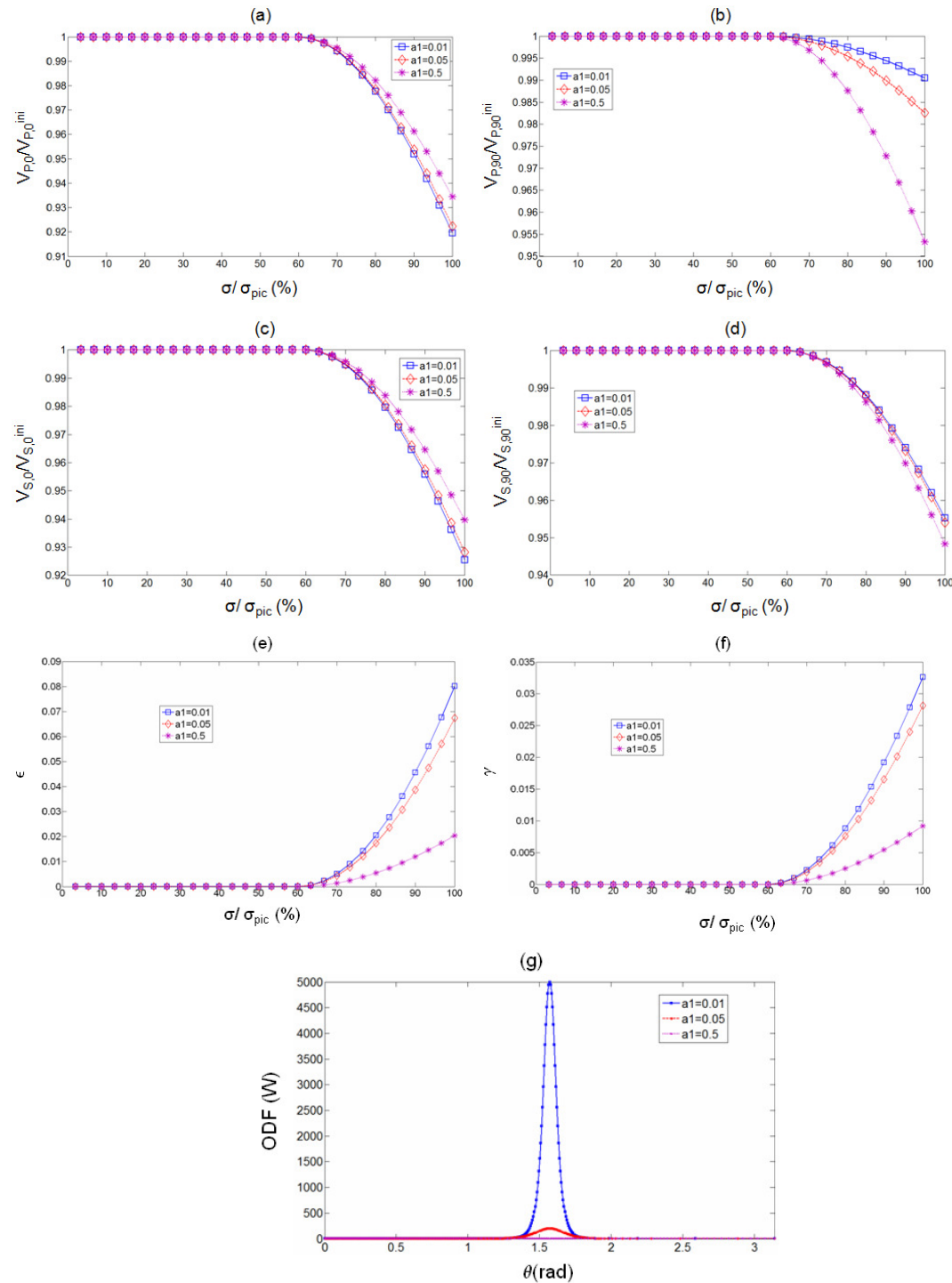


Figure V.7 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores et des coefficients de Thomsen en fonction de contrainte (cas d'étude paramétrique de a_1 avec $a_2=3$).

Du point de vue mathématique, cette distribution orientée des nouvelles fissures est tenue compte dans le modèle en utilisant la fonction ODF et caractérisée par le paramètre a_1 . Comme attendu, nous observons sur la figure V.7, que le degré d'anisotropie augmente lorsque le paramètre a_1 diminue

Dans un deuxième temps, nous nous intéressons à l'impact de la décohésion des inclusions granulat sur les vitesses des ultrasons et donc sur les propriétés effectives du matériau. Dans les simulations qui suivent, on fixe $\sigma_{lim2} = 0.6\sigma_{pic}$ (en activant ainsi le mécanisme de décohésion) et on néglige le mécanisme de la propagation de fissures en choisissant $\sigma_{lim1} > \sigma_{pic}$. Les résultats et les tendances sont dans ce cas similaires avec ceux de l'étude précédente où on observe la chute des vitesses ultrasonores intervenant à partir de la contrainte $\sigma = \sigma_{lim2}$ (figure V.8). Les résultats montrent également une anisotropie induite des vitesses lorsque la contrainte dépasse la contrainte limite σ_{lim2} . Cette anisotropie est la conséquence du mécanisme de décohésion des inclusions (modélisée comme indiqué précédemment par les inclusions équivalentes aux propriétés mécaniques anisotropes). L'anisotropie observées dans ces simulations est maximale lorsque le paramètre a_3 est égal à 1 qui indiquant une décohésion de toutes les inclusions à la contrainte σ_{pic} . Cependant, par rapport au cas précédent, la diminution de la vitesse longitudinale suivant la direction verticale $V_{P,90}$ est plus faible. Cette diminution est négligeable même dans le cas où toutes les inclusions sont décohésives (figure V.8b). En plus, les vitesses transversales suivant les deux directions horizontale ($V_{S,0}$) et verticale ($V_{S,90}$) sont similaires dans ce type d'endommagement. Ainsi le coefficient de Thomsen $\gamma = 0$ est obtenu dans ces études comme illustré sur la figure (V.8f).

Finalement, sur la figure (V.9) nous présentons les résultats de l'évolution des vitesses lorsque les deux mécanismes d'endommagement se développent simultanément au cours de chargement. La contrainte limite où la décohésion des inclusions commence est prise comme le cas précédent $\sigma_{lim2} = 0.6\sigma_{pic}$ alors que l'autre contrainte limite de la propagation σ_{lim1} est considéré un paramètre d'étude. Trois valeurs sont prises pour ce dernier paramètre illustrant ainsi les cas où la propagation des fissures se passe avant, en même temps ou après la décohésion des inclusions. Tous les autres paramètres sont alors maintenus constants ($a_1=0.2$, $a_2=3$, $a_3=1.2$). Dans le cas où $\sigma_{lim2} = 0.6\sigma_{pic}$ et $\sigma_{lim1} = 0.35\sigma_{pic}$ on observe que la propagation des fissures est le mécanisme qui domine l'endommagement, alors que la décohésion devient le mécanisme principal d'endommagement si $\sigma_{lim1} = 0.85\sigma_{pic} > \sigma_{lim2}$. La différence entre ce

dernier cas ($\sigma_{\text{lim1}} = 0.85\sigma_{\text{pic}} > \sigma_{\text{lim2}}$) et le cas d'étude précédent où la propagation des fissures est négligée ($\sigma_{\text{lim1}} > \sigma_{\text{pic}}$) est une diminution plus importante de la vitesse longitudinale $V_{P,90}$ et l'anisotropie des vitesses transversales représentée par le coefficient γ (voir figure V.9f).

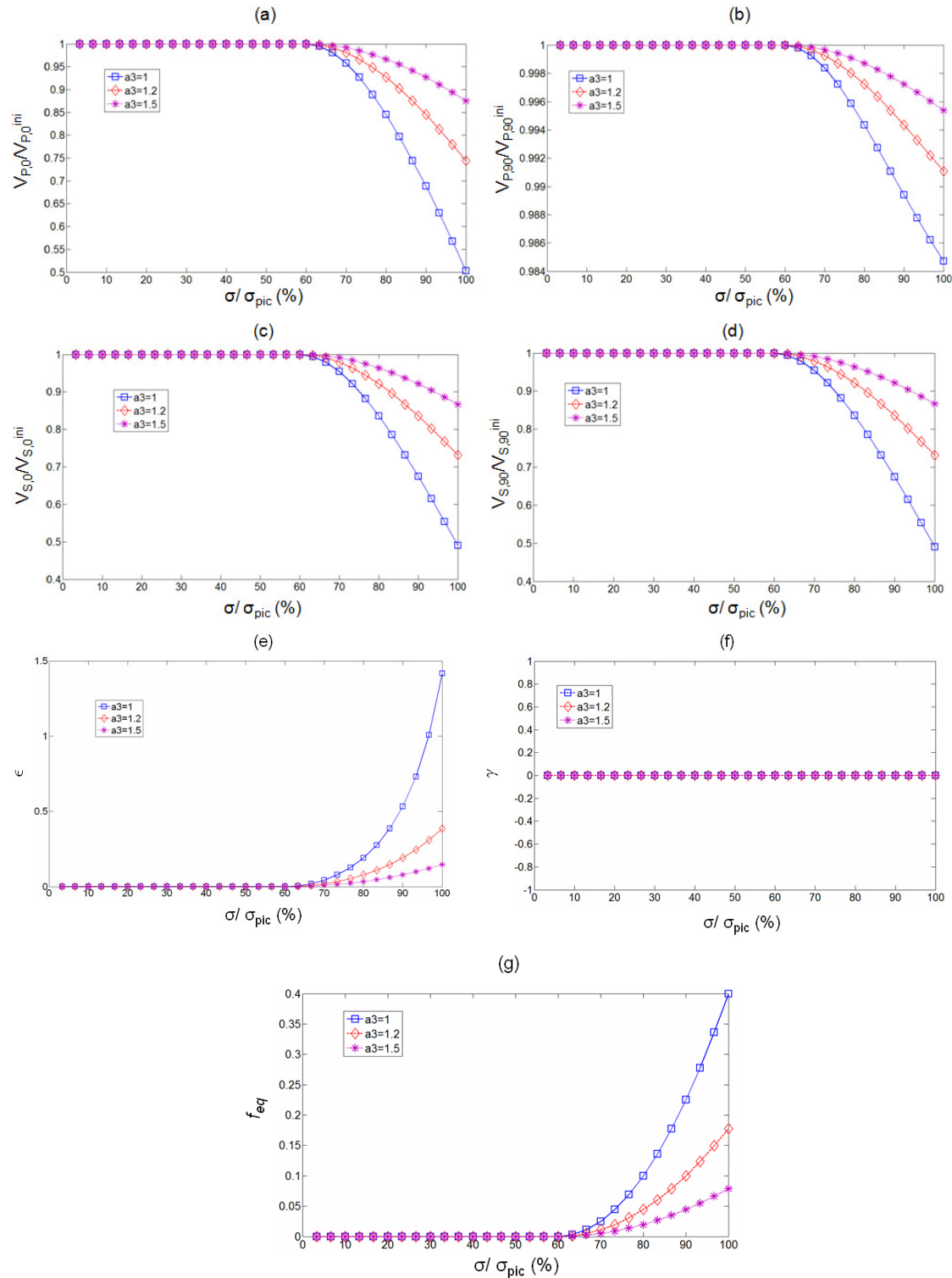


Figure V.8 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores et des coefficients de Thomsen en fonction de contrainte (cas d'étude paramétrique de a_3).

