HAL
open science

Caractérisation des matériaux complexes et de leurs endommagements par la technique de la coda ultrasonore alliée à l'acoustique non linéaire

Souad Toumi

To cite this version:

Souad Toumi. Caractérisation des matériaux complexes et de leurs endommagements par la technique de la coda ultrasonore alliée à l'acoustique non linéaire. Acoustique [physics.class-ph]. Le Mans Université; Université des Sciences et de la Technologie Houari-Boumediène (Algérie), 2017. Français. NNT : 2017LEMA1024 . tel-02310392

HAL Id: tel-02310392

https://theses.hal.science/tel-02310392

Submitted on 10 Oct 2019

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

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

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

Le Mans Université

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

Thèse de Doctorat

Souad TOUMI

Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de Le Mans Université
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

École doctorale : SPIGA

Discipline : Physique
Spécialité : Acoustique
Unité de recherche : Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine— UMR CNRS 6613

Soutenue le 15/06/2017
Thèse N° :

Titre de la thèse

CARATERISATION DES MATERIAUX COMPLEXE ET DE LEURS ENDOMMAGEMENTS PAR LA TECHNIQUE DE LA CODA ULTRASONORE ALLIEE A L'ACOUSTIQUE NON LINEAIRE

JURY

Rapporteurs :	**Mohamed hédi BEN GHOZLENE**, Professeur, Université de Sfax. **Redouane DRAI**, Directeur de recherche CSC-Alger, Algérie
Examinateurs :	Tarek BOUTKEDJIRT**,** Professeur, Université des Sciences et de la Technologie, Algérie. **Charfeddine MECHRI**, Past, LAUM-CTTM, Université du Maine,France. **Mohamed KECHOUANE**, Professeur, Université des Sciences et de la Technologie, Algérie.
Invité(s) :	**Prénom NOM**, Titre, Etablissement **Prénom NOM**, Titre, Etablissement
Directeur de Thèse : Co-directeur de Thèse :	**Rachid ELGUERJOUMA**, Professeur, Université du Maine, France. Mourad BENTAHAR, HDR, Université du Maine, France. Fouad BOUBENIDER, Professeur, Université des Sciences et de la Technologie, Algérie.

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

Le Mans Université

Thèse de Doctorat

Souad TOUMI

Caractérisation non destructive des matériaux complexes et de leurs endommagements par la technique de la coda ultrasonore alliée a l'acoustique non linéaire

Non destructive characterization of complex materials and their damages by ultrasonic coda technique combined with non linear acoustics Title of thesis

Résumé

Nous nous intéressons, dans cette étude, à la caractérisation d'un défaut en développe une méthode ultrasonore basée sur la diffusion multiple des ondes. Pour cela, nous avons utilisé un béton base polymère endommagé par un essai de flexion en trois points. La technique d''Interférométrie par Onde de Coda (CWI) prend en compte les ondes issues de la diffusion multiple et qui parcourent de ce fait une distance très grande devant celle séparant la source et du récepteur. Cette technique montre la sensibilité de la coda quand le matériau est soumis en résonance non linéaire où l' influence des conditions de l' environnement est considéré comme limité par l' utilisation d' un signal différent de référence. Les résultats expérimentaux ont montré que l' efficacité de la méthode dépend du plan de vibrations considérées. Dans le but d'étudier l' anisotropie d' un défaut créé dans un béton base polymère nous avons utilisé les données de l''Emission Acoustique (EA) récoltées au cours d' essais acoustiques en Résonance Non Linéaire pour les deux plans. L' existence d'une différence entre les signaux enregistrés au cours de mesures de l' EA montrent que nous produisons différents micro-mécanismes dont la présence et / ou l'absence ont un impact important sur l'interaction entre l'onde ultrasonore et le défaut.

Mots clés
Coda, diffusion multiple, résonance non linéaire, milieu multi-diffusant, émission acoustique, béton, endommagement, interférométrie par onde de coda.

Abstract

Nonlinear Resonance (NR) and Coda Wave Interferometry (CWI) have proved to be efficient to detect and follow the evolution of micro-cracks within a strongly scattering media (concrete, rocks, etc.). Nevertheless, the localization of the cracks using the same techniques is not straightforward. In order to avoid the conditioning and its subsequent relaxation effect related to NR, CWI is simultaneously applied when concrete samples are vibrating in the linear regime. Based on a comparative study of the coda signals contents (non ballistic part) in the absence and under the weak linear vibration, the localization of the mechanically induced scatterers was possible depending on the scatterers' main direction with respect to the vibration plane. The latter point raises the issue of the generated types of vibration at the scatterers. Therefore, investigations were performed using the Acoustic Emission (AE) technique, which has served to verify that the acoustic activity during the linear vibrations does change depending on the considered experimental configuration. The latter, has also a direct effect on the frequency content of the recorded AE hits showing the potential link existing between the quantitative analysis of AE hits and the generated vibration mechanisms of the existing micro-cracks.

Key Words
Concrete, coda wave interferometry, Multi-scattered acoustic waves, .Nonlinear resonance., Damage, Acoustique emission, Coda, strongly scattering media

L'Université Bretagne Loire

N° d'ordre: 10/2017-D/PH

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie, Houari Boumediene

THESE DE DOCTORAT EN COTUTELLE

Présentée dans le cadre d'une cotutelle pour l'obtention du grade de doctorat
EN PHYSIQUE

Spécialité :
Matériaux & Composants

Par :

Mme. TOUMI Souad

Sujet :

CARACTERISATION NON DESTRUCTIVE DES MATERIAUX COMPLEXES ET DE LEURS ENDOMMAGEMENTS PAR LA TECHNIQUE DE LA CODA ULTRASONORE ALLIEE A L'ACOUSTIQUE NON LINEAIRE

Soutenue publiquement, le 15/06/2017, devant le jury composé de :

Mr. M. KECHOUANE	Professeur à l'U. S. T. H. B, Algérie	Président
Mr. F. BOUBENIDER	Professeur à l'U. S. T. H. B, Algérie	Directeur de thèse
Mr. M. BENTAHAR	Maître de conference à l'Université du Maine, France	Co-directeur de thèse
Mr. T. BOUTKEDJIRT	Professeur à l'U. S. T. H. B, Algérie	Examinateur
Mr. C. MECHRI	Maître de conference à l'Université du Maine, France	Examinateur
Mr. M. BEN-GHOZLENE	Professeur à l'Université de Sfax, Tunisie	Examinateur
Mr. R. DRAI	Directeur de recherche CRT- Alger, Algérie	Invité
Mr. R. EL GUERJOUMA	Professeur à l'Université du Maine, France	Invité

REMERCIEMENTS

Cette thèse, a été effectuée dans le cadre d'une cotutelle entre l'Université du Maine (France) et l'Université des Science et de la Technologie Houari Boumediene (Algérie), depuis 2011. Il m'est aujourd'hui possible de mesurer ce chemin que je n'aurais pu parcourir seule.

Je tiens avant tout à remercier les principaux acteurs de cette thèse, Dr. ***BENTAHAR Mourad****, Pr.* ***BOUBENIDER Fouad*** *et le Pr.* ***El GUERJOUMA Rachid*** *pour leur encadrement. Je suis particulièrement très reconnaissante à* ***BENTAHAR Mourad*** *pour ses conseils avisés et critiques constructives qui ont été des atouts majeurs pour la réalisation de ce travail.*

C'est un honneur pour moi que monsieur ***M. KECHOUANE,*** *Professeur à l'U.S.T.H.B., ait accepté d'être président de ce jury. Je l'en remercie vivement.*

Je remercie vivement monsieur ***T. BOUTKEDJIRT,*** *Professeur à l'U.S.T.H.B., d'avoir accepté de juger ce travail.*

Mes remerciements vont aussi à monsieur ***C. MECHRI****, PAST au LAUM-CTTM à l'Université du Maine, qui a accepté d'examiner ce travail. Je profite pour lui exprimer, en cette occasion, ma profonde reconnaissance pour m'avoir autant apporté scientifiquement, pour tous les conseils avisés qu'il a bien voulu me donner.*

Je remercie également monsieur ***M. BEN-GHOZLENE****, Professeur à l'Université de Sfax, Tunis, pour avoir accepté de juger ce travail.*

Je remercie chaleureusement monsieur ***R. DRAI,*** *Directeur de recherche au CRTI-Alger, Algérie, d'avoir accepté de participer au jury.*

Ce travail n'aurait pas pu être réalisé sans l'aide de nombreuses personnes, je tiens à témoigner ma gratitude au monsieur ***A. EL MAHI,*** *Docteur à l'Université du Maine, pour la réalisation de mes échantillons.*

Je remercie de tout mon cœur ma très chère amie ***Lamia LAIDOUDI****, avec laquelle j'ai partagé des moments inoubliables tout au long de cette expérience et qui m'a toujours soutenue et encouragée.*

Je tiens à souligner que mon séjour au sein du LAUM s'est déroulé dans de très bonnes conditions. J'ai été accueillie de façon très agréable et conviviale par les chercheurs du LAUM, les post-doctorants. Je tiens à les en remercier, et plus particulièrement ***Yousra Baccouche*** *et* ***Soumaya Elleuch.***

Je remercie chaleureusement tous mes collègues de l'équipe qui ont su créer l'ambiance favorable à la réalisation de ce travail ***M. AIT OUARABI****;* ***S. SAIT*** *et* ***H. ZITOUNE****,* ***M. MEBARKI****,* ***F. LAIDOUDI, S. YOUNSI, S. MAYOUT****,* ***S. GACHI, H. DAOUI****,* ***S. TALEB, R. LOUNI, R. REZOUG*** et ***A. BENNAMENE, A. DAHEL*** *pour leur soutien et leurs encouragements.*

à mon cher mari, qui m'a soutenue jusqu'à la fin,

à mes trésors Khadidja et Racim,

à mes parents, que je chérie par dessus tout,

à toute ma famille et belle famille

Table des matières

Remerciements

Table des matières

Introduction générale 1

1. Matériaux & Endommagement

1. 1. Introduction 5

1. 2. Béton cimentaire 5

1. 3. Béton polymère 6

1. 4. Propriétés mécaniques linéaire 7

1. 5. Propriétés mécaniques non linéaires classiques 10

1. *5.1.* Physique *mésoscopique* 11

1. 6. Endommagement 11

1. 6. 1. Mécanismes d'endommagement 12

1. 6.2. Essais mécaniques 14

6.2. 1. Comportement en compression uniaxial 14

6.2. 2. Comportement en traction 16

1. 7. Emission Acoustique 18

1. 7.1. Emission Acoustique discrète : 19

1. 7.2. Emission Acoustique continue : 19

1. 8. Méthode de détection de l'endommagement 20

Références bibliographiques 22

2. Méthodes de détection/dimensionnement/localisation

2. 1. Introduction 26

2. 2. Résonance Non Linéaire 27

2. 2. 1. Dynamique rapide 28

2. 2. 2. Dynamique lente 28

2. 3. Non linéarité classique 28

2. 3. 1. Définition des paramètres non linéaires classique 29

2. 3. 2. Non linéarité non classique 31

2. 3. 3. Définition des paramètres non linéaires hystérétiques 33

2. 4. Vibration en flexion d'une poutre encastrée-libre 35

2. 4.1. Equation des poutres 35

2. 4. Génération d'harmoniques 37

2. 5. Méthode SSM “Scaling Subtraction Method”..... 39
2. 5. Méthode d’interférométrie par onde de Coda..... 40
2. 5.1. Théorie de CODA 41
2. 6. Conclusion..... 44
Références bibliographie..... 45

3. Caractérisation de l’endommagement du béton base polymère

3. 1. Introduction 50
3. 2. Matériau et endommagement 50
3. 2. 1. Elaboration du béton polymère 50
3. 2. 2. Essai mécanique et endommagement du béton polymère..... 51
3. 3. Caractérisation de l’endommagement 52
3. 3. 1. Caractérisation de l’endommagement par résonance..... 53
3. 3. 2. Approche multimodale : motivée par le caractère localisé de l’endommagement..... 53
3. 4. Dispositif expérimental 56
3. 4.1. Résultats..... 57
3. 4.1. 1. Dynamique rapide..... 57
3. 4.1. 2. Dynamique lente..... 58
3. 5. Caractérisation de l’endommagement par Interférométrie d’Ondes Coda (CWI)..... 60
3. 5.1. Approche classique 60
3. 5.1.1. Dispositif expérimental..... 60
3. 5. 1. 2. Coefficient de corrélation 61
3. 5. 3. Résultats..... 61
3. 6. Application simultanée de la CWI et de la résonance non linéaire pour la caractérisation de l’endommagement..... 62
3. 7. CWI en présence d’une résonance non linéaire..... 63
3. 8. Localisation d’un défaut mésoscopique dans un béton base polymère 66
3. 8. 1. Dispositif expérimental pour mettre en évidence la résonance..... 66
3. 8. 2. Résultats..... 67
3. 9. CWI en presence d’une résonance linéaire 68
3. 9. 1. Résultats et discussion..... 69
3. 10. Sensibilité des modes à l’endommagement..... 71
3. 11. Temps de relaxation et configuration expérimentale 72
3. 11. 1. Résultats..... 73
3. 12. Choix de la fréquence de la coda..... 74

3. 12. 1. Résultats expérimentaux 75
3. 13. Localisation de défaut..... 75
3. 13. 1. CWI simultanément avec la résonance linéaire 75
3. 13. 1. 1. Coefficient de décorrélation *K*..... 77
3. 14. Sensibilité de mode à caractériser le défaut..... 79
3. 15. Conclusion..... 79
Référence bibliographique 81

4. Caractérisation de l'endommagement par émission acoustique

4. 1. Introduction 84
4. 2. Imagerie par ultrasons sans contact de la zone endommage 84
4. 4. Méthode d'analyse des signaux d'EA 88
4. 5. Mécanismes d'endommagement des matériaux composites 89
4. 5. 2. Béton polymère 91
4. 6. Analyse temporelle des signaux d'EA 91
4. 7. Mécanismes acoustiques non linéaires 93
4. 7. 1. Clapping 94
4. 7. 2. stick-Slip 94
4. 8. Etude expérimentale de l'endommagement à l'aide de l'EA et la résonance non linéaire 95
4. 8.1. Présentation du dispositif expérimental 95
4. 8. 2. Paramétrage du logiciel d'acquisition 97
4. 9. Résultats et discussions 98
4. 9.1. Activité acoustique..... 98
4. 10. Conclusion..... 105
Références bibliographiques 106

Conclusion générale et perspective 111

Introduction générale

Grace à ses qualités de durabilité, de résistance mécanique et environnementale, le matériau granulaire de type béton est aujourd'hui le matériau le plus utilisé dans le monde. Le matériau granulaire base polymère fait l'objet d'un intérêt croissant, du fait de sa large gamme d'applications possibles, notamment dans le génie civil.