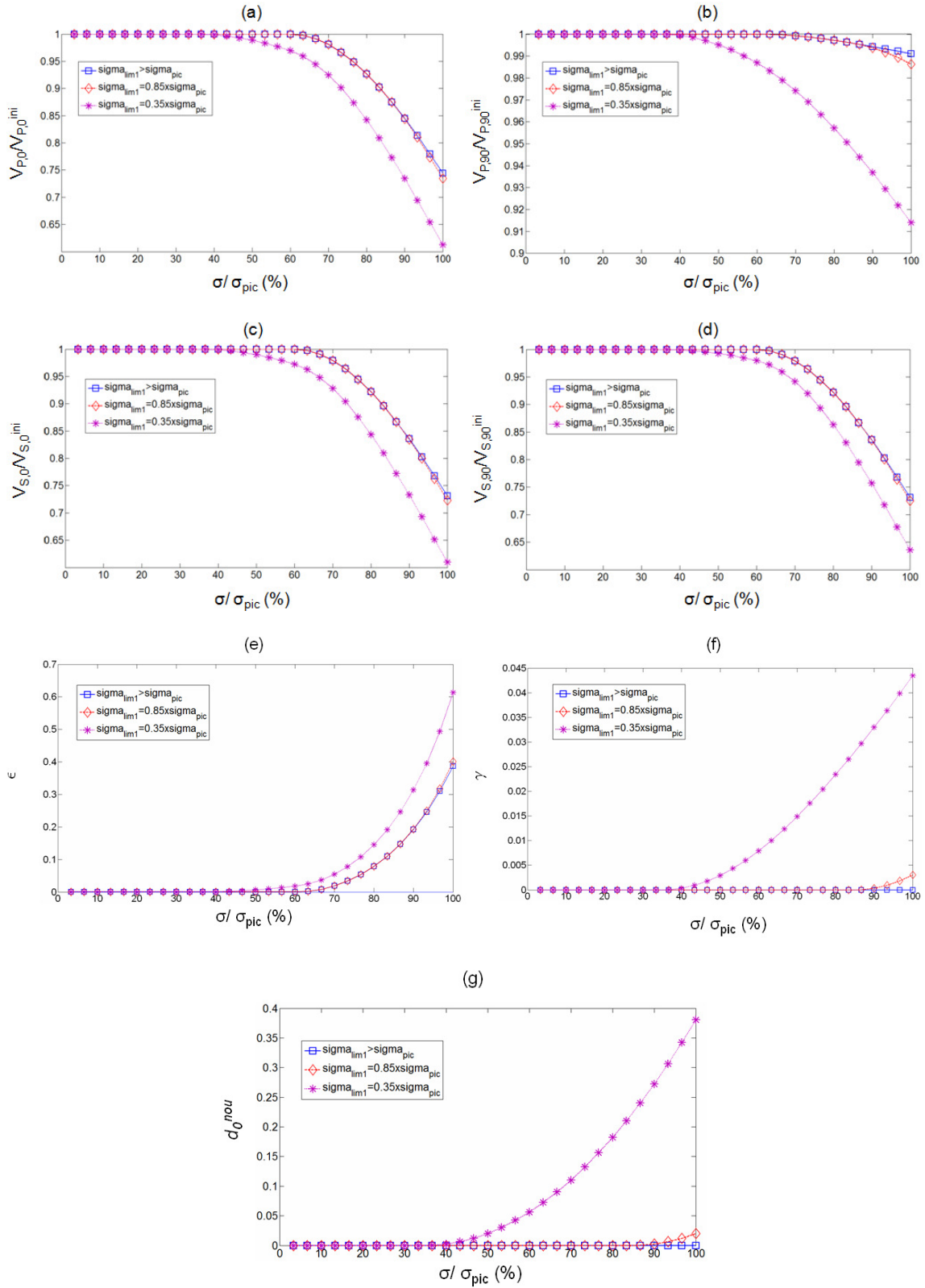


Figure V.9 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores et des coefficients de Thomsen en fonction de contrainte (couplage de deux mécanismes d'endommagement avec $a_1=0.2$,

$$a_2=3, a_3=1.2, \sigma_{lim2} = 0.6\sigma_{pic}).$$

Finalement sur les figures (V.10 à V.15), dans le but de valider le modèle proposé, nous présentons les résultats des simulations numériques en les comparant avec ceux des essais de compression uniaxiale de mortier. Pour cela, dans un premier temps, la densité initiale de fissuration de ces éprouvettes est déterminée. Ceci est effectué à partir d'une étude inverse des mesures des vitesses des ondes ultrasonores à l'état initial sachant que les propriétés mécaniques des inclusions de granulat et leur fraction volumique sont connues. Pour ce qui concerne les propriétés de la matrice cimentaire, nous adoptons une valeur constante du coefficient de Poisson $\nu_{mc} = 0.27$ alors que le module d'Young est aussi une variable à déterminer à partir des mesures ultrasonores. Les valeurs de la densité initiale des fissures et du module d'Young de la matrice cimentaire obtenues à partir de ces études inverses sont résumées dans le tableau V.1.

Tableau V.1 : Densité initiale des fissures des éprouvettes.

Eprouvette	$V_{P,exp}$ (m/s)	$V_{S,exp}$ (m/s)	E_{mc} (GPa)	d_0^{ini}
E/C=0.4, S/C=1	3860	2380	21.9	0.13
E/C=0.4, S/C=1.5	3980	2490	21.9	0.16
E/C=0.4, S/C=2	4200	2620	20.2	0.09
E/C=0.5, S/C=1	3600	2200	18.0	0.11
E/C=0.5, S/C=1.5	3750	2320	18.0	0.13
E/C=0.5, S/C=2	3840	2410	18.6	0.18

Dans un deuxième temps, les paramètres du modèle sont calibrés à partir des résultats des vitesses des ultrasons mesurées au cours des essais. De point de vue pratique, on détermine le paramètre σ_{lim1} présentant le seuil du mécanisme de la propagation des fissures à partir de la contrainte où la vitesse longitudinale $V_{P,90}$ commence à décroître. Ceci est basé sur le fait que cette dernière vitesse n'est pas influencée par le mécanisme de décohésion latérale des inclusions. Pour ce qui concerne l'autre paramètre σ_{lim2} indiquant le moment d'activation du mécanisme de décohésion, il est identifié comme étant la contrainte correspondante au moment où une des vitesses $V_{P,0}$, $V_{S,0}$, $V_{S,90}$ commence à diminuer.

Le modèle proposé reproduit convenablement les tendances globales des résultats expérimentaux observés pour toutes les éprouvettes et pour toutes les vitesses, en particulier des ondes longitudinales.

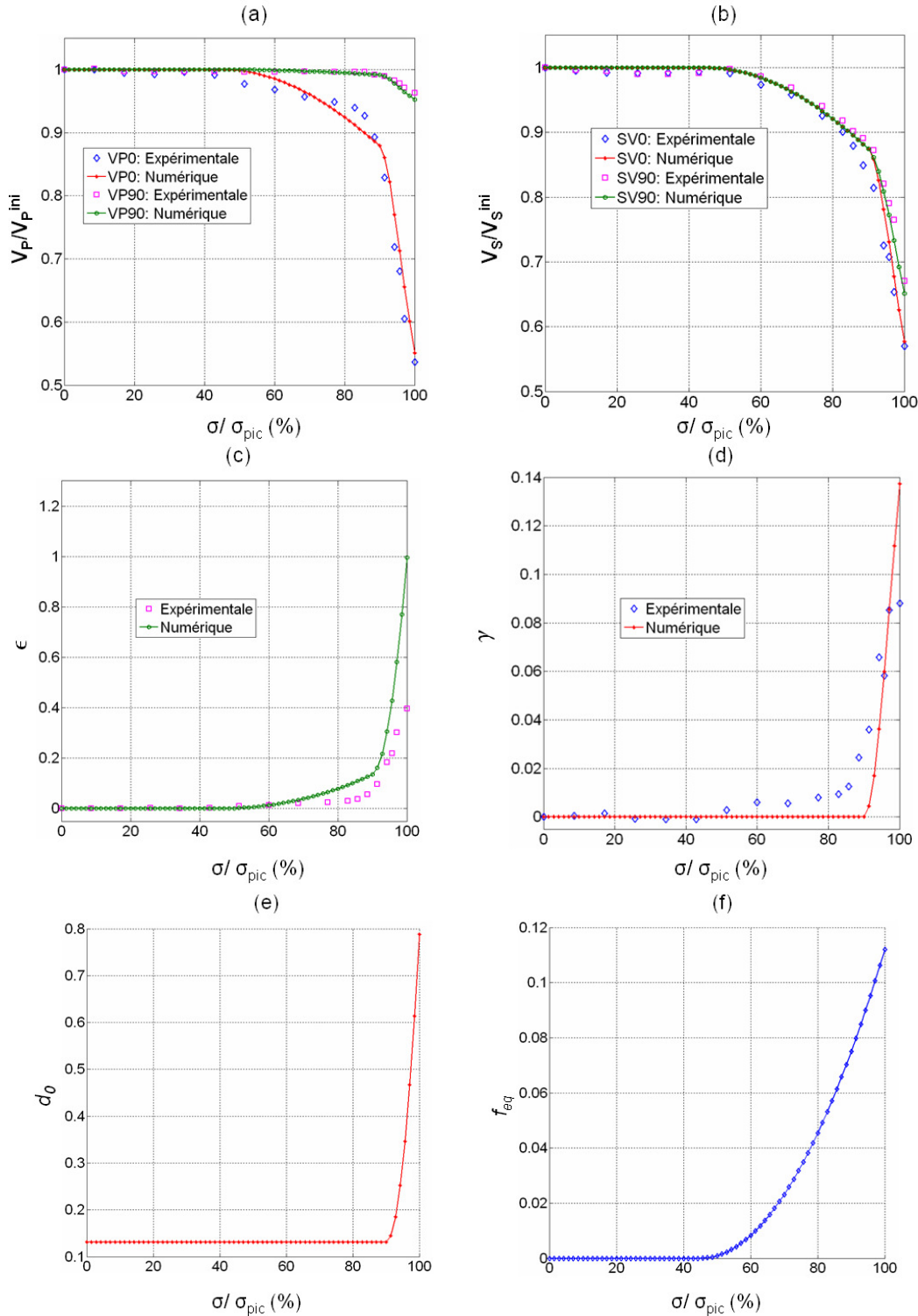


Figure V.10 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de contrainte d'éprouvette EC0.4SC1 (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=500$, $a_3=1.4$, $\sigma_{lim1} = 0.9\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.45\sigma_{pic}$).

Il en sort, que le mécanisme de décohésion des inclusions de granulat est dominant pour les contraintes entre 50% et 90% de la contrainte maximale. Lorsque la contrainte dépasse 90% de la contrainte maximale, l'ajustement des essais de laboratoire est meilleur avec un mécanisme de la propagation des fissures devenu dominant.

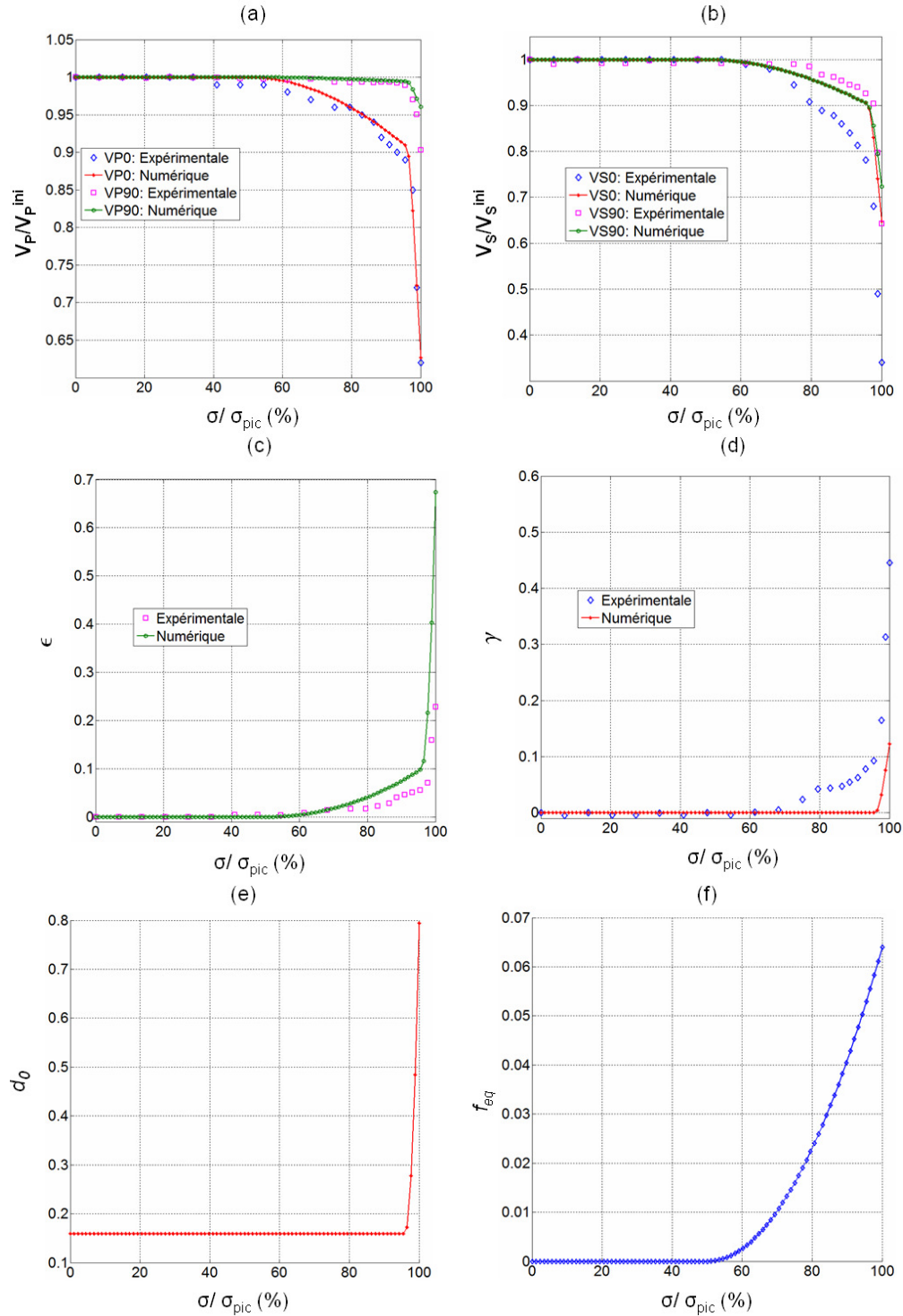


Figure V.11 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de contrainte d'éprouvette *EC0.4SC1.5* (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=2500$, $a_3=1.8$, $\sigma_{lim1} = 0.96\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.5\sigma_{pic}$).

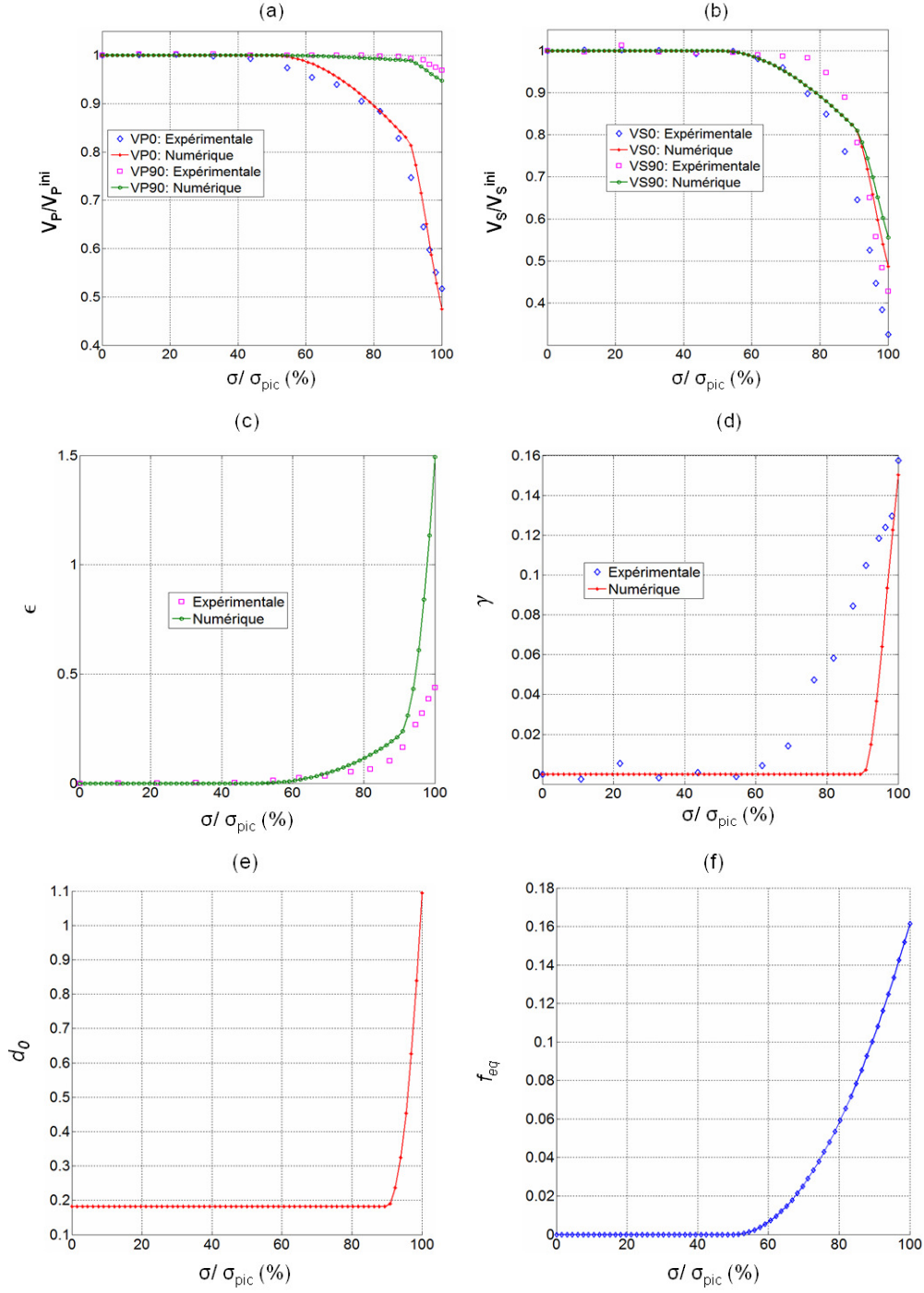


Figure V.12 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de contrainte d'éprouvette *EC0.4SC2* (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=500$, $a_3=1.35$, $\sigma_{lim1} = 0.9\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.5\sigma_{pic}$).

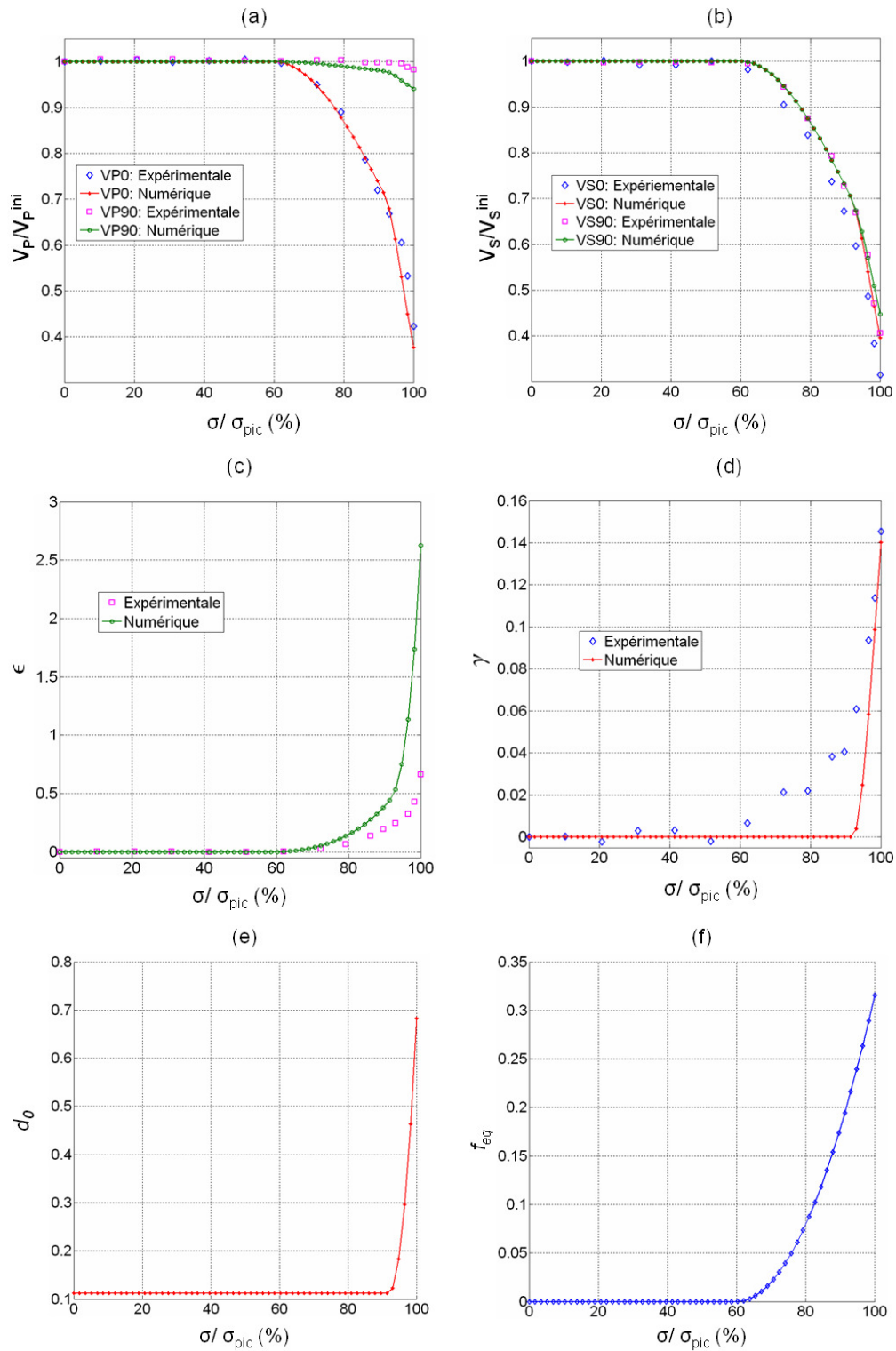


Figure V.13 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de contrainte d'éprouvette *EC0.5SC1* (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=800$, $a_3=1$, $\sigma_{lim1} = 0.92\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.6\sigma_{pic}$).