Les applications initiales du béton polymère, vers la fin des années 50, concernaient la production de revêtement de bâtiment, la confection de mortier pour sols industriels résistant aux agressions physiques ou chimiques, de revêtement antidérapant pour routes, d'enduit pour murs extérieurs (panneaux de granulats apparents, etc.) et de matériau de réfection pour des surfaces endommagées. Le béton polymère armé de fibres de verre, de carbone ou de bore sert à la fabrication de panneaux translucides.

En raison du coût généralement élevé des matériaux composites, un effort particulier est fait en direction d'une réduction des coûts de fabrication afin, d'optimiser les processus d'élaboration et les propriétés d'usage. Un autre point important est le comportement à long terme de ces matériaux. Un effort important a été fait ces dernières années pour prolonger la durée de vie des structures en matériaux composites et prévoir dans le cas échéant leur rupture. D'une façon générale, la durabilité de ces matériaux fortement hétérogènes et d'une grande complexité structurale n'est pas encore maîtrisée alors qu'elle est au cœur des problèmes de sécurité des grandes structures technologiques. Plus particulièrement, ces matériaux subissent au cours de leur fabrication et de leur vie plusieurs contraintes pouvant les fragiliser : elles sont soumises aux variations de température (contrainte-dilatation), à la corrosion, aux séismes, etc. La présence de l'endommagement dans ces structures pourrait conduire à des catastrophes écologiques. Les réparations post-fabrication et après mise en fonctionnement, conduisent à des pertes financières importantes. Il est donc nécessaire de pouvoir contrôler ces pièces, de préférence, lors de leur fabrication mais aussi in situ afin, de dépister et de localiser la présence de l'endommagement sans détruire la pièce.

Les techniques de caractérisation non destructive du béton sont nombreuses et ne sont pas toutes sensibles aux mêmes paramètres. Parmi celles-ci, les techniques ultrasonores semblent être les plus adaptées. En effet, les mécanismes de propagation des ondes sont directement dépendants du milieu traversé et leur facilité de mise en œuvre sur les structures déjà existantes rend ces techniques particulièrement attractives pour des mesures in situ.

Les méthodes issues de l'acoustique non linéaire présentent également un fort intérêt dans le cadre de la caractérisation de fissures. En effet, les techniques linéaires classiques (vitesse, atténuation) ont une sensibilité limitée, l'évolution des paramètres mesurés ne devient significatifs que tard dans le processus d'évolution de la microstructure. Il existe diverses techniques d'estimation des indicateurs de non linéarité telles que la génération d'harmoniques, le suivi de la fréquence de résonance et l'interférométrie par onde coda ou C.W.I. (Coda Wave Interferometry).

L'objectif de cette thèse est de caractériser des fissures crées dans des matériaux complexes tels que le béton polymère, moyennant la coda non linéaire. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une cotutelle entre l'Université du Maine (France) et l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB-Algérie). La partie expérimentale a été effectuée entièrement au sein du Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM).

Nous avons utilisé la résonance non linéaire dans une configuration encastré-libre dans le but d'identifier les modes de résonance des différents échantillons étudiés dans les deux dispositions de l'échantillon. Dans notre travail, il s'agit d'une disposition côté épaisseur appelée « position verticale » et d'une disposition côté largeur, appelée « position horizontale ». Ces essais ont permis de mettre en évidence le comportement du matériau moyennant des mesures en résonance dites de dynamique rapide où il a été possible de vérifier l'influence d'un endommagement localisé sur les variations des paramètres (fréquence, facteur de qualité) pour des niveaux d'excitation dynamique croissant, où l'endommagement du béton a été effectué à l'aide d'un essai de flexion trois points. Cela a permis de générer des microfissures, essentiellement, orientées dans la direction de la force appliquée, où l'angle de déviation de la fissure, lors de sa propagation, reste raisonnablement faible. Il a été ainsi possible d'apprécier, via la variation de la fréquence de résonance en fonction du temps, la relaxation du béton pour différents modes de résonance. Ces essais de dynamique rapide et lente ont permis de bien maîtriser les excitations de façon à éviter des changements dans le module d'élasticité du matériau étudié.

Par la suite, nous avons effectué des mesures de coda en présence d'une résonance linéaire pour les deux dispositions de l'échantillon. Cela a eu pour avantage d'attribuer les changements observés sur les signaux de coda au comportement de fissures. Pour augmenter la sensibilité de la technique à détecter et localiser l'endommagement, nous avons réalisé un scan à différentes positions le long du béton polymère, qui est limité par la taille du

transducteur dans le cas des mesures par contact. Ainsi, la génération d'une impulsion ultrasonore en l'absence et en la présence d'une vibration linéaire a permis de vérifier l'existence d'une variation dans la coda des signaux ultrasonores et ce même pour des niveaux d'excitation très faibles. Par ailleurs, les outils développés lors de ces mesures par contact peuvent être automatisés et ce pour imager le défaut lors de mesures automatisées, sans contact, basées sur la propagation d'ondes ultrasonores centrées à 500 kHz. Ces expériences ont montré qu'il est possible d'utiliser la coda issue d'une onde ultrasonore aérienne en présence d'une résonance linéaire et ce pour visualiser les zones endommagées dans un matériau fortement hétérogène.

En effet, ces essais sont motivés par la sensibilité des méthodes en résonance aux plans d'excitation qui dans le cas de fissures orientées génèrent différents mécanismes non linéaires. Pour vérifier ces hypothèses, l'émission acoustique (EA) a été utilisée dans le cas où les fissures sont sollicitées en mode « clapping » et en mode « slip-stick ».

La thèse est organisée en quatre chapitres:

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique nécessaire à l'étude du comportement des matériaux granulaires. Il est divisé essentiellement en trois parties. La première partie comporte une présentation générale des matériaux granulaires utilisés dans le domaine du génie civil. La deuxième partie a pour but de définir les différents types d'endommagements et présente des généralités ainsi que les principales applications d'EA. Enfin, nous présenterons les moyens non destructifs et d'évaluations ultrasonores utilisés pour la caractérisation de l'endommagement des matériaux granulaires.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique nécessaire sur l'étude des différentes techniques acoustique non linéaire qui peuvent caractériser un défaut mésoscopique dans un milieu fortement hétérogène tel que la résonance non linéaire, génération d'harmonique et la technique d'interférométrie par onde de coda.

Le troisième chapitre est partagé en trois parties. La première est une présentation du matériau, de son élaboration et de la méthode utilisée pour l'endommager. La deuxième partie est consacrée à la caractérisation des microfissures en utilisant les différentes techniques telles que la résonance non linéaire, l'interférométrie par onde de coda et une autre technique originale qui consiste à caractériser l'endommagement par interférométrie par onde coda lorsque l'échantillon est en résonance linéaire. Enfin, nous discutons les résultats obtenus.

Dans le quatrième chapitre, nous employons l'imagerie par ultrasons sans contact de la zone endommagée et l'EA associée à une vibration modale de faible amplitude. L'objectif de ce chapitre n'est pas de créer une bibliothèque de signaux pour fusionner les données relatives aux signaux d'EA. Nous nous intéressons plutôt à l'étude du comportement d'un défaut mésoscopique créé dans un béton base polymère et ce, à l'aide des données de l'EA récoltés au cours d'essais acoustiques en résonance non linéaire. Cependant, avant d'étudier ce lien, nous rappellons d'abord les mécanismes acoustiques non linéaires pouvant être impliqués dans un pareil essai dynamique.

Nous terminons enfin, par une conclusion générale et par les perspectives qu'ouvre ce travail.

Chapitre 1

Matériaux & Endommagement

Sommaire

1. 1. Introduction 5
1. 2. Béton cimentaire 5
1. 3. Béton polymère 6
1. 4. Propriétés mécaniques linéaire 7
1. 5. Propriétés mécaniques non linéaires classiques 10
1. *5.1.* Physique *mésoscopique* 11
1. 6. Endommagement 11
1. 6. 1. Mécanismes d'endommagement 12
1. 6.2. Essais mécaniques 14
6.2. 1. Comportement en compression uniaxial 14
6.2. 2. Comportement en traction 16
1. 7. Emission acoustique 18
1. 7.1. Emission acoustique discrète 19
1. 7.2. Emission acoustique continue 19
1. 8. Méthode de détection de l'endommagement 20
Références bibliographiques 22

1. 1. Introduction

Les avancées réalisées dans la connaissance de la structure du béton et de sa formulation ont permis d'améliorer largement ses performances. La conséquence de ces études est l'apparition de plusieurs matériaux granulaires consolidés comprenant le béton ordinaire, le béton à hautes performances (BHP), le béton modifié aux résines (Béton imprégné de résine et Béton additionné de résine), le béton de résine (époxy, polyester, etc.), les enrobés bitumineux, etc. Ce chapitre est consacré à une synthèse bibliographique nécessaire à l'étude des matériaux granulaires de type béton. Il est divisé essentiellement en trois parties. La première partie comporte une présentation générale des matériaux granulaires utilisés dans le domaine du génie civil. La deuxième partie a pour but de définir les différents types d'endommagements et présente des généralités sur de l'Emission Acoustique (**EA**). Enfin, nous présentons les moyens non destructifs ultrasonores utilisés pour la caractérisation de l'endommagement des matériaux granulaires.

1. 2. Béton cimentaire

La fabrication du béton nécessite deux ingrédients de base : D'une part, les granulats, qui vont constituer le squelette granulaire et représentent environ les deux tiers du béton en volume. Ils sont considérés comme un renfort mécanique. D'autre part, la pâte de ciment considérée comme matrice, qui va coller ou consolider les granulats entre eux **[TORR 14]**.

- Les granulats sont les plus gros constituants du béton et peuvent provenir de différentes roches inertes **[DREU 98]** (Silico-calcaires, basaltes, granites,…etc.). Ils représentent environ 50% en masse du béton complet. Ils peuvent être « roulés » (Granulats issus du lit des rivières) et avoir alors une forme arrondie ou « concassée» (issues des carrières) et avoir des formes angulaires. Leurs dimensions sont déterminées par criblage sur des tamis à mailles carrées. Classiquement, leur granulométrie peut varier de 5 mm à 20 mm voire plus **[CHEK 08]**.
- Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau et forme une matrice solide qui lie les granulats entre eux. Il est formé d'une structure complexe poreuse, source d'échanges internes et externes.

Lorsqu'on s'intéresse à la microstructure (mélange de granulats et de pâte de ciment) d'un béton bien formulé (**Fig1.1**), on observe un matériau relativement isotrope, dans le sens où il n'y a pas d'orientation privilégiée comme sur un matériau à fibre longues par exemple **[CHAM 09]**.

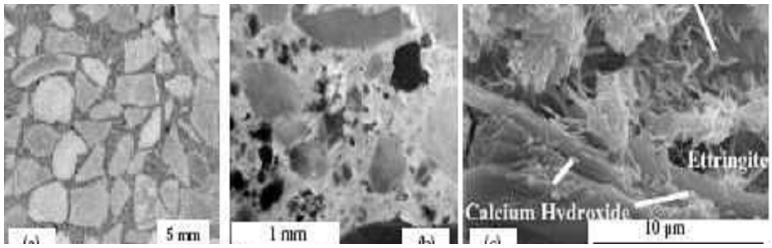


Figure 1. 1 : Structure multi-échelles de béton d'après **[AUVR 03]**.

Dès le début du processus de durcissement, des efforts internes sont induits par les propriétés mécaniques des différents granulats et de la matrice au cours de durcissement. Ces efforts internes favorisent l'apparition de ruptures internes que l'on peut qualifier de microfissures. Ces microfissures font partie intégrante de la structure interne des matériaux granulaires consolidés au même titre que les inclusions et les porosités **[BERB 10]**.

1. 3. Béton polymère

Le béton polymère est constitué de charges minérales (granulat, sable, etc.) et d'un liant en polymère. On l'appelle aussi béton de résine synthétique ou béton de résine plastique. Avec le développement des nouvelles technologies de conception et de réalisation, l'heure est à la construction d'habitation à structures légères. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, les bétons à base de granulats légers, connaissent un véritable regain d'intérêt à travers le monde **[CISS 96, BERR 99, PATE 91, GAYE 01, KONG 82, MARM 95]**. Beaucoup d'économies peuvent en résulter. En effet, le poids des structures en béton normal est très élevé comparé à la charge normale qu'elles peuvent supporter. Une réduction relativement modeste en poids peut assurer une économie considérable en argent et en main d'œuvre. Ces matériaux résistent bien à l'abrasion et possèdent une grande stabilité aux cycles gel-dégel. En outre, comme ils ont une plus grande résistance mécanique que le béton de ciment portland, ils concurrencent le béton conventionnel. La résistance aux agents chimiques et les caractéristiques mécaniques dépendent essentiellement de la nature du polymère utilisé et de la quantité de charge. Lorsque la charge est de sable, le composite obtenu est appelé mortier de résine. Parmi les autres matériaux de charge, on trouve : la pierre concassée, le gravier, le calcaire, la craie **[BERB 10]**.

La caractérisation non destructive des matériaux granulaire, type béton, par propagation d'ondes ultrasonores permet d'accéder aux constantes élastiques voire, aux atténuations, pour caractériser l'état de santé du matériau granulaire.

1. 4. Propriétés mécaniques linéaires

La déformation locale du solide autour d'un point M, dont la position est repérée par x_i avant la déformation et $x_i^{'}$ après la déformation, s'exprime comme la différentielle du vecteur déplacement : $u_i = x_i^{'} - x_i$.

Le tenseur des déformations ε_{ij} est donné en fonction des déplacements u_i par la relation suivante **[BRUN 06a, DIEU 74]** :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i}\frac{\partial u_k}{\partial x_j}\right) \qquad \textbf{(1. 1)}$$

Les indices i, j, k et l varient de 1 à 3

Dans le cas des faibles déformations, on néglige le terme d'ordre deux $\frac{\partial u_k}{\partial x_i}\frac{\partial u_k}{\partial x_j}$ par rapport au terme du premier ordre dans l'expression (1.1). L'équation du tenseur des déformations en fonction du champ de déplacement devient :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i}\right) \qquad \textbf{(1. 2)}$$

Les déformations subies par un milieu matériel sont reliées aux contraintes résultant des efforts extérieurs appliqués sur ce milieu par une loi de comportement, énoncée par Robert Hooke en 1678. La loi de Hooke a été généralisée par Cauchy (1789-1857) qui a proposé d'exprimer chaque composante du tenseur des contraintes comme une fonction linéaire des composantes du tenseur des déformations. La loi de Hooke aujourd'hui est souvent écrite sous la forme **[DIEU 74]**:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \qquad \textbf{(1. 3)}$$

L'équation (1.3) caractérise les matériaux élastiques linéaires pour leur phase élastique, où C_{ijkl} est un tenseur du quatrième ordre appelé tenseur des rigidités ou tenseur d'élasticité.