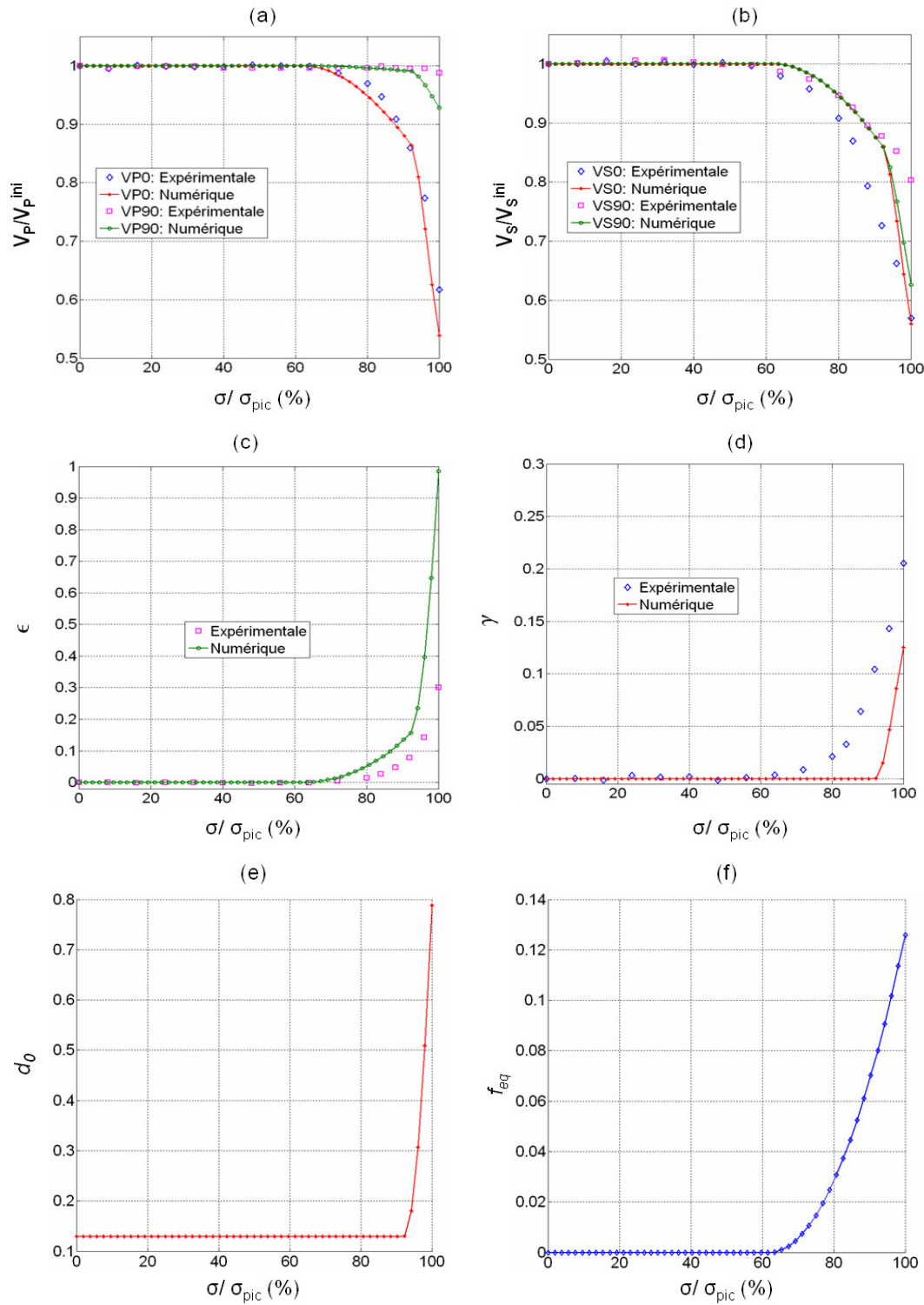


Figure V.14 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de contrainte d'éprouvette *EC0.5SC1.5* (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=800$, $a_3=1.3$, $\sigma_{lim1} = 0.92\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.62\sigma_{pic}$).

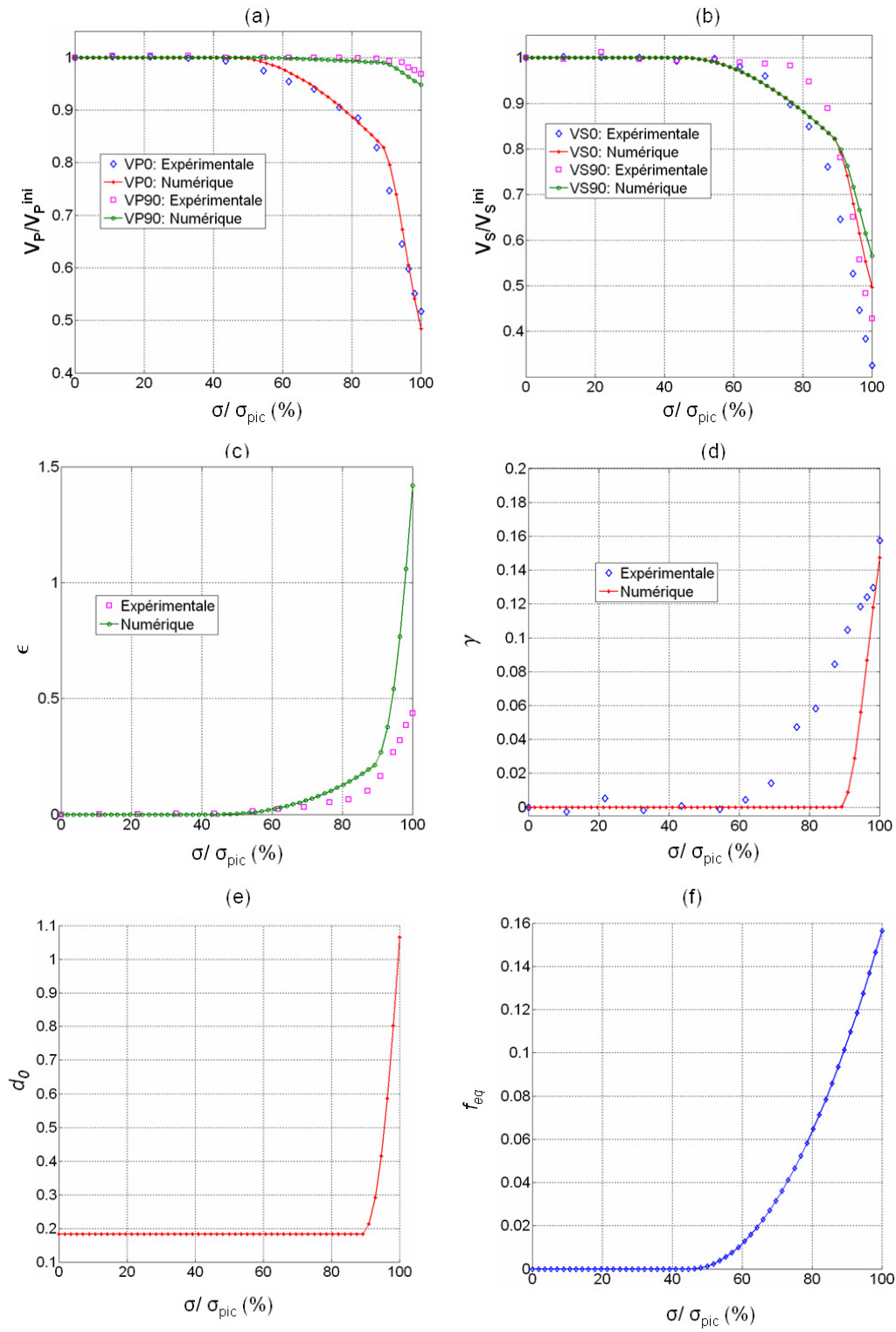


Figure V.15 : L'évolution des vitesses des ondes ultrasonores, des coefficients de Thomsen, la densité des fissures et la fraction volumique des inclusions décohésives en fonction de contrainte d'éprouvette *EC0.5SC2* (les résultats numériques déterminés à partir des paramètres calibrés $a_1=0.01$, $a_2=400$, $a_3=1.4$, $\sigma_{lim1} = 0.89\sigma_{pic}$, $\sigma_{lim2} = 0.45\sigma_{pic}$).

V.5. Conclusion

L'approche micromécanique a été utilisée dans ce chapitre pour modéliser l'endommagement des géomatériaux à matrice cimentaire sous compression uniaxiale. Un modèle conceptuel est proposé pour ce type de matériau incluant une matrice cimentaire avec un système de fissures ouvertes et des inclusions sphériques présentant les grains du sable. Deux mécanismes principaux d'endommagement sont considérés: la propagation des fissures au sein de la matrice cimentaire et la décohésion entre les inclusions et la pâte de ciment. Les critères d'évolution de la densité de fissuration liés avec chacun de mécanismes sont définis de manière phénoménologique en utilisant des fonctions statistiques. Via un schéma d'homogénéisation en deux étapes l'influence de ces types d'endommagement sur l'évolution des vitesses des ondes ultrasonores a été mise en évidence. La comparaison des prédictions numériques avec les mesures expérimentales permet de valider le modèle proposé et de quantifier l'impact de chacun de ces mécanismes dans l'endommagement du matériau.

Conclusions et perspectives

En conclusions, de ce travail de thèse dédié à la caractérisation et à la modélisation de l'endommagement des géomatériaux à base cimentaire sous la compression uniaxiale par méthode ultrasonore on rappelle les principaux résultats :

- En se basant sur l'étude bibliographique du premier chapitre, nous avons conclu sur le potentiel de la méthode ultrasonore pour caractériser l'endommagement progressif des géomatériaux sous contraintes. En différence de la méthode classique on démontre que les mesures par ultrasons, ne modifient ni l'état de fissuration ni l'état des fissures existantes. La technique de reconstruction des images (tomographie) à partir des mesures des ondes ultrasonores permettrait d'illustrer les processus et les mécanismes en jeux en cours de chargement mécanique.
- Un dispositif à ultrasons moderne et novateur a été proposé combinant un système mécanique de réalisation d'essais de compression uniaxiale/triaxiale, avec un système de génération, transmission, acquisition puis traitement des signaux ultrasonores. Le système ultrasonore construit comporte à l'heure actuelle 96 capteurs et il est capable d'utiliser trois types des ondes.
- La méthode non destructive de mesure des vitesses des ondes ultrasonores a été utilisée dans ce travail pour caractériser l'endommagement des géomatériaux à matrice cimentaire sous compression simple. Les données des vitesses ultrasons (et également d'atténuation) suivants différentes directions permettent d'évaluer les valeurs moyennes des vitesses $V_{P,90}$, $V_{P,0}$, $V_{S,90}$, $V_{S,0}$ et $V_{P,45}$. On peut constater une augmentation de ces vitesses en fonction du rapport S/C alors qu'un rapport E/C plus important diminue les vitesses ultrasoniques.
- Sous une contrainte compressive uniaxiale, les vitesses des ondes initialement isotropes deviennent de plus en plus anisotropes. Elles restent quasi constantes dans un premier temps, puis elles diminuent progressivement avant de décroître rapidement lorsque la contrainte atteinte une contrainte critique. L'évolution des paramètres d'anisotropie de Thomsen en fonction de chargement présente une augmentation globale avec une plus forte augmentation vers la fin de l'essai. L'évolution de l'atténuation des ondes ultrasonores sous l'effet de contrainte de compression

uniaxiale suit la même tendance que celle des vitesses. La relation entre ces valeurs de contrainte critique et les rapports E/C et S/C n'est pas clairement établie.

- La technique de la tomographie développée et appliquée dans le troisième chapitre a démontré également une possibilité intéressante pour suivre l'évolution de l'endommagement, en particulier lorsqu'on croise la tomographie des vitesses avec la tomographie de l'atténuation, cette dernière semble être plus performante. Dans l'application présentée dans ce chapitre on a pu observer, en accord avec les observations visuelles l'extension de la zone endommagée et sa localisation autour d'une macro fracture. Néanmoins on constate que la résolution de l'image laisse encore à désirer et demande une réflexion pour dépasser les limites naturelles imposées par le nombre limité des mesures.

- Une évolution progressive de l'état des fissures au sein de la matrice cimentaire et la décohésion entre les grains de sable et la pâte de ciment ont été considérées dans un modèle micromécanique pour expliquer la variation des vitesses ultrasonores observée en cours des essais de laboratoire. Via un schéma d'homogénéisation en deux étapes l'influence de ces types d'endommagement sur l'évolution des vitesses des ondes ultrasonores a été mise en évidence. La comparaison des prédictions numériques avec les mesures expérimentales permet de valider le modèle proposé et de quantifier l'impact de chacun de ces mécanismes dans l'endommagement des géomatériaux à matrice cimentaire.

En continuité de ces travaux quelques perspectives peuvent être envisagées, certaines à très court terme :

- La première perspective concerne la nécessité d'augmenter par une méthode quelconque la résolution spatiale des mesures ultrasonores. En fait, et ceci malgré le nombre important de capteurs utilisés, la résolution spatiale des images d'endommagement en tomographie reste assez médiocre. L'ajout de nouveaux capteurs, même en multipliant par deux leur nombre serait, d'après notre expérience ici, peu productive. Par contre, la combinaison de ce type de mesures avec d'autres techniques (électrique, magnétique etc) semble une voie à explorer davantage. Les résultats récents de certaines équipes de recherches, mettent cette perspective à la portée de nous ([REV14], [ARA12], [DUP07]).

- Dans le même registre, pour augmenter la résolution, on peut imaginer qu'à la place de l'augmentation du nombre des capteurs on peut développer un système permettant des

mesures avec une résolution pratiquement de l'ordre qu'on veut. Pour cela à l'instar des Phased Array on peut utiliser un système de capteurs à contact mobile où la géométrie des capteurs n'est pas fixé en avance mais connue néanmoins à tous moment via un couplage avec un système de palpeurs.

- L'analyse des résultats peut aussi être largement améliorée pour finalement arriver à ce qui est le but final même de ce travail : pouvoir déduire à tout point du solide un tenseur de rigidité. En fait nous avons peu ou pas du tout utilisé jusqu'à présent le fait que nous avons des mesures de vitesses de nature et de polarisation différente. A l'instar de certains travaux qui définissent un tenseur de rigidité au niveau de l'échantillon considéré comme homogène [ESL10], il faudra à terme pouvoir, en combinant les informations de toutes les vitesses à un point donné, déduire le tenseur de rigidité élastique à tout pixel. Cela transformera définitivement la tomographie en un outil quantitative.

- Enfin, le système développé laisse ouverte la possibilité de traitement des signaux « en ligne » via la programmation de la carte FPGA. Une fois que la procédure de traitement des signaux définitivement validée et adaptée aux évolutions proposées ci-dessus, il est envisageable d'avoir une image par transmission en temps réel.

Références

- [AKA74] Akaike H., 1974. Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average process. *Ann. Inst. Statist. Math*, 26, pp 363-387.
- [AMI02] Amitrano D et Schmittbuhl J., 2002. Fracture roughness and gouge distribution of a granite shear band. *J. Geophys. Res.* 107, B12, 2375.
- [ARA12] Araj A.H., Revil.A, Jardani A., Minsley B.J, and Karaoulis M., 2012. Imaging with cross-hole seismoelectric tomography. *Geophys. J.Int* 188, pp 1285-1302.
- [ATK07] Atkinson C.H., and Soria J., 2007. Algebraic Reconstruction Techniques for Tomographic Particle Image Velocimetry. Department of Mechanical Engineering, Monash University, Victoria, 3800 Australia.
- [AUD96] Audoin B and Roux J., 1996. An Innovative Application of the Hilbert Transform to Time Delay Estimation of Overlapped Ultrasonic Echoes. *Ultrasonics*, 1996, Vol. 34, No. 1, pp 25-33.
- [BAS94] Basarab-Horwath I, Dorozhovets M.M., 1994. Measurement of the temperature distribution in fluids using Ultrasonic Tomography. *IEEE Ultrasonic Symposium*, Cannes.
- [BES07] Best I, Jeremy Sothcott and Clive McCann., 2007. A laboratory study of seismic velocity and attenuation anisotropy in near-surface sedimentary rocks. *Geophysical Prospecting* 55, pp 609-625.
- [BIO56] Biot M.A., 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol 28, No2, pp 168-178.
- [BIO62] Biot M.A., 1962. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics*. Vol 33, No4, pp 1482-1498.
- [BOR02] De Borst R., 2002. Fracture in quasi-brittle materials: a review of continuum damage based approaches. *Engineering Fracture Mechanics* 69, pp 96-112.
- [BOS02] Bossy E., Talmant M and Laugier P., 2002. Effect of bone cortical thickness on velocity measurements using ultrasonic axial transmission: A 2D simulation study *J. Acoust. Soc. Am.*, 112, pp 297-307.

- [BOU86] Bourbie T., Coussy O. & Zinsner B., 1986. Acoustique des milieux poreux, Technip, 339 page.
- [CAR10] Carcione J.M., Morency C and Santos J.E., 2010. Computational poroelasticity-A review. 3rd revised version submitted to Geophysics. This copy printed February 17.
- [CHA79] Chaboche J.L., 1979. Le concept de contrainte effective appliquee a l'elasticite et a la viscoplasticite en presence d'un endommagement anisotrope. Colloquium Euromech 115, Grenoble.
- [CHA11] Charalampidou E.M., Hall S.A., Stanchits S., Lewis H., Viggiani G., 2011. Characterization of shear and compaction bands in a porous sandstone deformed under triaxial compression. Tectonophysics 503, pp 8-17.
- [CHE09] Chekroun M., Le Marrec L., Abraham O., Durand O., Villain G., 2009. Analysis of coherent surface wave dispersion and attenuation for non-destructive testing of concrete. Ultrasonics, vol. 49, pp 743 - 751.
- [CHI09] Chichinina T.I., Obolentseva I.R., Ronquillo-Jarillo G., 2009. Anisotropy of Seismic Attenuation in Fractured Media: Theory and Ultrasonic Experiment. Transp Porous Med 79, pp1-14.
- [CHO95] Chow T.M., Meglis I.L et Young R.P., 1995. Progressive microcrack development in tests on Lac du Bonnet granite II. Ultrasonic tomographic imaging. Int. J. Rock Mech. Min.Sci. & Geomech. Abstr. 32(8) pp 751-761.
- [CHO05] Meglis I.L., Chow T., Martin C.D., Young R.P., 2005. Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 42, pp 25-34.
- [COM01] Comi C., Perego U., 2001. Fracture energy based bi-dissipative damage model for concrete. International Journal of Solids and Structures 38, pp 6427-6454.
- [CON04] Constantinides G., Ulm F., 2004. The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling. Cement and Concrete Research 34, pp 67-80.
- [CUX91] Cuxac P., 1991. Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes. Thèse de Doctorat de l'INPL, Nancy.

- [CUX92] Cuxac P & Homand F.,1992. Propagation d'ondes ultrasonores dans les roches anisotropes. *Revue Française de Géotechnique*, 59, pp 49-55.
- [DAV93] David C., 1993. Geometry of flow paths for fluid transport in rocks. *J. Geophys. Res.*, 98, pp. 12267-12278.
- [DEU02] Deudé V., Dormieux L., Kondo D., Maghous S., 2002. Micromechanical approach to nonlinear poroelasticity : application to cracked rocks. *J. Eng. Mech.*, Vol. 28(8), pp. 848-855.
- [DES07] Desmorat R., Gatuigta F., Ragueneau F., 2007. Non-local anisotropic damage model and related computational aspects for quasi-brittle materials. *Engineering Fracture Mechanics* 74(10), pp 1539-1560.
- [DIA] <http://www.diagnosticsonar.com/>
- [DO08] Do D.P., 2008. Application of homogenization approaches to the study of the thermo-hydro-mechanical properties of rocks. Application to argillites. PhD thesis, INPL (in French).
- [DUB96] Dubuget M.,1996. Evaluation Non Destructive des Matériaux par Ultrasons : Caractérisation de l'Etat Initial et Suivi Sous Charge des Propriétés d'Elasticité Linéaire et Non Linéaire d'Alliages d'Aluminium. Thèse de doctorat, INSA Lyon,194 p.
- [DUP07] Dupuis C.J., Butler K.E., and Anton W.Kepic., 2007. Seismoelectric imaging of the vadose zone of a sand aquifer. *Geophysics*, Vol 72, No 6, pp 81-85, 4figs.
- [ELA07] Elaqua H., Godin N., Peix G., R'Mili M., Fantozzi G., 2007. Damage evolution analysis in mortar, during compressive loading using acoustic emission and X-ray tomography: Effects of the sand/cement ratio. *Cement and Concrete Research* 37 , pp 703-713.
- [ESH57] Eshelby J. D., 1957. The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 241, pp 376 - 396.
- [ESL10] Eslami J., 2010. Étude de l'endommagement à court et long terme d'une roche poreuse par méthodes acoustiques. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.

- [FAR98] Faria R., Oliver J., Cervera M., 1998. A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures. *International Journal of Solids and Structures* 35(14), pp1533-1558.
- [FET10] Fethi S., 2010. Caractérisation de la pâte de ciment par des méthodes ultrasonores. Thèse de doctorat, École Centrale de Lille.
- [FOR05] Fortin J., 2005. Compaction homogène et compaction localisée des roches poreuses. Étude expérimentale et théorique. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure.
- [FRA96] Françoise P., Line G., Isabelle M., 1996. Introduction to 2D and 3D Tomographic Methods Based on Straight Line Propagation : X-ray, Emission and Ultrasonic Tomography. *Traitement du Signal*, Volume 13, No 4 - Supplément.
- [GIL92] Gilles M., 1992. Capteurs Ultrasonores "INTELLIGENTS" Application à la représentation symbolique de mesures de distance par codage flou. Thèses de doctorat, Université de Savoie.
- [GIR07] Giraud A., Gruescu C., Do D.P., Homand F., Kondo D., 2007. Effective thermal conductivity of transversely isotropic media with arbitrary oriented ellipsoidal inhomogeneities. *International Journal of Solids and Structures*, Vol 44, pp 2627-2647.
- [GOR70] Gordon R., Bender R. et Herman G.T., 1970. Algebraic Reconstruction Technique for Three-dimensional Electron Microscopy and X-ray photography 29, pp 47-481.
- [GOR74] Gordon R., 1974. A tutorial on ART. *IEEE Trans. Nuc l. Sci.* 21, pp78-93.
- [GOU09] Goueygou M., Lafhaj Z., Soltani F., 2009. Assessment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh wave. *NDT&E International*, vol. 42, pp 353 - 360.
- [GUE03] Guéguen Y., Schubnel A., 2003. Elastic wave velocities and permeability of cracked rocks. *Tectonophysics* 370, pp 163 - 176.
- [GRE81] Greenleaf J.F., 1981. Computerized Transmission Tomography. Chap 12 in *Methods of experimental physics*, Vol 10, Ultrasonics, P.D. Edmonds Ed., Academic Press, pp 563-589.
- [HAD76] Hadley K., 1976. Comparison of calculated and observed crack densities and seismic velocities in Westerley granite, *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, pp. 3484-3487.

- [HAN11] Hannachi M.T., 2011. Étude du Comportement Mécanique des Joints Soudés lors du Soudage des Tubes par Induction à Haute Fréquence (HF). Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna.
- [HAN12] Hansen P.C., Saxild-Hansen M., 2012. AIR Tools - A MATLAB package of algebraic iterative reconstruction methods. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 236, pp 2167-2178.
- [HER06] Hernandez M.G., Anaya J.J., Ullate L.G., Cegarra M., Sanchez T., 2006. Application of a micromechanical model of three phases to estimating the porosity of mortar by ultrasound. *Cement and Concrete Research* 36, pp 617-624.
- [HOM00] Homand F., Hoxha D., Belem T. and Pons M.N., 2000. Geometric analysis of damaged microcracking granites. *Mech. Mater.*, Vol. 32, pp 361-376.
- [HOM06] F.Homand., J. F. Shao., A. Giraud., C. Auvray, and D. Hoxha., 2006. Péetrofabrique et propriétés mécaniques des argillites. *C. R. Géosciene*, 338, pp 882-891.
- [HOR98] Hornby, B. E., 1998. Experimental laboratory determination of the dynamic elastic properties of wet, drained shales. *J. Geophys. Res.*, 103(B12):29945-29964.
- [HOX98] Hoxha D., 1998. Modélisation de l'endommagement des massifs rocheux. Thèse de doctorant, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- [HOX00] Hoxha D., Homand F., 2000. Microstructural approach in damage modelling. *Mechanics of Materials*, Vol. 32, pp 377- 387.
- [HOX05] Hoxha D., Giraud A, and Homand F., 2005. Modelling long-term behaviour of a natural gypsum rock, *Mechanics of materials*, Vol. 37 (12), pp. 1223-1241.
- [HUY06] Huynh Q.V., 2006. Estimation des propriétés des poromécaniques effectives des argilites : apport des méthodes d'homogénéisation. Thèse de doctorat, ENSG-INPL.
- [JAC12] Jacques D.F., 2012. Contrôle non destructif (CND). Dossier Techniques de l'Ingénieur.
- [JAI12] Jairo M et Alper S, Onursal O, Dean V and Rasim G., 2012. A Synthetic Phased Array Surface Acoustic Wave Sensor for Quantifying Bolt Tension. *Sensors*, pp12265-12278; doi:10.3390/s120912265.
- [JAN10] Janeiro R.P., Einstein H.H., 2010. Experimental study of the cracking behaviour of specimens containing inclusions (under uniaxial compression). *International Journal of Fracture*, Vol 164, pp 83-102.