Il possède $3^4 = 81$ composantes dans le cas le plus général. Le tenseur des rigidités fait intervenir l'ensemble des caractéristiques élastiques du matériau.

σ_{ij} , ε_{kl} : sont respectivement les tenseurs des contraintes et des déformations.

Les tenseurs des déformations et les contraintes sont symétriques. Ils n'ont donc que 6 composantes indépendantes chacune. Leur liaison linéaire (tenseurs d'élasticité) peut alors être réalisée à l'aide de 36 termes seulement. En faisant correspondre à chaque paire d'indice *ij* et *kl* un seul indice selon les relations suivantes :

$(11) \leftrightarrow 1$ $\quad (22) \leftrightarrow 2$ $\quad (33) \leftrightarrow 3$

$(23) = (32) \leftrightarrow 4$ $\quad (31) = (13) \leftrightarrow 5$ $\quad (12) = (21) \leftrightarrow 6$

La relation (1.3) devient alors:

$$\sigma_{\alpha} = C_{\alpha\beta}\,\varepsilon_{\beta} \qquad \textbf{(1. 4)}$$

Dans le cas isotrope et homogène, la relation liant le tenseur des contraintes et le tenseur des déformations s'exprime en fonction des constantes de lamé, comme:

$$\sigma_{ij} = \lambda\varepsilon_{ll}\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij} \qquad \textbf{(1. 5)}$$

Où δ_{ij} est le symbole de Kronecker, λ et μ sont les constantes de Lamé.

La matrice des constantes élastiques dans ce cas est sous la forme :

$$C_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \end{pmatrix}$$

D'où : $\quad C_{11} = C_{22} = C_{33} = \lambda + 2\mu \quad$ et $\quad C_{12} = C_{13} = C_{23} = \lambda$

La propagation des ondes de volume dans un milieu élastique homogène et isotrope infini se fait selon deux modes dont les célérités dépendent des propriétés mécaniques des matériaux.

Si la matière vibre avec la direction de propagation de l'onde, l'onde est dite longitudinale de vitesse V_L. On peut alors exprimer la vitesse de propagation de l'onde longitudinale à partir des constantes de Lamé λ et μ et la masse volumique ρ par la relation suivante:

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \qquad \textbf{(1. 6)}$$

Si la matière vibre perpendiculairement à la direction de propagation, l'onde est transversale de vitesse V_T. Elle est reliée aux constantes de Lamé par la relation suivante:

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \qquad \textbf{(1. 7)}$$

A partir des expressions précédentes des vitesses de propagation des ondes longitudinale V_L et transversale V_T, connaissant ρ, nous pouvons remonter aux constantes élastiques tel que le module de Young (E), le coefficient de Poisson (υ), le module de Cisaillement (G) et le module de compression (k) à l'aide des formules suivantes **[BRUN 06a]**:

$$E = \rho \frac{V_T^2 \left(3V_L^2 - 4V_T^2\right)}{V_L^2 - V_T^2} \qquad \textbf{(1. 8)}$$

$$k = \rho \frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{3} \qquad \textbf{(1. 9)}$$

$$G = \rho V_T^2 = \mu \qquad \textbf{(1. 10)}$$

$$\upsilon = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2\left(V_L^2 - V_T^2\right)} \qquad \textbf{(1. 11)}$$

Ces paramètres élastiques permettent de suivre l'évolution du matériau et de caractériser ses propriétés mécaniques. Les propriétés mécaniques du béton sain dépendent de la qualité des constituants, de la formulation et des conditions de cure. Le tableau 1.1 présente les plages de variations des propriétés mécaniques moyennes du béton ciment :

Tableau 1.1 : Variations des propriétés mécaniques moyennes de béton **[DREU 98]**.

E(GPa)	υ	ρ (Kg.m^{-3})
20-40	0,15-0,3	2200-2400

La notion d'élasticité fait référence à un domaine de déformation réversible : le matériau retourne à son état initial dès qu'il n'est plus sollicité. Pour de faible déformations ($\varepsilon < 10^{-7}$ pour le béton), la relation de proportionnalité entre la contrainte et la déformation (loi de Hooke) qui considère le module d'Young comme une propriété intrinsèque et constante du matériau est toujours valable.

Il est cependant important de savoir que ceci n'est qu'une schématisation plus ou moins réaliste du comportement réel du matériau. En effet, le comportement d'un matériau n'est jamais strictement linéaire et la prise en compte de termes d'ordre supérieur est souvent nécessaire **[FORT]**.

1. 5. Propriétés mécaniques non linéaires classiques

L'élasticité non linéaire classique, considère un état de déformation assez important pour modifier localement (mais toujours de manière réversible) les propriétés élastique du matériau. Ce type de comportement est généralement causé par des défauts ou irrégularités du matériau à l'échelle atomique (dislocations, lacunes ou substitution d'atomes, etc). Le comportement non linéaire classique a été modélisé avec succès dés la fin des années 50 **[Land 59]**. Le module d'Young n'est plus alors considère comme une constante mais une fonction de l'état de déformation du matériau. La loi de Hooke généralisée permet de décrire le comportement non linéaire comme **[DIEU 74, BRUN 06b]** :

$$\sigma = E(\varepsilon).\varepsilon \qquad \textbf{(1. 12)}$$

$$E(\varepsilon) = E_0\left(1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2 - \ldots\right) \qquad \textbf{(1. 13)}$$

E_0 est la composante linéaire du module d'élasticité, β et δ sont respectivement des coefficients de non linéarité quadratique et cubique.

L'immense majorité des matériaux présente un comportement élastique non linéaire. Pour la plupart des applications pratiques, les coefficients de non linéarité sont considérés comme négligeables par rapport au module E_0, ce qui justifie le recours à l'approximation linéaire. L'endommagement des matériaux peut en revanche augmenter la quantité de défauts structuraux jusqu'à rendre la non linéarité significative. L'acoustique non linéaire fait appel au même principe physique que l'élasticité non linéaire. Dans ce cadre d'étude, les déformations significatives qui modifient localement les propriétés élastiques de ces derniers matériaux sont induites par la propagation d'ondes acoustiques. Réciproquement, la

modification des propriétés locales du matériau a une influence sur la propagation des ondes acoustiques permettant donc à la fois de perturber le milieu et d'en extraire des informations relatives aux perturbations dynamiques induites, l'étude de leur propagation est un travail complexe qui fait de l'acoustique non linéaire en milieu solide une discipline à part entière **[BOUK 11]**.

Dans le cas du béton, la non linéarité est si importante qu'elle ne répond plus aux lois de la non linéarité classique définies par Landau **[LAND 67]**. Ce type de comportement regroupe toute catégorie de matériaux tels que les sables, les roches, les sols, les céramiques et les matériaux endommagés **[GUY 99, OSTRO 01]**. La non linéarité non classique intervient lorsque les défauts du matériau ne sont plus microscopiques mais ***mésoscopiques***. Il n'existe pas pour le moment d'explications physiques unanimes aux phénomènes de non linéarité non classique. Cependant beaucoup de chercheurs se focalisent sur la modélisation de ces phénomènes ce qui fait de l'acoustique non linéaire un sujet d'actualité.

1. 5.1. Physique *mésoscopique*

La propagation dans un milieu désordonné dans le régime de diffusion multiple peut elle même être décrite à trois niveaux ou échelles. Le premier, qui est aussi le plus familier, est le niveau macroscopique. A cette échelle, avec une bonne approximation, l'intensité associée à l'onde a un comportement diffusif interprété comme le résultat d'une marche au hasard. A l'opposé, à l'´echelle microscopique, le comportement de l'onde doit être entièrement décrit par son interaction avec les composantes élémentaires du milieu.

A l'´echelle ***mésoscopique***, les diffuseurs ne sont pas étudiés de façon individuelle mais les interférences entre les chemins de diffusion sont prises en compte. Deux éléments entrent en jeu : la diffusion de l'onde par un diffuseur et la propagation entre deux diffuseurs **[DOMI 08]**. Dans ce travail, nous nous plaçons à l'échelle ***mésoscopique***.

1. 6. Endommagement

L'endommagement du matériau granulaire consolidé induit une dégradation de ses propriétés mécaniques. Une telle dégradation peut conduire à des événements catastrophiques tels que l'effondrement de la structure (**Fig1.2**). Afin, de prévenir de telles catastrophes, des protocoles sont mis en œuvre lors des phases de conception (dimensionnement, choix des matériaux, etc.) et de fonctionnement (suivi de l'endommagement, consolidation, etc.) d'un ouvrage. Tous les secteurs utilisant des matériaux de structure, s'intéressent à la restriction des effets indésirables de l'endommagement. Les progrès, dans les domaines de la prévision

de l'endommagement et dans la résistance à ce dernier, passent par une meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement **[CARM 09]**. L'endommagement désigne les phénomènes de création de nouvelles surfaces au sein d'un matériau sous l'effet d'une sollicitation**.** Krajcinovic **[KRAJ 00]** définit l'endommagement comme une augmentation de la taille ou du nombre de fissures. Ceci engendre une dégradation des caractéristiques mécaniques du système qui mène à sa ruine.

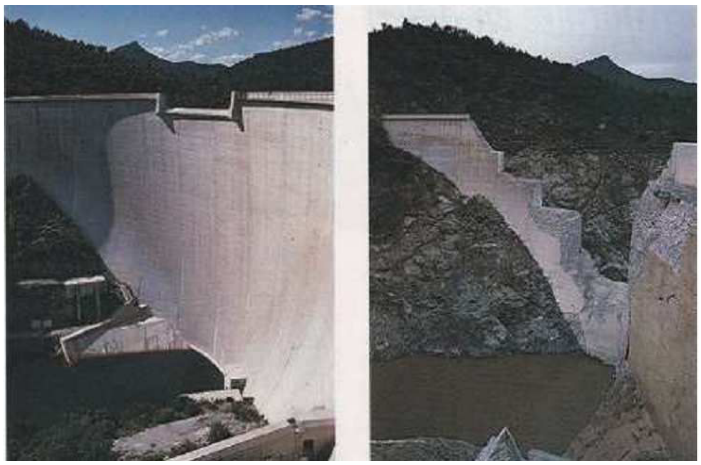


Figure 1.2 : Catastrophe du barrage de Malpasset qui a cédé en 1959 **[CARM 09]**.

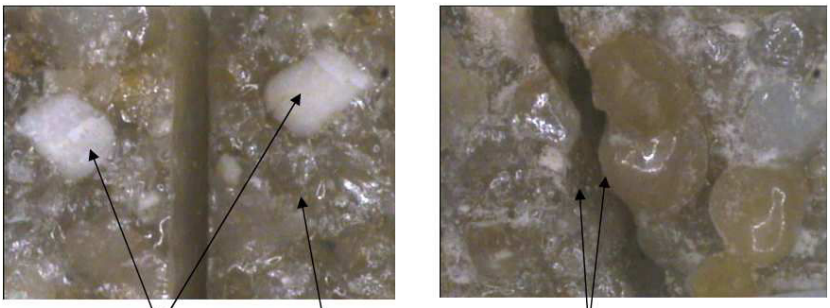
1. 6. 1. Mécanismes d'endommagement

Dans les matériaux granulaires de type béton, les premiers endommagements détectés commencent à se développer à l'échelle microscopique lorsque l'effort localisé atteint la limite de rupture d'un des constituants ou celle de l'interface les reliant. Les microfissures qui se développent sont habituellement trop petites pour causer la rupture finale de la structure. Les mécanismes d'endommagement d'un matériau hétérogène, notamment les bétons soumis à une sollicitation mécanique, peuvent se regrouper en trois principaux modes différents **[BERT 05, CARM 09]**:

a) Fissuration matricielle : Ce phénomène apparaît au niveau des défauts présents dans la matrice (porosités) (**Fig1.3**). La fissure se propage ensuite selon la direction perpendiculaire à la sollicitation, si la contrainte au fond de la fissure est suffisamment importante.

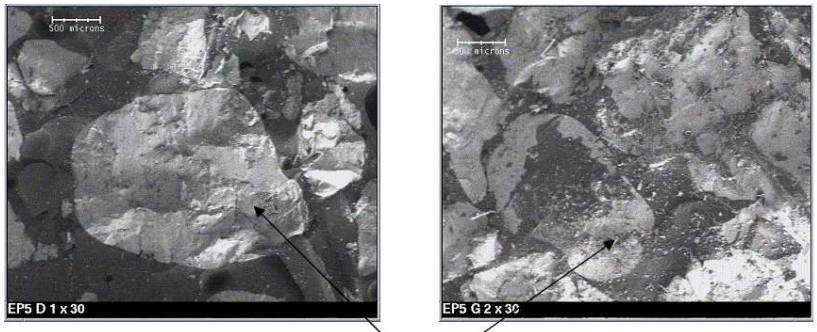
b) **Rupture des granulats** : La rupture d'une inclusion est générée par le transfert de charge de la matrice vers l'hétérogénéité. La **Figure1.4** qui présente alors une fissure perpendiculaire à l'axe de sollicitation **[PARK 03, BERB 10]**.

c) **Rupture de l'interface granulat/matrice** : Elle est provoquée par une propagation d'une fissure dans la matrice ou par la rupture d'un granulat. Plusieurs études ont montré que même avant l'application de la charge, il existe de très petites fissures à l'interface matrice-granulat (**Fig1.5**). Ces fissures sont attribuées aux différences entre les propriétés mécaniques existantes entre les granulats et la pâte de ciment hydratée, couplées au retrait et aux déformations d'origine thermique. Aussi longtemps que les fissures demeurent stables, leur présence n'est pas dangereuse **[BENT 05].**



Une rupture de granulat Rupture de la résine Rupture de l'interface

Figure 1. 3 : Micrographies obtenues par un microscope à balayage électronique d'une rupture de Granulat **[BERB 10]**.



Rupture de granulat.

Figure 1.4 : Micrographies obtenues par un microscope optique des trois modes de rupture **[BERB 10]**.

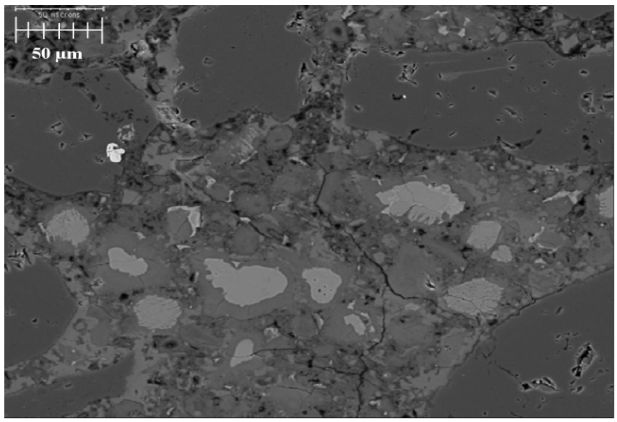


Figure 1. 5 : Mise en évidence de fissures dans le béton dans son état initial : image obtenue à l'aide d'un microscope électronique **[BENT 05]**.