- [JEA12] Jean-Pierre Lefebvre et etc., 2012. L'acoustique ultrasonore et ses applications, 1re partie. Laboratoire de mécanique et d'acoustique UPR CNRS 7051.
- [JER05] Jérôme F., 2005. Compaction homogène et compaction localisée des roches poreuses. Étude expérimentale et théorique. Thèse de doctorat, Université Paris VI.
- [KUR05] Kurz J.H., Grosse C.U., Reinhardt H.W., 2005. Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emission and of ultrasound signal in concrete. Ultrasonic 43, pp 538-546.
- [JOH96] Johnson P.A., 1996. Nonlinear elasticity and stress-induced anisotropy in rock. Journal of geophysical research, Vol 101, NoB2, pp 3113-3214.
- [KAT04] Katz O et Reches Z., 2004. Microfracturing, damage, and failure of brittle granites. J. Geophys. Res. 109 (B01206).
- [KER11] Keerry S.H., 2011. Air-Coupled ultrasonic tomographic imaging of concrete element. Thesis of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [KIN09] King M.S., 2009. Recent developments in seismic rock physics. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46, pp1341-1348.
- [KIT78] Kitagawa G., et Akaike H., 1978. A procedure for the modeling of non-stationary time series. Ann. Inst. Statist. Math, 30, pp 351-363.
- [KLE94] Kleinman R., Duchene B., Lesselier B., 1994. A non linear iterative approach of the acoustic characterization of defects within a half-space. IEEE Ultrasonic Symposium, Cannes.
- [KRA81] Krajcinovic D., Fonseka G.U., 1981. The continuous damage theory of brittle materials. Part I: General theory. Journal of Applied Mechanics ASME 48, pp 809-815.
- [LAT03] Lataste J.F., Sirieix C., Breysse D., 2003. Frappa M., Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering , NDT&E International, vol. 36, ppp 383-394.
- [LEF94] Lefebvre J.P., 1994. Progress in linear inverse scattering imaging: NDE application of Ultrasonic Reflection Tomography, in Inverse Problem in Engineering Mechanics, (A.A.Balkema/ Rotterdam/Brookfield), pp 371-375.

- [LEI09] Lei X., Ziqiu X., 2009. Ultrasonic velocity and attenuation during CO₂ injection into water-saturated porous sandstone: Measurements using difference seismic tomography. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 176, pp 224-234.
- [LIA97] Liao J. J., Hu T.B., et Chang C.W., 1997. Determination of dynamic elastic constants of transversely isotropic rocks using a single cylindrical sample. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 34(7), pp1045-1054.
- [LOC13] Lokajicek T., KGoel R., Rudajev V., Dwivedi R.D., 2013. Assessment of velocity anisotropy in rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 57, pp 142-152.
- [LO86] Lo T.W., Coyner K.B., et Toksöz M.N., 1986. Experimental determination of elastic anisotropy of Berea sandstone, Chicopee shale, and Chelmsford granite. *Geophysics*, 51(1), pp 164-171.
- [LUI04] Lu W and Yin F., 2004. Adaptive algebraic reconstruction technique. *Med. Phys.*, 31, pp 3222-3230.
- [MAR00] Martin L.P., Lindgren E.A., Rosen M., Sidhu H., 2000. Ultrasonic determination of elastic module in cement during hydrostatic loading to 1 GPa. *Materials Science and Engineering A279*, pp 87-94.
- [MAR04] Marfia S., Rinaldi Z., Sacco E., 2004. Softening behaviour of reinforced concrete beams under cyclic loading. *International Journal of Solids and Structures* 41, pp 3293- 3316.
- [MAR96] Martin N.W., 1996. Ultrasonic seismic data for sandstone samples from the writing-on-stone Provincial park in Alberta. PhD thesis, University of Calgary, Alberta.
- [MAR06] Marie-Aude P., 2006. Étude de l'atténuation des ondes ultrasonores. Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable auténitique. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [MAZ84] Mazars J., 1984. Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure. Thèse de doctorat, Université Paris VI.
- [MAZ86] Mazars J., 1986. A description of micro- and macroscale damage of concrete structures. *Engineering Fracture Mechanics* 25(5/6), pp 729-737.
- [MAZ89] Mazars J., Pijaudier-Cabot G., 1989. Continuum damage theory - application to

- concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 115(2), pp 345-365
- [MAR09] Marc F., 2009. Introduction à la théorie des ondes élastiques.
- [MCC01] McCann D.M., Forde M.C., 2001. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures, *NDT&E International*, vol.34, pp 71-84.
- [MEH93] Mehta P.K., and Monteiro P.J.M., 1993. Concrete structure, properties, and materials. 2nd Ed., Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J.
- [MER06] Mercier J., 2006. Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [MIC81] Micheron F., 1981. Vers une nouvelle génération de capteurs grâce aux polymères piézoélectriques. Mesures, Régulation, Automatisation.
- [MIH11] Mihai I.C., Jeffers A.D., 2011. A material model for cementitious composite materials with an exterior point Eshelby microcrack initiation criterion. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 48, pp 3312-3325.
- [MIH12] Mihai I.C., 2012. Micromechanical constitutive models for cementitious composite materials. Thesis of School of Engineering, Cardiff University.
- [MOO95] Moore D.E., et Lockner D.A., 1995. The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite. *Journal of Structural Geology* 17(1), pp 95-114.
- [MOR73] Mori T., Tanaka K., 1973. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metall.*, Vol. 21, pp 571 - 574.
- [MOS86] Moshfeghi M., 1986. Ultrasound reflection mode tomography using fan-shaped beam insonification. *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol 33, No3, pp 299-314.
- [MOU96] Mouchitachi A., 1996. Évaluation Non Destructive par Ultrasons des Propriétés d'Élasticité des Matériaux Anisotropes : Mesure de Vitesses et Résolution du Problème Inverse, Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 181 p.
- [MUR87] Mura T., 1987. Micromechanics of defects in solids. Martinus Nijhoff.
- [NF197-1] Les ciments de la norme NF EN197-1.
- [NI1] Module adaptateur de numérisation 32 voies pour applications NDT.
- <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fr/nid/208656>.

[NI2]Module FPGA NI FlexRIO pour PXI.

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fr/nid/206643>.

[NIS02] Nishiyama T., Chen Y., Kusuda H., Ito T., Kaneko K., Kita H. et Sato T., 2002. The examination of fracturing process subjected to triaxial compression test in Inada granite. *Engineering Geology* 66, pp 257-269.

[NGU08] Nguyen D.T., 2008. Développement d'algorithme de reconstruction tomographique pour l'analyse pixel d'échantillon biologique. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I.

[NOG01] Nogueira C.L and Kaspar J. W., 2001. Ultrasonic Testing of Damage in Concrete under Uniaxial Compression. *ACI Materials Journal*, Title no. 98-M30.

[OPI 98]Opiełidzi K.J and Tadeusz G., 1998. Main Error Sources in ultrasound Transmission Tomography imaging. Institute of Telecommunication and Acoustics, Wrocław University of Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland.

[PAT78] Paterson S., 1978. *Experimental Deformation of Rocks: The Brittle Field*, Springer, Berlin.

[PEA96] Peace D. R.,1996. The characterisation of rock masses from laboratory and field studies of the velocity and attenuation of seismic waves. PhD, University of Leeds.

[PEN02]Pensee V., 2002. Contribution de la micromécanique à la modélisation tridimensionnelle de l'endommagement par mésosfissuration. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille.

[PER93] Perdişon J.,1993. Le contrôle non destructif par ultrasons, *Traité des Nouvelles Technologies. Série Mécanique*, Hermes.

[PHI97]Lasaygues P., Lefebvre J.P and Mensah S.,, 1997. High Resolution Low Frequency Ultrasonic Tomography *Ultrasonic Imaging*, 19, pp 278-293.

[PHI06] Philippe L., Eric D., Lefebvre J.P., 2006. Intérêt de la tomographie ultrasonore pour l'imagerie osseuse chez l'enfant. *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique*, UPR CNRS 7051, 13402 Marseille cedex 20, France.

[PIA11] Piane C.D., Dewhurst D.N., Siggins A.F and Raven M.D., 2011. Stress- induced anisotropy in brine saturated shale. *Geophys. J. Int* 184, pp 897-906.

- [PIC07] Pichler B., Hellmich C and Herbert A. M., 2007. A combined fracture micromechanics model for tensile strain-softening in brittle materials, based on propagation of interacting microcracks. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, 31.
- [PIC11] Pichler B., Hellmich C., 2011. Upscaling quasi-brittle strength of cement paste and mortar: A multi-scale engineering mechanics model. *Cement and Concrete Research* 41, pp 467-476.
- [PIE00] Pierre B, Pierre H, Jean-Paul S, Gérard V., 2000. *Manuel de Mécanique des roches*. Les Presses de l'École des Mines, pp 42-47.
- [POD68] Podio, A. L., Gregory, A. R. et Gray, K. E., 1968. Dynamic properties of dry and watersaturated Green River shale under stress. *Soc. Pet. Eng. J.*, (SPE 1825).
- [PUN06] Punurai W., 2006. Cement-based Materials' characterization using ultrasonic attenuation. Thesis of Philosophy, Georgia Institute of Technology.
- [QAS03] Hisham Y. Qasrawi., Iqbal A. Marie., 2003. The use of USPV to anticipate failure in concrete under compression. *Cement and Concrete Research* 33, pp 2017-2021.
- [RAD17] Radon J., 1917. "Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten." *Math. Phys. Kl.* **69**. Pp 262-267.
- [RAH10] Rhazi J and Serge Kodjo., 2010. Non-destructive evaluation of concrete by the quality factor. *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 5(16), pp 2458-2465.
- [REN98] Renaud V., 1998. Contributions à l'étude d'un modèle de mésofissuration : application au comportement d'un grès. Thèse de doctorat, Université de Lille 1.
- [REV14] Revil A., Barnier G., Karaoulis M., Sava P., Jardani A and Kulesa B., 2014. Seimoelectric coupling in unsatuaed porrous media : theory, petrophysics, and saturation front localization using an electroacoustic approach. *Geophys. J.Int* 196, pp 867-884.
- [ROY96] Royer D., Dieulesaint E., 1996. *Ondes élastiques dans les solide, Tome I : Propagation, libre et guidée*, Masson.

- [SAR06] Sarout J., 2006. Propriétés Physiques et Anisotropie des Roches Argileuses: Modélisation Micromécanique et Expériences Triaxiales. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure, France.
- [SAN10] Santhanam M., 2010. Ultrasonic Characterization of Damage in Concrete. SL, Vol.3, No.2, pp111-125.
- [SAY95] Sayers C. M., 1995. Technical note: Stress-dependent elastic wave velocities in shales. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 32, No 3, pp 263-267.
- [SCO04] Scott and Younane A., 2004. Acoustical Imaging and Mechanical Properties of Soft Rock and Marine Sediments. Report Issued: PoroMechanics Institute The University of Oklahoma.
- [SCR04] Scrivener K.L., 2004. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. Cement and Concrete Composites, 26, No. 8, pp 935-945.
- [SHA06] Shao J.F., Jia Y., Kondo D. And Chiarelli A.S., 2006. A coupled elastoplastic damage model for semi-brittle materials and extension to unsaturated condition. Mechanics of Materials. Vol 38, pp218-232.
- [SHO10] Shokouhi P., Zoëga A., and Wiggenhauser H., 2010. Nondestructive Investigation of Stress-Induced Damage in Concrete. Volume 2010, Article ID 740189, 9 pages.
- [TAP76] Tapponier P., Brace W.F., 1976. Development of stress induced microcracks in Westerley granite. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 13, pp 103-112.
- [THO86] Thomsen L., 1986. Weak elastic anisotropy. Geophysics, 51(10), pp1954-1966.
- [THO11] Thomas C., 2011. Étude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone / matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV. Thèse de doctorat, Paris Tech.
- [UCH97] Uchikawa H., Hanehara S and Hirao H., 1997. Influence of microstructural change under stress on the strength-related properties of hardened cement mortar and paste. ISSN 1065-7355/97.
- [VAN97] Van Mier J.G.M., 1997. Fracture processes of concrete. CRC Press.
- [WAS06] Wasserman J., 2006. Etude expérimentale de l'endommagement des roches par des méthodes acoustiques, Thèse de doctorant, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.

- [WES04] Wesley B.J., 2004. Design and Testing of a Laboratory Ultrasonic Data Acquisition System for Tomography. Thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [YIN92] Yin H.,1992. Acoustic velocity and attenuation of rock : isotropy, intrinsic anisotropy, and stress induced anisotropy. PhD of philosophy, Stanford University.
- [ZHA98] Zhao Y., 1998. Crack pattern evolution and a fractal damage constitutive model for rock. Int.J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol. 35 (3), pp 349-366.
- [ZHU06] Zhu Q., 2006. Applications des approches d'homogénéisation à la modélisation tridimensionnelle de l'endommagement des matériaux quasi fragiles : formulations, validations et implémentations numériques. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.