1. 6.2. Essais mécaniques

La résistance mécanique du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété bien que, dans de nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telles que la durabilité et/ou la perméabilité peuvent être plus importantes. Néanmoins, la résistance mécanique projette une image globale de la qualité d'un béton et elle présente un paramètre majeur et indispensable pour le dimensionnement et la conception des ouvrages. De ce fait, les propriétés mécaniques du béton ont toujours fait l'objet de multiples études en vue de comprendre la réponse du béton aux actions mécaniques qui lui sont appliquées.

1.6. 2. 1. Comportement en compression uniaxial

La résistance à la compression est la propriété du béton la plus communément considérée dans le calcul des structures, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité. Plusieurs études dans la littérature comme celles de Hsu et al **[HSU 63]**, Benouniche et al **[BENO 79]** ont mis en évidence différentes phases de comportement du béton en compression uniaxiale en fonction du niveau de la contrainte appliquée (**Fig1.6**).

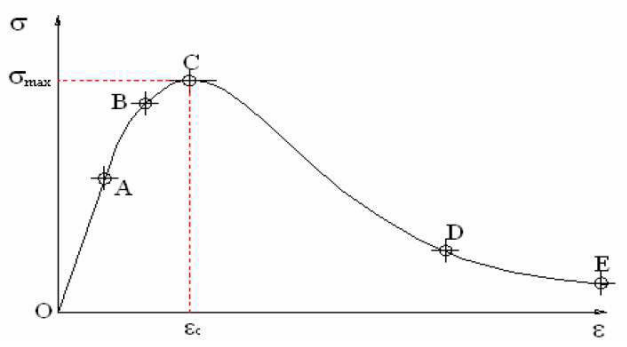


Figure 1. 6 : Courbe contrainte/déformation mettant en jeu les phases du comportement en compression du béton **[TRAN 09].**

Le comportement d'un béton soumis à une compression uniaxiale est décrit sur la **Figure1. 6**:

- Le matériau présente un comportement quasi-élastique **(OA)** qui dure jusqu'à 40% de sa contrainte limite en compression σ_{max} avant d'entamer la zone de comportement non linéaire **[BENT 05]**. Cette phase est caractérisée par les valeurs du module d'élasticité E et du coefficient de Poisson du béton. La déformation résiduelle du béton est nulle durant cette phase de chargement.
- Dans la phase de microfissuration (AB), le coefficient de Poisson constant est entre 40 à 50 % et 70 à 80 % de la contrainte maximale σ_{max} où le module de Young E décroît sensiblement. La déformation résiduelle longitudinale augmente (ε_T), tandis que la déformation latérale (ε_L) reste nulle. L'endommagement débute par des dégradations diffusées du béton **[BERB 10]**.
- Développement rapide des microfissures (BC), pour une contrainte supérieure à 80 % de la contrainte maximale σ_{max}. Le coefficient de Poisson et les déformations résiduelles augmentent rapidement, alors que l'on constate une forte diminution du module d'élasticité.
- Apparition et propagation de macrofissures dues à la localisation de la déformation (CD). La déformation augmente fortement, tandis que le module d'élasticité diminue jusqu'à s'annuler.
- Augmentation très rapide de la déformation tandis que la contrainte diminue lentement (DE). La vitesse de propagation des fissures diminue suite à la friction

entre les granulats. Cette friction transmet une résistance aux lèvres des fissures et empêche par conséquent la diminution de la contrainte **[TRAN 09]**.

1. 6.2. 2. Comportement en traction

La résistance mécanique du béton en traction reste inférieure au 1/10ème à celle en compression. Les résultats expérimentaux en traction uniaxiale restent peu nombreux, ce qui est en partie dû à la difficulté de mise en œuvre de l'essai de traction du fait du comportement fragile **[BERB 10]**. La résistance à la traction du béton pouvant être mesurée par des essais très différents les uns des autres, tels que l'essai de traction directe, l'essai de fendage ou l'essai de flexion.

1. 6.2. 2. a. Traction directe

Les résultats d'essais réalisés par BERTHELOD, TERRIEN et GERARD **[BERT 87, TERR 80, GERA 96]** sont donnés dans la **Figure 1.7**. Pour une contrainte inférieure ou égale à l'avant pic, $\sigma = 0{,}6 f_t$ avec f_t est la contrainte maximale en traction, le comportement du béton est quasi linéaire avec un module de Young de l'ordre de E = 3,6 GPa pour ce matériau **[BERB 10]**. L'après pic, est caractérisé par une rupture brusque du matériau liée à une diminution brutale du module d'élasticité. Le pic est la contrainte maximale en traction f_t = 2,19 MPa pour ce de matériau.

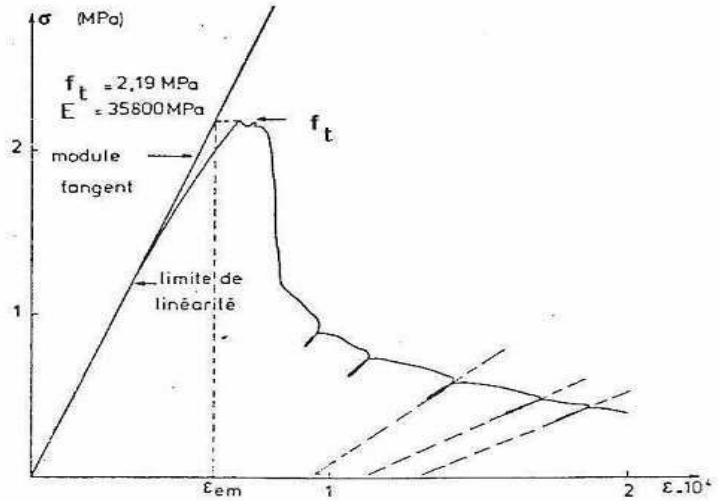


Figure 1.7 : Comportement du béton cimentaire en traction directe **[TERR 80].**

1. 6.2. 2. b. Traction par fendage

La résistance à la traction du béton peut être évaluée par un essai de fendage (ou brésilien) d'éprouvettes cylindriques. L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse (**Fig1. 8**). Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par une mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera alors **[BERB 10]** :

$$f_t = 2\frac{P}{\pi DL} \qquad \textbf{(1. 14)}$$

D, L : sont la hauteur et le diamètre de l'échantillon.

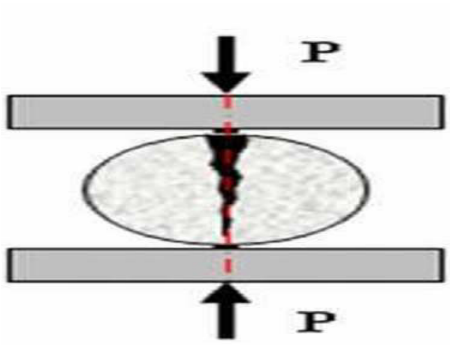


Figure 1.8 : Essai de traction par fendage.

1. 6.2. 2. c. Traction par flexion

Les essais de traction par flexion sont utilisés très couramment en laboratoire pour déterminer la résistance en traction du béton, en raison de la simplicité de ces essais et de leur capacité à représenter de façon fidèle le comportement réel du béton dans les structures de génie civil. L'essai de « flexion 3 points » permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture (**Fig1.9**). Comme l'essai de compression, l'essai de flexion ne permet généralement pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles. L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple (peu ou pas d'usinage). Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.

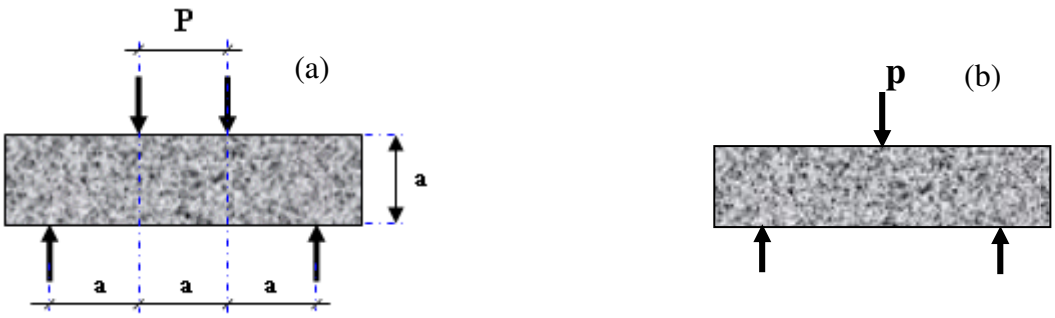


Figure 1.9 : Essai de traction par flexion : (a) 4 points, (b) 3 points.

Nous avons vu que tous les matériaux peuvent être considérés comme hétérogènes. Les propriétés des différentes phases d'un matériau influencent grandement le lieu où se produit l'endommagement, matrice, interface ou inclusion. L'étude de l'endommagement passe forcément par la quantification de celui-ci. Dans ce contexte, nous allons évoquer la technique d'Emission Acoustique (EA). Cette technique de contrôle non destructif est largement employée dans l'industrie et en laboratoires. L'EA est sensible à la croissance et à la multiplication des défauts dans un matériau soumis à une sollicitation mécanique. Elle a donc été utilisée pour caractériser l'endommagement des matériaux soumis à un essai quasi-statique.

1. 7. Emission acoustique

La norme AFNOR **[FITZ 89, BEAT 83, ROGE 88]** définit l'émission acoustique comme un « phénomène de Libération d'énergie élastique sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau durant des processus dynamiques de déformation». La norme ASTM E610-82 complète cette définition en précisant que l'EA est l'ensemble des phénomènes dans lesquels des ondes élastiques transitoires sont générées par dissipation d'énergie provenant des sources localisées à l'intérieur d'un matériau **[ASTM 82]**.

Actuellement, l'EA est utilisée pour la détection des défauts dans de nombreux matériaux et ce pour une meilleure précision de leurs rupture. L'une des premières utilisations de l'EA est reportée par Portevin et Le Chatelier **[PORT 23]** lors de l'apparition de bandes de Lüders (elles correspondent à une déformation hétérogène de l'échantillon, localisée dans des bandes qui se déplacent le long de l'éprouvette) durant un essai de traction sur un alliage d'aluminium.

Le signal d'EA est un signal électrique produit par un capteur en réponse à une onde élastique émise par un défaut. La forme de ce signal dépendra du mécanisme qui a créé l'onde acoustique, des propriétés du matériau dans lequel l'onde se propage, de la distance de propagation et du capteur qui transforme l'onde en signal électrique. En Emission Acoustique, l'opérateur n'a pas de contrôle sur les mécanismes d'émission mais peut seulement soumettre le matériau à des sollicitations extérieures qui vont engendrer les mécanismes d'émission acoustique **[THUM 04, SIBI 11, CARM 09]**. Le principe de la méthode, dans lequel le matériau joue le rôle d'émetteur, n'exige ni l'utilisation d'un type particulier de matériau ni d'un environnement spécifique. Cet avantage privilégie l'utilisation de l'émission acoustique lorsqu'il est question de suivre in situ l'évolution de l'endommagement des matériaux en service. Cependant ce même avantage est la source du plus grand problème pratique de cette technique. En effet, il n'y a aucun moyen d'intensifier les ondes élastiques générées par un défaut et d'améliorer ainsi la sensibilité des capteurs **[BENT 05]**. Deux types d'EA sont distingués :

1. 7.1. Emission acoustique discrète

Elle est constituée d'événements d'énergie importante. Les signaux générés dépendent des capteurs utilisés : sinusoïdes amorties appelées « salves » dans le cas de capteurs résonants ou impulsions très courtes dans le cas de capteur large bande. C'est de ce type d'émission dont il s'agit lorsqu'on détecte l'initiation de l'endommagement et que l'on suit son évolution jusqu'à la rupture du matériau **[BENT 05]**.

1. 7.2. Emission acoustique continue

Elle est formée de signaux, issus d'une grande quantité de sources actives en même temps, se trouvent très rapprochés et ne peuvent être séparés par l'instrumentation. Dans ce cas, de faibles niveaux d'énergies sont mis en jeu ce qui limite l'exploitation de ce type d'émission **[SIBI 11]**.

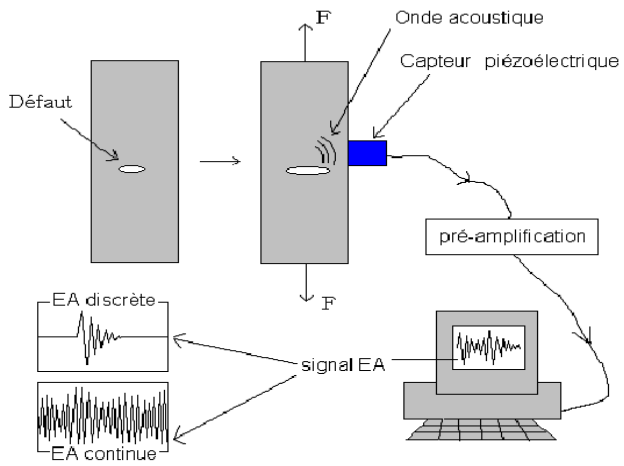


Figure 1.10 : Chaîne d'EA de la création de l'onde à sa visualisation. **[THUM 04]**

Comme tous les matériaux hétérogènes, le matériau granulaire type béton peut être le siège d'apparition et de propagation de microfissures et ce pour des contraintes bien inférieures à celle correspondant à la rupture du matériau. A ce stade d'endommagement précoce, alors que les inspections visuelles s'avèrent inefficaces, la caractérisation non destructive des bétons est un enjeu important pour l'évaluation de la durée de vie des structures du génie civil.

1. 8. Méthode de détection de l'endommagement

Les méthodes ultrasonores ont déjà montré une grande capacité à détecter les endommagements, et présentent l'avantage d'être rapide et pratique sur site. Ainsi, les méthodes acoustiques ultrasonores linéaires ont souvent montré leur aptitude à caractériser l'endommagement à travers les variations de vitesse et d'atténuation d'ondes ultrasonores. Cependant, plusieurs expériences ont montré que les méthodes acoustiques linéaire ne sont pas assez sensibles au tout début du processus d'endommagement surtout lorsqu'il est localisé **[GARN 09, BENT 05]**. Souvent, les premiers mécanismes d'endommagement sont des précurseurs de la rupture finale et sont de ce fait très importants à identifier. Devant une telle difficulté, les méthodes acoustiques non linéaires présentent une alternative intéressante capable de détecter et éventuellement de caractériser les endommagements faibles ou précoces, localisés ou diffusés **[ABEE 00, JOHN 96]**. Ainsi depuis quelques années, l'acoustique non linéaire apparaît de plus en plus comme une nouvelle voie très prometteuse pour le contrôle et l'évaluation non destructive des matériaux de structure fortement hétérogène. En effet, si les non linéarités acoustiques peuvent être très élevées pour les

matériaux inhomogènes comme le béton, elle augmente sensiblement en présence d'endommagement.

Il existe diverses techniques d'estimation des indicateurs de non linéarité tels que la génération d'harmoniques, le suivi de la fréquence de résonance ou l'Interférométrie par Onde de Coda (C. W. I.). Dans ce cas, la compréhension des mécanismes responsables du comportement non linéaire est plus que souhaitable. Cela fera l'objet du prochain chapitre.

Références bibliographiques :

[ABEE 00] VAN DEN ABEELE, K. A ; JOHNSON, P. A ; SUTIN. A., «Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, partI: Nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS)», Res Nondestr Eval, Vol 30, pp: 12: 17, 2000.

[AUVR 03] AUVRAY, J.M., «Elaboration et caractérisation à haute température de béton réfractaires à base d'alumine à spinelle », thèse de doctorat, université de Limoges, 2003.

[ASTM 82] ASTM., «Standard definition of terms relating to E A», ASTM E610-82, American, 1982.

[BERB 10] BERBAOUI, R., «Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires à base polymère», thèse de doctorat, université du Maine, 2010.

[BERR 99] BERRADA, M. R., BOUKALOUCH, M ; MENGUY, G ; et ZEGADI, S., «Caractéristiques thermiques du stérile de phosphates. Application aux matériaux locaux», AMSE 67 (1-2), pp : 53-63, 1999.

[BENO 79] BENOUNICHE, S., «Modélisation de l'endommagement du béton par microfissuration en compression», thèse de Doctorat, université Pierre et Marie Curie, 1979.

[BEAT 83] BEATTIE, AG., «Acoustic emission, principles and instrumentation», Journal of acoustic emission, Vol 2, pp: 95-128. 1983.

[BENT 05] BENTAHAR, M, «Acoustique non-linéaire : Application à la caractérisation ultrasonore de l'endommagement des matériaux hétérogène et à la prédiction de la durée de vie», thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.

[BERT 05] BERTHELOT J.M., ROBERT J.L. «Damage evaluation of concrete test specimens related to failure analysis», Journal of Engineering Mechanics, Vol 116, N3, pp: 587-604, 1987.

[BOUK 11] BOUKARI, Y., «Contribution à la caractérisation des bétons endommagés par la réaction alcali-silice : apports combinés de méthodes physico-chimiques et

acoustiques non linéaires», thèse de doctorat en cotutelle, université de Sherbrooke et université des Sciences et Technologie de Lille, 2011.

[BRUN 06a] BRUNEAU, M ; POTEL, C., «Matériaux et acoustique 1, propagation des ondes acoustiques 1», Mécanique et ingénierie des Matériaux, 2006.

[BRUN 06b] BRUNEAU, M ; POTEL, C., «Matériaux et acoustique 2, propagation des ondes acoustiques 2», Mécanique et ingénierie des Matériaux, 2006.

[CARM 09] CARMONA, V., **«**Étude de l'endommagement de matériaux composites par tomographie X et émission acoustique», thèse de doctorat, institut national des sciences appliquees de Lyon, 2009.

[CHAM 09] CHAMBART, M., «Endommagement anisotrope et comportement dynamique des structures en béton armé jusqu'à la ruinés», thèse de doctorat, école normale supérieure de Cachan, 2009.

[CHEK 08] CHEKROUNE, M.**, «**Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface», thèse de doctorat, école central de Nantes, 2008.

[CISS 96] CISSE I, K., «Contribution à la valorisation des matériaux locaux au Sénégal: Application aux bétons de sable», thèse de doctorat, institut national de sciences appliquées de Rennes, 1996.

[DIEU 74] DIEULESIANT, E; ROYER, D., «Ondes élastiques dans les solides», pp :399, 1974.

[DOMI 08] DOMITILLE, A. M., «Propagation des ondes en milieu désordonné : ultrasons aux ondes sismiques. Etude de la phase», thèse de doctorat, université Joseph Fourier - Grenoble I 2008.

[DREU 98] DREUX, G; FESTA, J., «Nouveau guide du béton et de ses constructions», Eyrolles, 1998.

[FITZ 89] EITZEN, D.G; WADLEY, H.N.G., «Acoustic emission: establishing the fundamentals». Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol 89, N 1, pp:75-100, 1984.

[FORT] FORTUNIER. R., «Comportement Mécanique des Matériaux», Ecole Nationale Supérieure des Mines.

[GARN 09] GARNIER, V ; CHAIX, J. F; ROSSAT, M ; PAYAN, C ; CORNELOUP, G., «Caractérisation Non Destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores», 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, 2009.

[GAYE 01] GAYE, S ; NIANG, F; CISSE, I. K.; ADJ, M; MENGUY, G., «Caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques du béton de polymère recycle», S. Gaye et al / J. Sci, Vol 1, N°1, pp : 53-66, 2001.

[GERA 96] GERARD, B; MARCHAND, J ; BRESYSSE, D, AMMOUCHE, A., «Constitutive law of high strength concrete under tensile strain», International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Paris, pp: 677-685, 1996.

[GUYE 99] GYUER, R. A; JOHNSON, P. A., «Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class of materials», Physics today, Vol 52, pp: 30-36, 1999.

[HSU 63] HSU, T. C ; SLATE, F. O ; STURMAN, G.M ; WINTER, G., «Micro-cracking of plain concrete and the shape of the stress strain curve», Journal of American concrete institute, Vol 60, N 40, pp: 209-224, 1963.

[JOHN 96] JOHNSON, P. A; ZINSZNER, B; RASOLOFOSAON, P. N. J., «Resonance and elastic nonlinear phenomena in rock», J. Geophys. Res., Vol.101, pp:11553–11564, 1996

[KONG 82] KONG Lo-Shu, «Utilisation du béton léger en Chine, Bâtiment international», pp : 245-251, 1982.

[KRAJ 00] KRAJCINOVIC, D., «Damage mechanics: accomplishments, trends and needs», International Journal of Solids and Structures, Vol 37, pp: 267–277, 2000.

[LAND 59] LANDAU, L. D; LIFSHITZ, E. M., «Theory of elasticity», Pergamon, Tarrytown, NY, Vol 187, 1959.

[LAND 67] LANDAU, L ; LIFCHITZ, E., «Théorie de l'élasticité», tome VII, Moscou: MIR, pp : 206, 1967.

[MARM 95] MARMONET L., BOUGUERRA A., Al-RIM K.et QUENEUDEC M., «Conductivité thermique d'un béton argileux cellulaire», Rev. Gén. Ther, Vol 402, pp: 393-400, 1995.

[PARK 03] PARK, J.M. KIM, D. S. et. KIM, S.R., «Interfacial properties and micro-failure degradation mechanisms of bioabsorbable fibers/poly-l-lactide composites using micromechanical test and non-destructive acoustic emission», Composites Science and Technology,Vol(63), pp:403–419, 2003.

[PATE 91] PATEKA K. M., «Contribution à la valorisation des sous produits industriels et agricoles dans l'industrie du ciment», thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées Lyon, 1991.

[PORT 23] PORTEVIN, A ; LE CHATELIER, F., «Sur un phénomène observé lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation», Note de l'Académie des Sciences, pp : 507-510, 1923.

[ROGE 88] ROGET, J., «Essais non destructifs. L'émission acoustique, mise en œuvre et applications», 534 ROG, 1988.

[SIBI 11] SIBIL, A., «Comportement thermomécanique et endommagement de nouveau réfractaires verriers à très haute teneur en zircone : investigation des mécanismes de fissuration par EBSD et Emission Acoustique», thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de lyon, 2011.

[TERR 80] TERRIEN, M., «Emission acoustique et comportement mécanique postcritique» ; Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, pp : 65-72, 1980.

[THUM 04] THUMMEN, F., «Propriétés mécaniques et durée de vie de bétons réfractaires», thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2004.

[TORR 14] TORRENTI, J., «Béton», ENCYCLOPAEDIA, fondation école française du béton, 2014.

[TRAN 09] TRAN, T., «Contribution à l'étude du comportement mécanique et hydromécanique du béton», thèse de doctorat, université de Liege, 2009.

[OSTR 01] OSTOVOSKY, l. A ; JOHNSON, P., «Dynamic nonlinaer elasticity in geomaterials», la rivista del nuvo cimento, 24, pp :1-46, 2001.

Chapitre 2

Méthodes de détection/dimensionnement/localisation

Sommaire

2. 1. Introduction 26
2. 2. Résonance non linéaire 27
2. 2. 1. Dynamique rapide 28
2. 2. 2. Dynamique lente 28
2. 3. Non linéarité classique 28
2. 3. 1. Définition des paramètres non linéaires classiques 29
2. 3. 2. Non linéarité non classique 31
2. 3. 3. Définition des paramètres non linéaires hystérétiques 33
2. 4. Vibration en flexion d'une poutre encastrée-libre 35
2. 4.1. Equation des poutres 35
2. 4. Génération d'harmoniques 37
2. 5. Méthode SSM "Scaling Subtraction Method" 39
2. 5. Méthode d'interférométrie par onde de Coda 40
2. 5.1. Théorie de CODA 41
2. 6. Conclusion 44
Référence bibliographique 45

2. 1. Introduction

Il existe à ce jour différentes méthodes de détection et de caractérisation de défauts dans des matériaux solides. Chacune possède un domaine d'application bien défini, avec ses avantages et ses limitations. Les méthodes de caractérisation des défauts dans le béton, basées sur la propagation des ondes mécaniques au sein du matériau, sont également largement étudiées actuellement au vu de leur potentiel. Depuis quelques années, l'acoustique non linéaire apparaît de plus en plus comme une nouvelle voie très prometteuse pour le contrôle et l'évaluation non destructifs des matériaux de structure complexe. L'acoustique non linéaire décrit la propagation d'onde de forte amplitude, par opposition aux déformations infinitésimales de l'approximation linéaire (**Fig2.1**). Il s'agit également de caractériser le comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à des déformations finies. La propagation d'une onde acoustique n'étant que la réponse d'un milieu matériel à une perturbation mécanique. En effet, si les non linéarités acoustiques peuvent être très élevées pour les matériaux hétérogènes comme les roches et le béton **[JOHN 96, MOUS 02]**, elles augmentent sensiblement en présence d'endommagement **[BENT 05, ZAIT 03, LACO 03]**. Les matériaux non linéaires mésoscopiques tels que le béton suscitent un intérêt de plus en plus croissant.

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique nécessaire à l'étude des différents techniques acoustiques non linéaires qui peuvent caractériser un défaut mésoscopique dans un milieu fortement hétérogène tel que la résonance non linéaire, la génération d'harmonique et l'interférométrie par onde de coda et nous finalisons par une conclusion

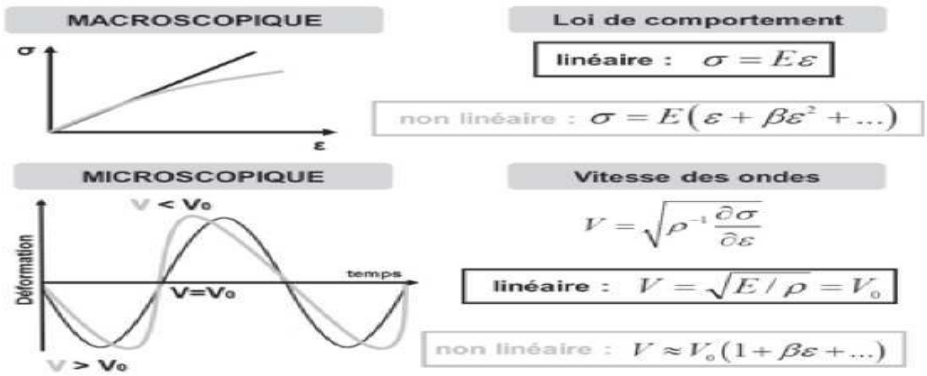


Figure 2.1: Effet non linéaire à l'échelle micro et macroscopique **[PAYA 14].**

2. 2. Résonance non linéaire

Un des phénomènes non linéaires induit par la présence d'hétérogénéités microscopiques et/ou de défauts répartis dans le volume d'un matériau est la variation de la fréquence de résonance lorsque l'amplitude d'excitation augmente [**OSTR 01**, **BLAN 13**]. Une augmentation du niveau d'excitation n'a que peu d'effet sur la valeur de la fréquence de résonance d'un matériau sain. Par contre lorsqu'il s'agit d'un matériau hétérogène ou endommagé (micro-fissuré), l'augmentation de la sollicitation acoustique est accompagnée d'une perte de rigidité et ce pour des taux de déformation aussi faibles que 10^{-7} **[BENT 05]**. La méthode de résonance consiste à exciter l'échantillon autour d'une de ses fréquences de résonance, tout d'abord à faible amplitude. Peu à peu, le niveau d'excitation augmente, pour le même balayage en fréquence afin de répertorier la nouvelle fréquence de résonance. Par conséquent, la fréquence de résonance se décale vers les basses fréquences et les courbes de résonance deviennent plus larges, témoignant d'une augmentation de l'atténuation (**Fig2.1**).

Van Den Abeele et al. **[ABEE 00]** ont appliqué la technique sur des plaques en ardoise artificielle, progressivement endommagées par des impacts successifs localisés au centre de la plaque. Le décalage de la fréquence de résonance est observé lorsque l'excitation augmente et s'est révélé être important dans le cas d'un échantillon endommagé.

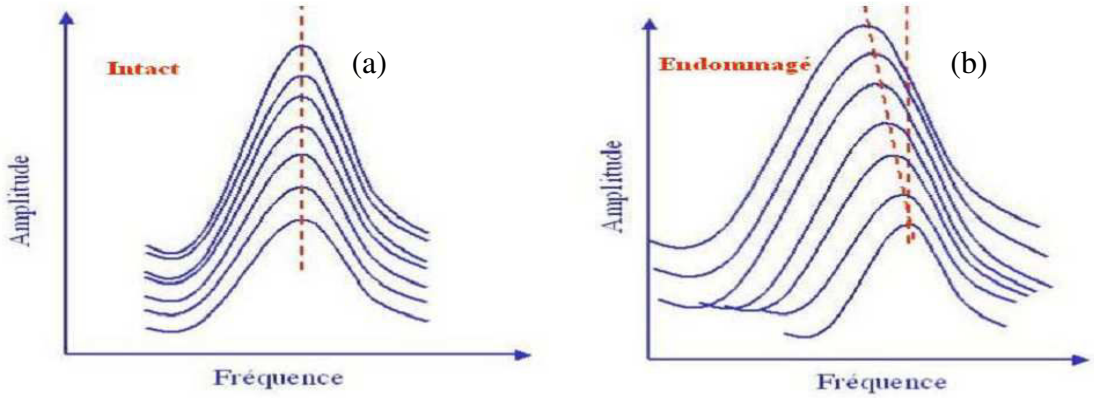


Figure 2.2 : Courbes de résonance pour des niveaux d'excitation croissants. Matériau intact (a): pas de décalage fréquentiel. Matériau endommagé (b): la fréquence de résonance se décale vers les basses fréquences et les courbes de résonance deviennent plus larges **[BENT 05]**.