Annexe A. Estimation des modules élastiques d'un matériau isotrope transverse

Pour un matériau isotrope transverse, avec l'axe de symétrie coïncidant avec la direction verticale Ox_3 du milieu, la relation élastique entre contrainte et déformation peut s'écrire sous la forme de l'équation (A1) en utilisant l'écriture simplifiée du tenseur de la rigidité par la notation du Voigt ([LIA97], [LO86], [HOR98]).

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (A1)$$

Notons dans cette relation $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$, on obtient donc les cinq constants élastiques indépendants représentant complètement le milieu élastique transverse isotrope. Nous détaillons par la suite les relations entre ces constants élastiques et les vitesses ultrasonores mesurées pour ce type de matériau.

Pour rappel, nous avons dans un milieu élastique les relations classiques entre les déformations et les déplacements sous l'hypothèse de petite déformation :

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_k} + \frac{\partial u_k}{\partial u_i} \right) \quad (A2)$$

En plus, la propagation d'ondes doit vérifier l'équation de l'équilibre qui est exprimée comme suivante en l'absence de force volumique :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial u_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (A3)$$

En combinant ces deux équations (A2), (A3) avec la loi de Hooke s'écrit dans l'équation (A4):

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (A4)$$

nous obtenons l'équation du mouvement sous la forme suivante :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} \quad (\text{A5})$$

De manière générale, la solution de cette équation est exprimée sous la forme :

$$u_i = \Delta_i F(t - \frac{n_j x_j}{V}) \quad (\text{A6})$$

En introduisant (A6) dans (A5), nous avons:

$$C_{ijkl} n_k n_j \Delta_j - \rho V^2 \Delta_i = 0 \quad (\text{A7})$$

Nous posons $\Gamma_{ij} = C_{ijkl} n_k n_j$, l'équation (A7) devient l'équation connue de Christoffel:

$$\Gamma_{ij} \Delta_j - \rho V^2 \Delta_i = 0 \quad (\text{A8})$$

où Γ_{ij} est tenseur de Christoffel ou tenseur acoustique, celui-ci est symétrique ; n_k, n_j sont composantes d'un vecteur unitaire $\mathbf{n}$ définissant la direction de propagation de l'onde ; Δ_i représente la polarisation de l'onde. Ce dernier vecteur connu comme vecteur propre du tenseur Γ_{ij} se compose trois valeurs propres ρV_i^2 vérifiant : $\det(\Gamma_{ij} - \rho V_i^2 \delta_{ij}) = 0$. Donc, en un point d'un front d'onde existent trois directions de polarisation orthogonales, chacune étant associée à une vitesse V_i .

En détaillant les composants de tenseur de Christoffel, nous avons les expressions suivantes:

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 + C_{55}n_3^2 + 2C_{16}n_1n_2 + 2C_{15}n_1n_3 + 2C_{56}n_2n_3 \\ \Gamma_{12} &= C_{16}n_1^2 + C_{66}n_2^2 + C_{45}n_3^2 + (C_{12} + C_{66})n_1n_2 + (C_{14} + C_{56})n_1n_3 + (C_{46} + C_{25})n_2n_3 \\ \Gamma_{13} &= C_{15}n_1^2 + C_{46}n_2^2 + C_{35}n_3^2 + (C_{14} + C_{56})n_1n_2 + (C_{13} + C_{55})n_1n_3 + (C_{36} + C_{45})n_2n_3 \\ \Gamma_{22} &= C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2 + 2C_{26}n_1n_2 + 2C_{45}n_1n_3 + 2C_{24}n_2n_3 \\ \Gamma_{23} &= C_{56}n_1^2 + C_{24}n_2^2 + C_{34}n_3^2 + (C_{46} + C_{25})n_1n_2 + (C_{36} + C_{45})n_1n_3 + (C_{23} + C_{44})n_2n_3 \\ \Gamma_{33} &= C_{55}n_1^2 + C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2 + 2C_{45}n_1n_2 + 2C_{35}n_1n_3 + 2C_{34}n_2n_3 \end{aligned} \quad (\text{A9})$$

Particulièrement dans un matériau isotrope transverse tous les plans passant par l'axe sénaire (plans méridiens) sont équivalents du point de vue des propriétés élastique. Les surfaces caractéristiques sont des surfaces de révolution autour de cet axe de rotation. Pour la même raison, dans un plan perpendiculaire à l'axe, les vitesses sont indépendantes de la direction de propagation. Explicitons le tenseur Γ_{ij} dans le cadre de ce type de matériau [ESL10]:

$$\begin{aligned}
\Gamma_{11} &= C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 + C_{44}n_3^2 & \Gamma_{22} &= C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2 \\
\Gamma_{12} &= (C_{12} + C_{66})n_1n_2 & \Gamma_{23} &= (C_{13} + C_{44})n_2n_3 \\
\Gamma_{13} &= (C_{13} + C_{44})n_1n_3 & \Gamma_{33} &= C_{44}(n_1^2 + n_2^2) + C_{33}n_3^2
\end{aligned} \tag{A10}$$

En outre dans un plan méridien, les vitesses dépendent de l'angle θ entre l'axe sénéaire et la direction de propagation $\vec{n}$. Si nous choisissons à titre d'exemple le plan Ox_2x_3 :

$$n_1 = 0 ; n_2 = \sin \theta ; n_3 = \cos \theta ; \Gamma_{12} = \Gamma_{13} = 0$$

Le tenseur de propagation peut s'écrire comme l'équation (A11) :

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_{22} & \Gamma_{23} \\ 0 & \Gamma_{23} & \Gamma_{33} \end{bmatrix} \tag{A11}$$

$$\text{avec : } \Gamma_{11} = C_{66} \sin^2 \theta + C_{44} \cos^2 \theta ; \quad \Gamma_{23} = (C_{13} + C_{44}) \sin \theta \cos \theta ;$$

$$\Gamma_{22} = C_{11} \sin^2 \theta + C_{44} \cos^2 \theta ; \quad \Gamma_{33} = C_{44} \sin^2 \theta + C_{33} \cos^2 \theta ;$$

Une onde transversale dont la polarisation est perpendiculaire au plan méridien se propage à la vitesse :

$$V_3 = \sqrt{\frac{\Gamma_{11}}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_{66} \sin^2 \theta + C_{44} \cos^2 \theta}{\rho}} \text{ avec } C_{66} = \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \tag{A12}$$

Les vitesses des deux autres modes, polarisés dans le plan méridien, sont données par :

$$2\rho V_{1ou2}^2 = \Gamma_{22} + \Gamma_{33} \pm \sqrt{(\Gamma_{22} - \Gamma_{33})^2 + 4\Gamma_{23}^2} \tag{A13}$$

Précisément pour l'onde quasi longitudinale :

$$\begin{aligned}
2\rho V_1^2 &= C_{44} + C_{11} \sin^2 \theta + C_{33} \cos^2 \theta \\
&+ \sqrt{[(C_{11} - C_{44}) \sin^2 \theta + (C_{44} - C_{33}) \cos^2 \theta]^2 + (C_{13} + C_{44})^2 \sin^2 2\theta}
\end{aligned} \tag{A14}$$

Et pour l'onde quasi transversale :

$$\begin{aligned}
2\rho V_1^2 &= C_{44} + C_{11} \sin^2 \theta + C_{33} \cos^2 \theta \\
&- \sqrt{[(C_{11} - C_{44}) \sin^2 \theta + (C_{44} - C_{33}) \cos^2 \theta]^2 + (C_{13} + C_{44})^2 \sin^2 2\theta}
\end{aligned} \tag{A15}$$

Dans notre cas en considérant un plan méridien, quelconque (par exemple Ox_2x_3) :

A1) Pour la direction transversale $\theta = 90^0$

Pour l'onde S avec la direction de polarisation perpendiculaire au plan méridien (c'est à dire en direction horizontale) à partir l'équation (A12) : $C_{66} = \rho V_{SH0}^2$

Pour l'onde S avec la direction de polarisation dans le plan méridien (c'est à dire en direction axiale) à partir l'équation (A15): $C_{44} = \rho V_{SV0}^2$

Puis pour l'onde P à partir l'équation (A14) : $C_{11} = \rho V_{P0}^2$

A2) Pour la direction axiale $\theta = 0^0$

L'onde transversale S avec la direction de polarisation perpendiculaire au plan méridien s'écrit dans l'équation (A12) donne : $C_{44} = \rho V_{S90}^2$

L'onde S avec la direction de polarisation dans le plan méridien exprimée dans l'équation (A15) donne: $C_{44} = \rho V_{S0}^2$

A partir de l'équation (A14), nous obtenons: $C_{33} = \rho V_{P0}^2$

A3) Pour la direction or d'axe θ^0

$$C_{13} = -C_{44} + \left[\frac{1}{\sin^2 2\theta} (2\rho V_{\theta}^2 - 2C_{11} \sin^2 \theta + C_{44} (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta - 1)) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A16)$$

Notons que les cinq modules élastiques indépendants sont reliés de manière biunivoque à cinq paramètres élastiques d'ingénieur, par exemple à deux modules de Young E_1 et E_3 , et trois coefficients de Poisson ν_{12} , ν_{13} , ν_{31} . Leur lien formel est donné par [POD 68] comme suivante :

$$E_1 = \frac{D}{c_{11}c_{13} - c_{13}^2} \quad ; \quad E_3 = \frac{D}{c_{11}^2 - c_{12}^2} \quad (A17)$$

$$\nu_{12} = \frac{c_{12}c_{33} - c_{13}^2}{c_{11}c_{33} - c_{13}^2} \quad ; \quad \nu_{13} = \frac{c_{13}(c_{11} - c_{12})}{c_{11}c_{33} - c_{13}^2} \quad ; \quad \nu_{31} = \frac{c_{13}}{c_{11} + c_{12}} \quad (A18)$$

avec le déterminant D est défini comme:

$$D = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} \end{vmatrix} \quad (A19)$$

Annexe B. Expression des composantes des tenseurs d'Eshelby

Dans cette annexe sont résumées les expressions analytiques du tenseur d'Eshelby dans le cas du milieu isotrope [MUR87]. Notons que dans le cas du milieu isotrope transverse, lecteurs sont invités aux travaux de [SAR06] et [HUY06] pour plus ample de détails.

B.1. Cas générale d'une inclusion sphéroïdale

Chaque inclusion sphéroïdale ayant de la forme ellipsoïdale de révolution autour de l'axe $\underline{x}_3$ est caractérisée par un rapport d'aspect ε :

$$\varepsilon = \frac{c}{a} = \frac{c}{b} \quad (\text{B1})$$

Ce type d'inclusion permet de représenter comme les cas particuliers des inclusions sphériques (où $\varepsilon = 1$) ou des fissures de type monnaie (*penny-shaped* où $\varepsilon \rightarrow 0$).