2. 2. 1. Dynamique rapide

Dans la dynamique rapide, l'échantillon est soumis à des amplitudes croissantes générées au voisinage de la résonance sans laisser au matériau le temps de se relaxer entre deux niveaux consécutifs (**Fig2.2**). Le mode propre de vibration montre que les propriétés élastiques se dégradent jusqu'à atteindre un nouvel état hors équilibre **[BENT 05]**.

2. 2. 2. Dynamique lente

Dans ce cas, le matériau est excité à fort niveau pendant un certain temps, appelé temps de conditionnement. Par contre, lorsque la forte excitation est brutalement arrêtée et remplacée par une amplitude de très faible niveau **[RENA 13]**, le matériau entre dans une étape dite de relaxation durant laquelle il retourne vers son état d'équilibre initial (**Fig2.3**).

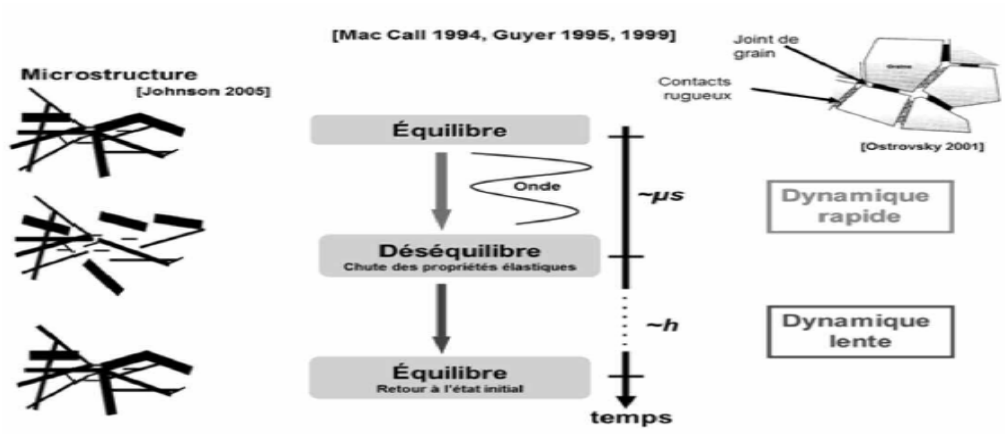


Figure 2.3: Microstructure et dynamique lente et rapide **[PAYA 14].**

2. 3. Non linéarité classique

La notion d'élasticité fait référence à un domaine de déformation réversible : le matériau retourne à son état initial lorsqu'il n'est plus sollicité. Elle est classiquement décrite dans les matériaux par la loi de Hooke, qui traduit le fait que contraintes et déformations sont proportionnelles et liées par le module élastique *E* qui considéré comme une propriété intrinsèque et constante du matériau. Cette formulation constitue la base de l'acoustique linéaire **[QUIV 12]**.

$$\sigma = E\varepsilon \qquad \textbf{(2.1)}$$

Où σ : est la contrainte appliquée, ε : la déformation et *E* : le module d'Young.

De nombreuses expérimentations statiques ou dynamiques à forte amplitude ont cependant montré que le comportement élastique de la plupart des matériaux solides n'était pas linéaire **[ABEE 00, GUYE 99a].** En acoustique, cette non linéarité se traduit par différents phénomènes dont celui de la variation de la vitesse de propagation des ondes élastiques et par la génération d'harmoniques. Il est possible de traduire cette non linéarité en supposant que le module élastique dépend dorénavant de l'état de déformation. Dans le cadre de l'élasticité non linéaire classique, le module d'Young n'est plus alors considéré comme une constante mais une fonction de l'état de déformation du matériau (voire chapitre1).

2. 3. 1. Définition des paramètres non linéaires classiques

A l'aide du formalisme développé par Landau, Gol'dberg donne l'équation de propagation non linéaire quadratique dans un milieu isotrope **[GOLD 71]** :

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2}{\partial a_k \partial a_k} - \left(k + \frac{\mu}{3}\right) \frac{\partial^2 U_l}{\partial a_l \partial a_i} = \left(\mu + \frac{A}{4}\right)\left(\frac{\partial^2 U_l}{\partial a_k \partial a_k}\frac{\partial U_l}{\partial a_i} + \frac{\partial^2 U_l}{\partial a_k \partial a_k}\frac{\partial U_i}{\partial a_l} + 2\frac{\partial^2 U_i}{\partial a_l \partial a_k}\frac{\partial U_l}{\partial a_k}\right)$$
$$+\left(k + \frac{\mu}{3} + \frac{A}{4} + B\right)\left(\frac{\partial^2 U_l}{\partial a_i \partial a_k}\frac{\partial U_l}{\partial a_k} + \frac{\partial^2 U_k}{\partial a_l \partial a_k}\frac{\partial U_i}{\partial a_l}\right) + \left(k - \frac{2\mu}{3} + B\right)\frac{\partial^2 U_i}{\partial a_k \partial a_k}\frac{\partial U_l}{\partial a_l}$$
$$+\left(\frac{A}{4} + B\right)\left(\frac{\partial^2 U_k}{\partial a_l \partial a_k}\frac{\partial U_l}{\partial a_i} + \frac{\partial^2 U_l}{\partial a_i \partial a_k}\frac{\partial U_k}{\partial a_l}\right) + (B + 2C)\frac{\partial^2 U_k}{\partial a_i \partial a_k}\frac{\partial U_l}{\partial a_l} \qquad \textbf{(2.2)}$$

ρ_0 : Masse volumique.

U (a_i, t): Le déplacement, a_i : direction de propagation (i=1, 2, 3).

A, B, C: Constantes de Landau, correspondent aux termes d'ordre trois du développement de la densité d'énergie en fonction des invariants du tenseur des déformations.

$k, \quad \mu = G$: Module de compression et de cisaillement.

Dans le cas d'un déplacement $U = (U_1, \quad U_2, \quad U_3)$ se propageant dans la direction a_1, l'équation précédente se décompose en trois équations couplant les composantes longitudinale et transversale du champ :

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} - \left(k + \frac{4\mu}{3}\right)\frac{\partial^2 U_1}{\partial a_1^2} = \gamma_L \frac{\partial^2 U_1}{\partial a_1^2}\frac{\partial U_1}{\partial a_1} + \gamma_{LT}\left(\frac{\partial^2 U_2}{\partial a_1^2}\frac{\partial U_2}{\partial a_1} + \frac{\partial^2 U_3}{\partial a_1^2}\frac{\partial U_3}{\partial a_1}\right) \qquad \textbf{(2.3)}$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U_2}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2 U_2}{\partial a_1^2} = \gamma_{LT} \left(\frac{\partial^2 U_2}{\partial a_1^2} \frac{\partial U_1}{\partial a_1} + \frac{\partial^2 U_1}{\partial a_1^2} \frac{\partial U_2}{\partial a_1} \right) \quad \textbf{(2.4)}$$

$$et \rho_0 \frac{\partial^2 U_3}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2 U_3}{\partial a_1^2} = \gamma_{LT} \left(\frac{\partial^2 U_3}{\partial a_1^2} \frac{\partial U_1}{\partial a_1} + \frac{\partial^2 U_1}{\partial a_1^2} \frac{\partial U_3}{\partial a_1} \right) \quad \textbf{(2.5)}$$

Où $\gamma_L = 3k + 4\mu + 2A + 6B + 2C$, $\gamma_{LT} = k + \frac{4}{3}\mu + \frac{A}{2} + B$ sont les coefficients intervenant respectivement lors de la propagation non linéaire d'une onde plane longitudinale et lors du couplage de vibration longitudinale et transversale.

Avec le formalisme des constantes élastiques, les composantes du déplacement U, se propageant dans la direction a_1, obéissent aux équations de propagation **[LEEY 95]** :

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} - C_{11} \frac{\partial^2 U_1}{\partial a_1^2} = (3C_{11} + C_{111}) \frac{\partial U_1}{\partial a_1} \frac{\partial^2 U_1}{\partial a_1^2} + (C_{11} + C_{166}) \left(\frac{\partial U_2}{\partial a_1} \frac{\partial^2 U_2}{\partial a_1^2} + \frac{\partial U_3}{\partial a_1} \frac{\partial^2 U_3}{\partial a_1^2} \right) \quad \textbf{(2.6a)}$$

$$et \rho_0 \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} - C_{66} \frac{\partial^2 U_i}{\partial a_1^2} = (C_{11} + C_{166}) \left(\frac{\partial U_1}{\partial a_1} \frac{\partial^2 U_i}{\partial a_1^2} + \frac{\partial U_i}{\partial a_1} \frac{\partial^2 U_1}{\partial a_1^2} \right), \quad avec\, i = 2,3. \quad \textbf{(2.6b)}$$

$C_{11} et\ C_{66}$: Sont les constantes élastiques du second ordre. $C_{111} et\ C_{166}$: Sont les Constantes élastiques du troisième ordre.

Pour une onde plane longitudinale ($U_2 = U_3 = 0$), l'´equation de propagation non linéaire quadratique se déduit des équations (2.8a) ou (2.8b) :

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial a_1^2} - \frac{1}{V_L^2} \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} = 2\beta \frac{\partial U_1}{\partial a_1} \frac{\partial^2 U_1}{\partial a_1^2} \quad \textbf{(2.7)}$$

Où $V_L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{k + 4/3\,\mu}{\rho_0}}$ est la vitesse de propagation des ondes longitudinales en régime linéaire. Le coefficient de non linéarité quadratique est défini par les relations :

$$\beta = -\left(\frac{3}{2} + \frac{A + 3B + C}{\lambda + 2\mu} \right) = -\frac{3C_{11} + C_{111}}{2C_{11}} \quad \textbf{(2.8)}$$

$$\beta = -\left(\frac{3}{2} + \frac{l + 2m}{\lambda + 2\mu} \right) \quad \textbf{(2.9)}$$

λ, μ : Constantes de lamé.

l, m, n : Constantes d'élasticités du troisième ordre dites de Murnaghan.

Le coefficient de non linéarité cubique δ [**OSTR 01**], s'exprime en fonction des constantes d'élasticité de Murnaghan **[MURN 51]** l, m, n comme:

$$\delta = -\left(\frac{3\,l + 2\,m}{2\,\lambda + \mu} \right) \qquad \textbf{(2.10)}$$

Les relations entre les constantes d'élasticité de Landau $(A,\ B,\ C)$ et celles dites de Murnaghan (l, m, n) sont **[MURN 51]** :

$$l = B + C\,, \quad m = \frac{A}{2} + B\,, \quad n = A \qquad \textbf{(2.11)}$$

Différentes valeurs du coefficient β ont pu être déterminées par différents auteurs afin de caractériser les matériaux. Elles sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 2.1: Paramètre non linéaire quadratique β pour différents types de matériaux.

Matériau	**Valeur du coefficient β**
Grés **[JOHN 96]**	-9600
Granite **[JOHN 96]**	-441
Béton **[PAYA 09]**	-157
Béton **[SHKO 05]**	-139
Silice **[COUL 10]**	-3,75
Air **[HAMI 97]**	1.2
Titane **[COUL 10]**	2.5
Eau distillée à 20°C **[HAMI 97]**	3.5
Duralumine **[COUL 10]**	5.5
Os trabéculaire **[RENA 08]**	440
Céramique **[JOHN 96]**	24 000

Les valeurs de β présentent une grande disparité de signe et de valeur absolue. Plus la valeur absolue de β est élevée, plus la non linéarité est importante.

2. 3. 2. Non linéarité non classique

L'élasticité non linéaire non classique dans les solides se manifeste par des phénomènes que la théorie non linéaire classique de Landau **[Land 59]** ne peut pas décrire.

On parle aussi de comportement hystérétique car la relation contrainte/déformation possède une boucle d'hystérésis, c'est-a-dire que le chemin est différent suivant le sens d'application de la contrainte (ou déformation) (**Fig2.4**).

Les observations fondamentales qui ont pu être réalisées pour dénoter la non linéarité dans les solides viennent d'essais quasi-statiques permettant de déterminer la courbe contrainte-déformation. Ils sont effectués à l'aide d'une configuration expérimentale basée sur l'application d'une contrainte axiale accompagnée d'une mesure de la déformation dans la même direction **[RASO 97, GUYE 00]**. Le matériau est ainsi soumis à un certain protocole de contrainte durant lequel la courbe contrainte-déformation est tracée (**Fig2.4**).

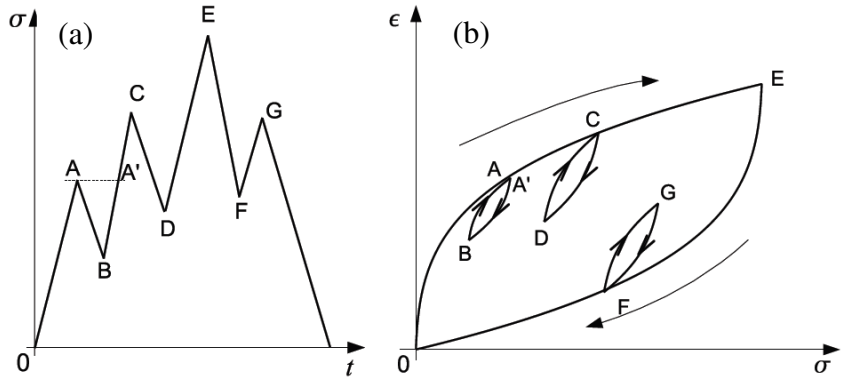


Figure 2.4: (a) : Protocole de contrainte appliqué à un matériau fissuré (b) : Courbe de contrainte-déformation avec une boucle d'hystérésis issue de protocole applique **[BENT 05, BLAN 13]**.

Durant cette expérience, une forte non linéarité dans la relation contrainte déformation a été mise en évidence. Cela se traduit par l'apparition de boucles d'hystérésis multi-échelle qui témoigne d'un comportement sensible à l'historique de la contrainte appliquée, phénomène qui n'est pas observé sur des échantillons non fissurés ou non granulaire. De plus, à chaque fois que le protocole impose un changement de sens à la contrainte appliquée, le matériau exhibe une mémoire ("end point memory") matérialisée par les points A, C et F sur la **Figure2.4**, et montrant ainsi une capacité à se souvenir du dernier état de déformation maximale **[OSTR 01, MCCA 94]**. Ces expériences quasi-statiques confirment ce

comportement non linéaire particulier à certains matériaux tels que les roches, les bétons et les matériaux endommagés.

Ces manifestations ont d'importantes conséquences sur le module élastique du matériau. En d'autres termes, les essais quasi-statiques montrent que la valeur du module est bien dépendante de l'historique de la contrainte, de la relation contrainte-déformation et des changements discontinus **[ABEE 96]**.

$$E(\varepsilon,\dot{\varepsilon}) = E_0\left(1-\beta\varepsilon-\delta\varepsilon^2-\cdots\right)-\alpha\left(\varepsilon,\dot{\varepsilon}\right) \qquad \textbf{(2.12)}$$

$\dot{\varepsilon}$: Est la vitesse de déformation.

β et δ représentent respectivement les paramètres élastiques quadratiques et cubiques, α : est le paramètre non linéaire hystérétique.

De point de vue de la propagation des ondes acoustiques, cette équation décrit le module élastique de façon à bien séparer les effets non linéaires classiques et hystérétiques.

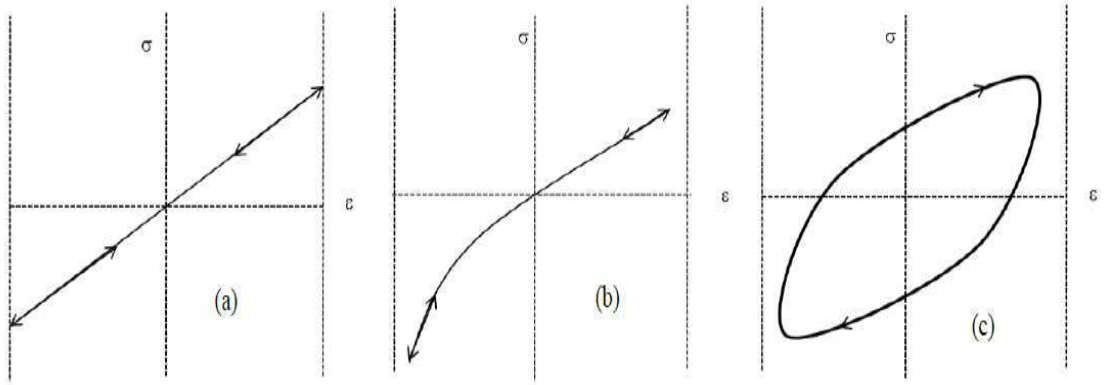


Figure 2.5: Relation contrainte/déformation : (a) linéaire, (b) non linéaire classique, (c) non linéaire hystérétique **[BACC 13]**.

2. 3. 3. Définition des paramètres non linéaires hystérétiques

Le paramètre de non linéarité hystérétique α de l'équation (2.14) peut également être déterminé autrement par l'intermédiaire de l'étude du comportement d'un matériau en résonance en se basant sur la technique de Non linear Resonance Ultrasound Spectroscopy (NRUS). A l'état

intact, le matériau est linéaire et ne manifeste aucune variation dans son comportement en résonance lorsque l'amplitude d'excitation croît. Par contre lorsque le même matériau est endommagé (accumulation des microfissures ou d'hétérogénéités) **[BACC 13]**, il devient non linéaire. Cela se manifeste par un décalage de la fréquence de résonance en fonction de l'amplitude d'excitation.

A partir de l'équation (2.14), il a été possible de déterminer les paramètres de non linéarité hystérétiques α_f et α_Q pour différents matériaux **[GUYE 99b, JOHN 05]**.Ces paramètres mesurent l'importance des effets hystérétiques élastique et dissipative dans le contexte de la méthode de résonance non linéaire (**Fig2.5**).

Le paramètre de non linéarité hystérétique élastique lié au module élastique est défini comme étant :

$$\alpha_f = -\frac{1}{\varepsilon}\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{1}{\varepsilon}\frac{f(\varepsilon) - f_0}{f_0} \qquad \textbf{(2.13)}$$

Avec $f(\varepsilon)$ est la fréquence de résonance détectée à la déformation ε, f_0 est la fréquence de résonance linéaire obtenue à faible amplitude de déformation, Δf est la chute de la fréquence de résonance provoquée par la déformation ε (**Fig2.6**).

Le paramètre de non linéarité hystérétique dissipative lié à l'amortissement α_Q s'écrit sous la forme **[BACC 13]** :

$$\alpha_Q = \frac{1}{\varepsilon}\Delta\left(\frac{1}{Q}\right) = \left(\frac{1}{Q(\varepsilon)} - \frac{1}{Q_0}\right)\frac{1}{\varepsilon} \qquad \textbf{(2.14)}$$

Où Q_0 est le facteur de qualité linéaire mesuré à faible déformation, $Q(\varepsilon)$ est le facteur de qualité mesuré pour des déformations plus importantes.

Le facteur de qualité est calculé moyennant l'élargissement du pic de résonance à -3dB:

$$Q = \frac{f}{\delta f} \qquad \textbf{(2.15)}$$

Où δf est la largeur du pic de résonance à -3dB.

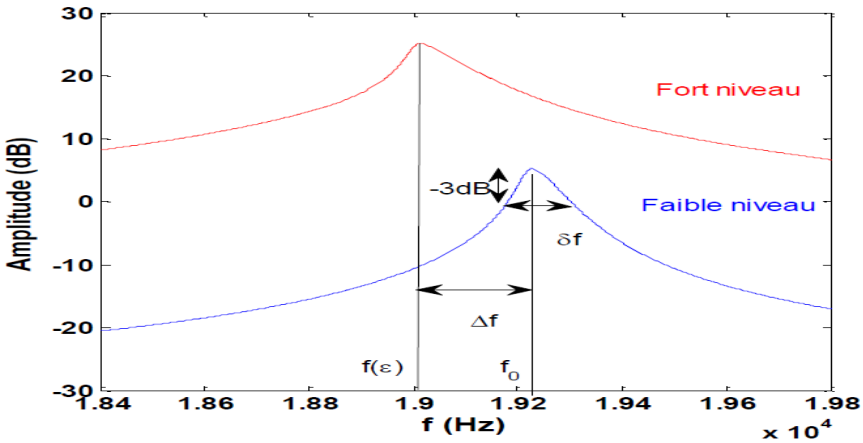


Figure 2.6: Principe de détermination des paramètres non linéaires hystérétiques à partir des courbes de résonances **[BACC 13].**

2. 4. Vibration en flexion d'une poutre encastrée-libre

2. 4.1. Equation des poutres

Dans le cadre de la théorie de **Timoshenko** l'équation différentielle donnant l'amplitude X(x) de la déformée en fonction de la pulsation ω s'écrit **[THOM 98, TIMO 21]**:

$$\frac{EI}{\rho S}\frac{\partial^4 X}{\partial x^4} - \omega^2 X = 0 \qquad \textbf{(2.16)}$$

Où E : est le module de Young, ρ : est la masse volumique.

S : Représente l'air de la section droite. $I = \frac{bh^3}{12}$: Est le moment d'inertie de la section droite.

La solution de cette équation différentielle d'ordre 4 s'écrit comme :

$$X(x) = Achk_n x + Bshk_n x + C\cos k_n x + D\sin k_n x \qquad \textbf{(2.17)}$$

$k_n^{\ 4} = \frac{\rho S \omega_n^{\ 2}}{EI}$ **:** Est le nombre d'onde, n=1, 2,3,...

Les constantes *A, B, C, D* sont calculées à partir des conditions initiales et des conditions aux limites.

Il existe une infinité de valeurs qui permettent à k_n de répondre à la solution du système. En effet, chacune de ses valeurs ($k_1, k_2, k_3, ...$) correspond à un mode de vibration.

Les fréquences propres sont obtenues à partir du nombre d'onde. Il s'agit d'imposer au modèle de la poutre (équation d'amplitude) les conditions qui correspondent à l'effet physique de ses appuis. Les conditions aux limites dans le cas d'une poutre encastrée-libre sont :

$$w(0,t) = \frac{\partial w(0,t)}{\partial x} = 0 \quad et \quad \frac{\partial^2 w(L,t)}{\partial^2 x} = \frac{\partial^3 w(L,t)}{\partial^3 x} = 0 \qquad \textbf{(2.18)}$$

w : Est le déplacement transversal (amplitude du mouvement)

Où w est à qui donne:

$$\begin{cases} A + C = 0 \\ B + D = 0 \\ Achk_n L + B\cos k_n L + Cshk_n L + D\sin k_n L = 0 \\ k_n^{\,2}\left(Achk_n L + B\cos k_n L - Cshk_n L - D\sin k_n L\right) = 0 \end{cases} \qquad \textbf{(2.19)}$$

Qui est une solution non triviale si :

$$\frac{chk_n L + \cos k_n L}{shk_n L - \sin k_n L} = \frac{shk_n L + \sin k_n L}{chk_n L + \cos k_n L} \qquad \textbf{(2.20)}$$

Soit :

$$chk_n L \cos k_n L + 1 = 0 \qquad \textbf{(2.21)}$$

Les pulsations s'obtiennent à partir de la condition

$$k_n^{\,4} = \frac{\rho S \omega_n^{\,2}}{EI} \quad \Rightarrow \omega_n = (k_n)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho S}}, \quad n = 1,2,3,... \qquad \textbf{(2.22)}$$

Les valeurs pour calculer les pulsations sont : $k_1 = 1{,}875, \quad k_2 = 4{,}694, \quad k_3 = 7{,}854, \quad k_4 = 10{,}995,...$

La **Figure2.9** représente les trois premières solutions de l'équation dans la configuration encastrée-libre.

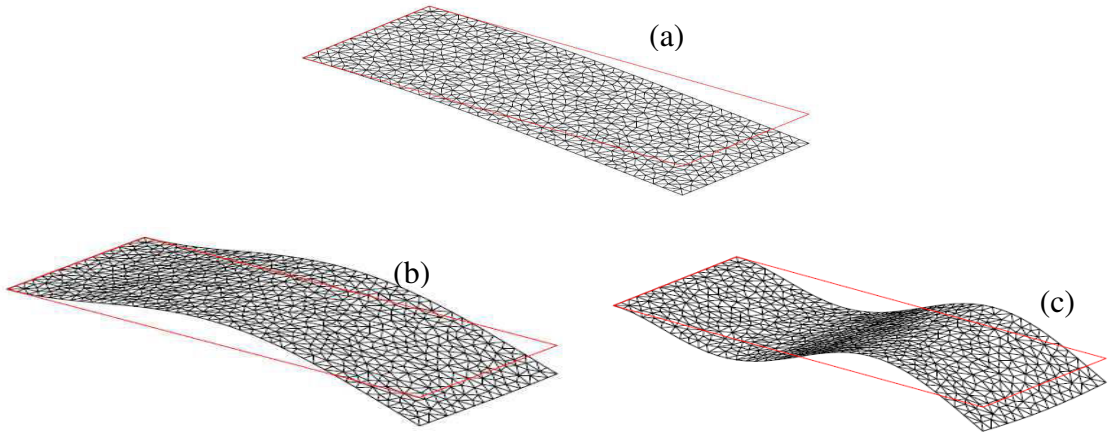


Figure 2.9 : Les trois premiers modes en flexion d'une poutre encastrée-libre, (a) : Mode1, (b) : Mode2, (c): Mode3.

2. 4. Génération d'harmoniques

La méthode de génération d'harmoniques est basée sur la déformation d'une onde sinusoïdale de forte intensité traversant un matériau. Lorsque le matériau ne présente pas d'hétérogénéité, les différentes zones excitées par les ondes acoustiques vibrent à la même vitesse, l'onde acoustique ne subit alors aucune perturbation et sa forme reste la même. Par contre, la présence d'hétérogénéité dans le milieu traversé est à la source d'une élévation locale de la densité et du module durant la compression et d'une diminution locale de la densité et du module durant la dilatation. Cela a pour conséquence de changer la forme de l'onde et de son contenu spectral. L'onde reçue n'est plus sinusoïdale mais contient alors des harmoniques d'ordre supérieur (**Fig2.10**). Ce phénomène peut être utilisé comme moyen de caractérisation de l'endommagement **[BENT 05]**. Dans ce cas, l'indicateur qui pourrait être utilisé est basé sur le coefficient de non linéarité quadratique β défini comme suit :

$$\beta = \frac{8}{k_n{}^2 a} \frac{A_2}{A_1^2} \qquad \textbf{(2.23)}$$

Où k_n est le nombre d'onde, a est la distance de propagation, et A_1 et A_2 sont les amplitudes du fondamental et de la 2^{éme} harmonique, respectivement.

Si le matériau hétérogène est traversé, simultanément, par deux ondes sinusoïdales, nous aurons un phénomène de modulation qui se traduit par l'apparition d'harmoniques

accompagnées de lobes latéraux dont les fréquences représentent les sommes et différences des fréquences initiales des deux ondes primaires (**Fig2.10**)

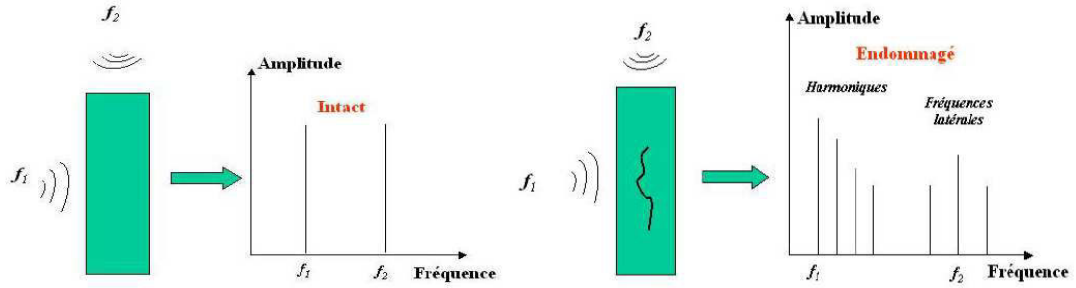


Figure 2.10: Génération d'harmonique (multiples entiers de la fréquence d'excitation) et de lobes latéraux dans un matériau endommagé **[BENT 05]**.