Considérons dans le cas général d'une inclusion aplatie ($\varepsilon < 1$ ou bien $a = b > c$) immergée dans un milieu isotrope dont le tenseur d'élasticité s'écrit [HUY06] :

$$C_1 = 3k_1 J + 2\mu_1 K \quad (\text{B2})$$

Ce tenseur d'élasticité est donc défini par son module de compression k_1 et son module de cisaillement μ_1 ou, de manière équivalente, par son module d'Young E_1 et son coefficient de Poisson ν_1 avec:

$$\begin{cases} 3k_1 = \frac{E_1}{1-2\nu_1} \\ 2\mu_1 = \frac{E_1}{1+\nu_1} \end{cases} \quad (\text{B3})$$

ou bien :

$$\begin{cases} E_1 = 9 \frac{k_1 \mu_1}{3k_1 + \mu_1} \\ \mu_1 = \frac{3k_1 - 2\mu_1}{2(3k_1 + \mu_1)} \end{cases} \quad (\text{B4})$$

Nous avons dans ce cas la solution célèbre du tenseur d'Eshelby qui est caractérisé par les 6 composantes suivantes (voir [HUY06]) :

$$\begin{aligned} S_{1111} &= QI_{11} + RI_1; \\ S_{3333} &= Q\varepsilon^2 I_{33} + RI_3; \\ S_{1122} &= QI_{12} - RI_1; \\ S_{1133} &= Q\varepsilon^2 I_{13} + RI_1; \\ S_{3311} &= QI_{13} - RI_3; \\ S_{2323} &= \frac{Q}{2}(1 + \varepsilon^2)I_{13} + \frac{R}{2}(I_1 + I_3); \\ S_{1212} &= \frac{1}{2}(S_{1111} - S_{1122}). \end{aligned} \quad (\text{B5})$$

où :

$$Q = \frac{3}{8\pi(1 - \nu_1)}; R = \frac{1 - 2\nu_1}{8\pi(1 - \nu_1)} \quad (\text{B6})$$

et :

$$I_1 = \begin{cases} 2\pi\varepsilon \frac{\arccos \varepsilon - \varepsilon\sqrt{1 - \varepsilon^2}}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}} & \text{si } \varepsilon < 1 \\ 2\pi\varepsilon \frac{\varepsilon\sqrt{1 - \varepsilon^2} - \cosh^{-1} \varepsilon}{(\varepsilon^2 - 1)^{3/2}} & \text{si } \varepsilon > 1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} I_3 &= 4\pi - 2I_1 \\ I_{13} &= \frac{I_1 - I_3}{3(\varepsilon^2 - 1)} \\ I_{12} &= \frac{\pi}{3} - \frac{I_{13}}{4} \\ I_{11} &= 3I_{12} \\ I_{33} &= \frac{4\pi}{3\varepsilon^2} - 2I_{13} \end{aligned} \quad (\text{B7})$$

En détail, nous avons les expressions explicites suivantes:

$$\begin{aligned}
S_{1111} &= \frac{\varepsilon\{[8\nu_1 - 13 + 4\varepsilon^2(1 - 2\nu_1)]\arccos \varepsilon + \varepsilon\sqrt{1 - \varepsilon^2}[19 - 8\nu_1 + 2\varepsilon^2(4\nu_1 - 5)]\}}{16(\nu_1 - 1)(1 - \varepsilon^2)^{5/2}}, \\
S_{3333} &= \frac{\varepsilon[1 - 2\nu_1 - 2\varepsilon^2(2 - \nu_1)]\arccos \varepsilon - \varepsilon\sqrt{1 - \varepsilon^2}[2(1 - \nu_1) - \varepsilon^2(5 - 2\nu_1)]}{2(\nu_1 - 1)(1 - \varepsilon^2)^{5/2}}, \\
S_{1122} &= \frac{\varepsilon\{[1 - 8\nu_1 - 4\varepsilon^2(1 - 2\nu_1)]\arccos \varepsilon + \varepsilon\sqrt{1 - \varepsilon^2}[1 + 8\nu_1 + 2\varepsilon^2(1 - 4\nu_1)]\}}{16(\nu_1 - 1)(1 - \varepsilon^2)^{5/2}}, \quad (B8) \\
S_{1133} &= \frac{\varepsilon\{[1 - 2\nu_1 + 2\varepsilon^2(1 + \nu_1)]\arccos \varepsilon - \varepsilon\sqrt{1 - \varepsilon^2}[3 - 2\nu_1(1 - \varepsilon^2)]\}}{4(\nu_1 - 1)(1 - \varepsilon^2)^{5/2}}, \\
S_{3311} &= \frac{\varepsilon[1 + 4\nu_1 + 2\varepsilon^2(1 - 2\nu_1)]\arccos \varepsilon - \varepsilon\sqrt{1 - \varepsilon^2}[3\varepsilon^2 + 4\nu_1(1 - \varepsilon^2)]}{4(\nu_1 - 1)(1 - \varepsilon^2)^{5/2}}, \\
S_{1212} &= \frac{\varepsilon\{[8\nu_1 - 7 + 4\varepsilon^2(1 - 2\nu_1)]\arccos \varepsilon + \varepsilon\sqrt{1 - \varepsilon^2}[9 - 8\nu_1 - 2\varepsilon^2(3 - 4\nu_1)]\}}{16(\nu_1 - 1)(1 - \varepsilon^2)^{5/2}}, \\
S_{2323} &= \frac{\varepsilon[2 - \nu_1 + \varepsilon^2(1 + \nu_1)]\arccos \varepsilon + \varepsilon\sqrt{1 - \varepsilon^2}[(2 + \varepsilon^4)(\nu_1 - 1) - 3\nu_1\varepsilon^2]}{4(\nu_1 - 1)(1 - \varepsilon^2)^{5/2}},
\end{aligned}$$

Il s'agit en effet un tenseur de type isotrope transverse. D'ailleurs ce tenseur possède une symétrie mineure ($S_{ijkl} = S_{jikl} = S_{ijlk}$). Ainsi les autres composantes non nulles du tenseur peuvent être obtenues à partir de l'expression (B8) lorsqu'on effectue une permutation entre l'axe 1 et l'axe 2 et une permutation entre les deux premiers indices et/ou les deux derniers (la propriété de l'isotrope transverse, par exemple $S_{2222} = S_{1111}$ ou encore $S_{3131} = S_{1313} = S_{1331} = S_{2323}$ etc...). Toutes les composantes dont les indices ne peuvent se ramener, par ce procédé, à ceux de l'une des expressions (B8) sont nulles.

B.1.1. Cas de l'inclusion sphérique

Dans le cas où l'inclusion est sphérique ($\varepsilon = 1$), le tenseur d'Eshelby devient isotrope et s'écrit :

$$S^E = \frac{3k_1}{3k_1 + 4\mu_1} J + \frac{6}{5} \frac{k_1 + 2\mu_1}{3k_1 + 4\mu_1} K = \frac{1 + \nu_1}{3(1 - \nu_1)} J + \frac{2}{15} \frac{4 - 5\nu_1}{1 - \nu_1} K \quad (B9)$$

Plus précisément, nous avons :

$$\begin{aligned}
S_{1111} &= S_{2222} = S_{3333} = \frac{7-5\nu_1}{15(1-\nu_1)} \\
S_{1122} &= S_{2233} = S_{3311} = S_{1133} = S_{2211} = S_{3322} = \frac{5\nu_1-1}{15(1-\nu_1)} \\
S_{1212} &= S_{2323} = S_{3131} = \frac{4-5\nu_1}{15(1-\nu_1)}
\end{aligned} \tag{B10}$$

Ainsi nous obtenons le tenseur de Hill :

$$P = \frac{1}{3k_1 + 4\mu_1} J + \frac{3}{5\mu_1} \frac{k_1 + 2\mu_1}{3k_1 + 4\mu_1} K = \frac{1+\nu_1}{3E_1(1-\nu_1)} \left[(1-2\nu_1)J + \frac{2}{5}(4-5\nu_1)K \right] \tag{B11}$$

B.1.2. Cas de l'inclusion "penny shaped"

Lorsque l'inclusion a de la forme monnaie ($\varepsilon \rightarrow 0$), nous avons les composantes suivantes du tenseur d'Eshelby qui sont données dans les travaux de Mura [MUR87]:

$$\begin{aligned}
S_{1111} &= S_{2222} = \pi\varepsilon \frac{13-8\nu_1}{32(1-\nu_1)} & S_{3333} &= 1 - \frac{\pi\varepsilon}{4} \frac{(1-2\nu_1)}{(1-\nu_1)} \\
S_{1122} &= S_{2211} = \pi\varepsilon \frac{8\nu_1-1}{32(1-\nu_1)} & S_{1133} &= S_{2233} = \pi\varepsilon \frac{2\nu_1-1}{8(1-\nu_1)} \\
S_{3311} &= S_{3322} = \frac{\nu_1}{1-\nu_1} \left(1 - \pi\varepsilon \frac{4\nu_1+1}{8\nu_1} \right) & S_{1212} &= \pi\varepsilon \frac{7-8\nu_1}{32(1-\nu_1)} \\
S_{1313} &= S_{2323} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\pi\varepsilon}{4} \frac{(\nu_1-2)}{(1-\nu_1)} \right)
\end{aligned} \tag{B13}$$

Particulièrement, dans le cas du milieu isotrope affaibli par une fissure ouverte nous avons les composantes non nulles du tenseur de localisation définie dans la formule I.26 du premier chapitre [ZHU06]:

$$A_{3311} = A_{3322} = \frac{4\nu_i(1-\nu_i)}{\pi(1-2\nu_i)}, \quad A_{3333} = \frac{4(1-\nu_i)^2}{\pi(1-2\nu_i)}, \quad A_{1313} = A_{2323} = \frac{2(1-\nu_i)}{\pi(2-\nu_i)}; \tag{B14}$$

Truong Son BUI

Caractérisation et modélisation de l'endommagement des géomatériaux par méthode ultrasonore

Résumé:

Ce travail de recherche est consacré à l'étude de l'endommagement des géomatériaux en utilisant la méthode non destructive par ultrasons. Pour atteindre cet objectif, nous développons dans un premier temps un dispositif à ultrasons modern et novateur qui, en combinant avec un système de sollicitation mécanique, permet de caractériser le processus de l'endommagement du matériau au cours des essais telle que la compression uniaxiale/triaxiale. Plus précisément, le système ultrasonore construit comporte 96 voies et au cours des essais il est capable de mesurer de manière continue les trois types des ondes grâce aux capteurs piézoélectriques spécifiques.

L'application de ce système ultrasonore à la caractérisation de l'endommagement des géomatériaux à matrice cimentaire a montré l'efficacité de cette approche. Au cours des essais de compression uniaxiale, l'évolution de la vitesse et de l'atténuation de trois types d'onde a été mise en évidence comme conséquence de l'endommagement au sein du matériau.

Nous nous intéressons dans un deuxième temps l'application du système ultrasonore à capturer les images d'endommagement progressif à travers les tomographies des vitesses et de l'atténuation des ondes. L'étude sur les éprouvettes de mortier donne des résultats concordants avec les observations, surtout à la rupture, bien que la résolution reste assez grossière.

La dernière partie de ce travail de recherche vise à modéliser l'endommagement du matériau par une approche dite changement d'échelle. Un modèle conceptuel est proposé pour ce type de matériau qui permet de prendre en compte deux mécanismes principaux d'endommagement : la propagation des fissures au sein de la matrice cimentaire et la décohésion entre les inclusions et la matrice. Via un schéma d'homogénéisation en deux étapes, l'influence de ces mécanismes sur l'évolution des vitesses des ondes ultrasonores a été élucidée. Une comparaison des prédictions numériques avec les résultats expérimentaux permet de valider le modèle utilisé.

Mots-clés : ultrasons, tomographie, endommagement, anisotropie, géomatériaux, approche micromécanique

Characterization and modeling of damage geomaterials by ultrasonic method

Summary:

This research is devoted to study the damage of geomaterials using the nondestructive method like ultrasound. To this aim, we develop in the first step a modern and innovative system of ultrasound which, in combining with a mechanical system, can characterize the process of damage in material during the tests such as uniaxial/triaxial compression. More specifically, our ultrasonic system comprises 96 channels and can be able to measure continuously the three types of waves thanks to the specific piezoelectric sensors. The application of the developed system for characterization of the damage of a cement-based géomatériaux showed the efficacy of this approach. Under uniaxial loading, the evolution of the ultrasonic velocities and the attenuation of three types of wave have been detected as a result of damage within the material. We are interested in the second step the application of the ultrasonic system on the tomography (such as the velocities and attenuation) of damage during loading of materials. The study on some mortar specimens give good agreement between the obtained results and the observations, especially at failure, although the resolution is fairly coarse. The last part of this research is to model the damage of material by using a so-called up-scaling approach. A conceptual model is proposed for this type of material that allows to take into account two main damage mechanisms: crack in the cement matrix and debonding effect between the matrix and inclusions. Via a scheme of homogenization in two steps, the impact of such mechanisms on the evolution of velocities of the ultrasonic waves has been elucidated. The comparison of numerical predictions with experimental results allows validating the model.

**L'Institut Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes,
Mécanique et Énergétique (PRISME)**