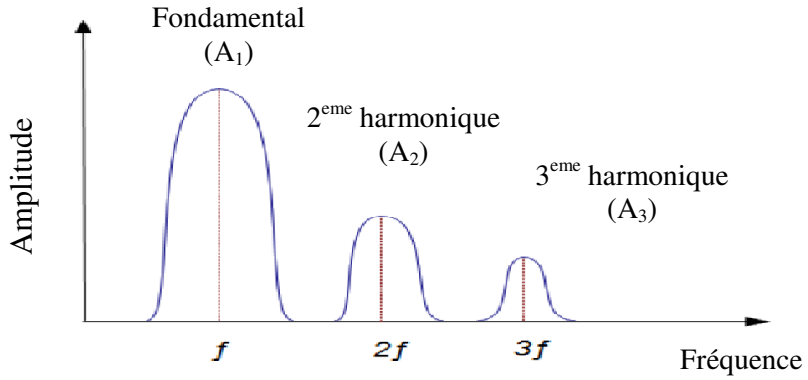


Figure 2.11: Transformée de Fourier d'un signal non linéaire déformé lors de sa propagation dans un matériau endommagé, la valeur du paramètre non linéaire β est déterminée, à partir de deux premiers pics **[BENT 05]**.

Au cours de la propagation d'une onde monochromatique de fréquence f_1 dans un milieu non linéaire, elle se distord et la non linéarité du milieu génère d'autres ondes de fréquences f_1-f_1=0 et f_1+f_1=2f_1. Les termes non linéaires sont proportionnels à la distance x, au paramètre β, au carré de fréquence et de l'amplitude (*A*) de la source. Si la source contient plus d'une fréquence, le spectre sera plus riche en harmoniques. Dans le cas de deux fréquence f_1 et f_2, la non linéarité du milieu va créer des ondes de fréquence 2f_1, 2f_2, f_1-f_2, f_1+f_2 (**Fig2.10**) **[JOHN 96]**. Tant que les résultats expérimentaux montrent que les harmoniques paire et impaire (2f, 3f) sont proportionnelles à A^2 et A^3 respectivement, nous sommes toujours dans le cadre de la théorie non linéaire classique. Les amplitudes des

harmoniques générées par la non linéarité classique s'écrivent sous la forme : $A_{if} \alpha A_f^i$, où i est l'ordre de l'harmonique considérée. Par contre, si la non linéarité classique du matériau se développe jusqu'à ce que cela ne soit pas vrai, nous sommes dans le cas d'un comportement hystérétique. Ce dernier cas exige de développer la relation contrainte-déformation à un ordre supérieur en mettant en jeu le paramètre δ pour exprimer la forte non linéarité, ainsi que le paramètre α pour tenir compte de l'hystérésis. En effet, dans le cas d'un matériau purement hystérétique, nous ne pouvons générer une 2ème harmonique "2f " mais une 3ème harmonique "3f" dont l'amplitude est proportionnelle au carrée de l'amplitude de l'excitation (**Fig2.12**).

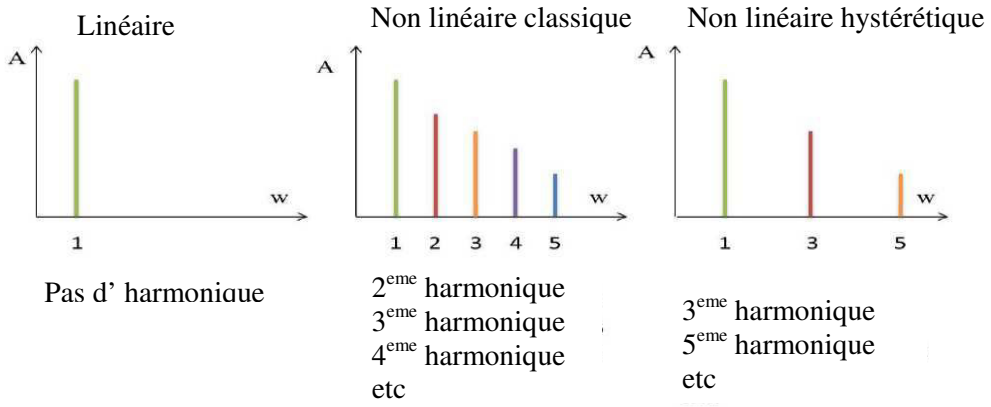


Figure 2.12: Spectre d'amplitude de déformation en fonction de la fréquence pour les différents cas de non linéarité **[ABEE 00]**.

2. 5. Méthode SSM "Scaling Subtraction Method"

La SSM « ScalingSubtraction Method », developpée par Scalerandi et al en 2008 **[SCAL 08]**, est basée sur la rupture de la proportionnalité entre l'excitation et sa réponse, vérifiée dans le cas d'un système linéaire. En effet si on considère $u_0(t)$ la réponse du système à une excitation d'amplitude A_0, sa réponse pour une excitation d'amplitude A est u(t). Dans ce cas cette dernière est différente de $\frac{A}{A_0} u_0(t)$.

Alors, on excite en premier avec une amplitude A_0 suffisamment faible pour avoir une réponse linéaire. Pour une ième excitation d'amplitude A_i, si le système est linéaire on obtient

une réponse $u_{ref}(t) = \frac{A_i}{A_0} u_0(t)$, appelé signal référence pour la ième amplitude d'excitation. Quand le système devient non linéaire, sa réponse $u_i(t)$ sera différente, et la signature de la non linéarité sera contenue dans la différence entre les deux signaux **[SCAL 08]**.

$$W_i(t) = u_i(t) - u_{ref}(t) \qquad \textbf{(2.24)}$$

$W_i(t)$ est le signal SSM.

A partir de là, des indicateurs SSM ont été définis pour la ième amplitude. L'énergie du signal SSM est définie par :

$$y_i^{SSM} = \frac{1}{T}\int_0^T W_i^2 dt / x_i \qquad \textbf{(2.25)}$$

Où x_i est l'énergie de l'excitation définie par :

$$x_i = \frac{1}{T}\int_0^T u_i^2(t) dt \qquad \textbf{(2.26)}$$

T : La fenêtre temporelle correspondant au début du signal.

En utilisant une représentation en échelle logarithmique de y en fonction de x, on peut définir une loi de puissance entre l'énergie du signal SSM et celle de l'excitation par $y^{SSM} = ax^b$, où « a » est un coefficient relié à la force de la réponse de la non linéarité et « b » est relié au type de la non linéarité ; dans le cas linéaire $b = 0$ **[SCAL 15]**.

2. 5. Méthode d'interférométrie par onde de Coda

Le béton est un matériau composite qui présente plusieurs phases dispersées. Ces phases jouent le rôle de diffuseurs et conduisent à une dispersion spatiale de l'onde incidente. La multiplicité des hétérogénéités va conduire à l'apparition d'une diffusion à très grande échelle : la diffusion multiple (**Fig2.13**). Celle-ci a plusieurs conséquences bien identifiables sur le signal de l'onde reçue.

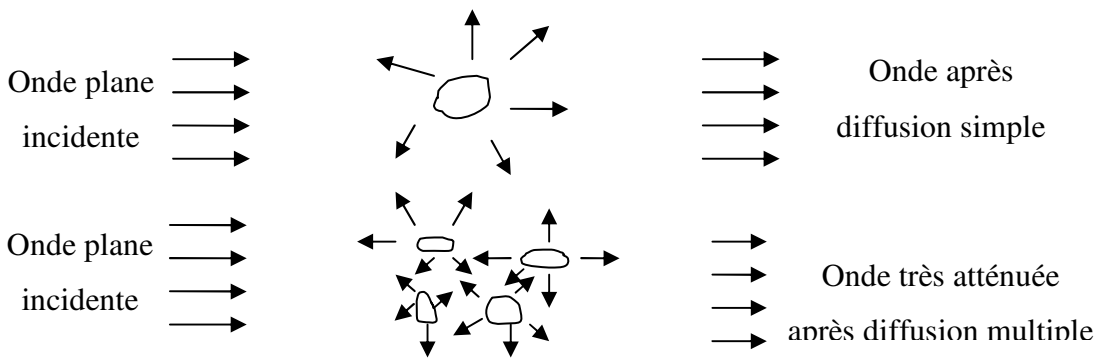


Figure 2.13: Phénomène de la diffusion multiple.

Dans un premier temps, il est possible d'observer une très nette diminution de l'amplitude de la partie cohérente (signal direct) du signal reçu. La partie cohérente pouvant être décrite comme la partie du signal ultrasonore résistant au moyennage spatial. Elle a alors conservé la phase par rapport au signal émis.

La diffusion va également avoir pour conséquence la génération d'ondes incohérentes, qui sont des ondes n'ayant pas parcouru le même trajet direct au sein du matériau, ce dernier étant fonction des diffuseurs rencontrés lors de leurs parcours. La partie incohérente du signal, appelée « ***coda*** », en référence à la partie finale d'une pièce musicale, est clairement distincte sur des signaux d'ondes ayant traversé du béton (**Fig2.14**), contrairement à des matériaux sans diffuseurs, comme les aciers à grains fin, ou l'eau.

2. 5.1. Théorie de CODA

La coda est le nom que donne au passage terminal d'une musique ou d'un mouvement (Coda, queue en italien). En signal, elle correspond à la dernière partie de la phase décroissante dont la durée est variable selon les cas étudiés. En sismique, la coda a longtemps été assimilée à du bruit au vu de sa forme d'onde aléatoire. En effet, les diffusions successives déforment les ondes et rendent de ce fait toute prédiction de la forme du signal détecté difficile voire impossible **[PAYA 07]**. Cependant, la coda reste parfaitement déterministe dans le sens où deux enregistrements successifs réalisés au même endroit, avec la même source et le même récepteur, donneront le même signal, au bruit près. Par contre, elle a un caractère chaotique dans le sens où lorsqu'un seul des diffuseurs est modifié le signal

enregistré est fortement perturbé et ce d'autant plus que l'on est tard dans l'enregistrement (**Fig2.14**) **[BERT 91, SNIE 07].**

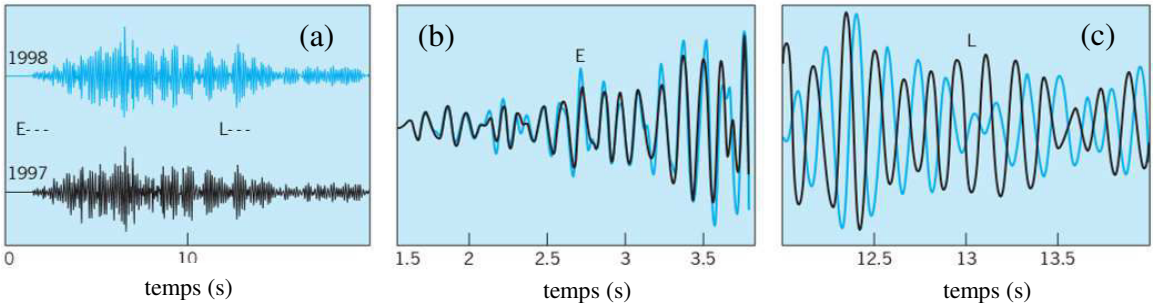


Figure 2.14: (a) **:** Signaux enregistrés lors de l'activité du volcan Merapi pour la même source et le même récepteur, Juillet 1997 (noir) et Juillet 1998 (bleu). (b) : Signal au début d'intervalle de temps, onde directe (diffusion simple). **(c)** : Signal à la fin d'intervalle de temps (diffusion multiple) **[WEGL 99]**.

En 1975, Aki et Chouet se sont intéressés à ces ondes et ont montré qu'elles étaient porteuses d'information **[SNIE 06]**. Dans leurs travaux, ils ont montré que la décroissance temporelle de l'énergie de la coda est une caractéristique régionale et est de ce fait indépendante des propriétés de la source (sa localisation, son mécanisme, etc.). L'exploitation de l'information transportée par la coda peut être effectuée par la technique de l'interférométrie par ondes de coda ou CWI (Coda Wave Interferometry). Cette dernière permet d'observer, en fonction du temps, les changements des conditions de propagation des ondes acoustiques dans un milieu multi-diffusant.

Mathématiquement cela revient à supposer qu'à un endroit donné (où le capteur est positionné par exemple), le champ d'onde $u(t)$ peut être considéré comme une somme d'ondes qui se propagent le long de tous les chemins p possibles, tel que présenté dans l'équation (2.30), **[AKI 69, AKI 75, SNIE 99]** :

$$u(t) = \sum_{p} s_p(t) \qquad \textbf{(2.27)}$$

Par ailleurs, il est important de souligner que l'onde coda est particulièrement sensible aux variations, même faibles, des conditions de propagation. Le changement dans le temps de

propagation de l'onde qui se déplace le long du chemin p est noté par τ_p. Le champ d'onde perturbé s'écrit alors:

$$\tilde{u}(t) = \sum_p s_p(t - \tau_p) \qquad \textbf{(2.28)}$$

L'exploitation de deux enregistrements d'ondes acoustiques $u(t)$ à la date t_1 et $\tilde{u}(t)$ à la date t_2 peut être exploitée à travers la définition d'un coefficient de corrélation $R(t_s)$. En effet, à un instant donné, la CWI détermine le coefficient $R(t_s)$ en supposant une fenêtre temporelle de courte durée $2T$ centrée à l'instant considéré t où T << t. Dans ces conditions le coefficient de corrélation est donné par **[SNIE 06]**:

$$R(t_s) = \frac{\int_{t-T}^{t+T} u(t')\tilde{u}(t'+t_s)dt'}{\sqrt{\int_{t-T}^{t+T} u^2(t')dt' \int_{t-T}^{t+T} \tilde{u}^2(t'+t_s)dt'}} \qquad \textbf{(2.29)}$$

où t_s est le décalage entre les deux signaux $u(t)$ et $\tilde{u}(t)$.

La connaissance du maximum du coefficient de corrélation $R(t_s) = R_{\max}$ nous permet d'accéder au décalage maximal $t_s = t_{\max}$ entre les signaux considérés.

Une analyse temps-fréquence est effectuée sur le signal temporel (**Fig2.15**) afin de déterminer le maximum du coefficient de corrélation en fonction du temps pour différentes fenêtres.

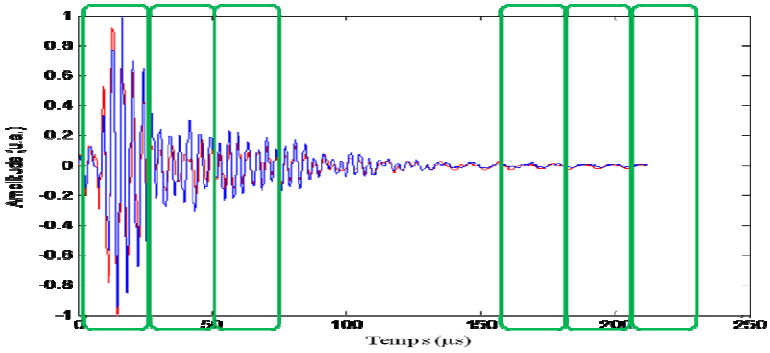


Figure 2.15 : Signal temporel obtenu après une propagation des ondes ultrasonores dans du béton et présentation du principe de fenêtrage temporel utilisé lors du traitement de l'information.

- Chaque signal temporel est divisé en plusieurs fenêtres temporelles de largeur de 2T.
- La transformée de Fourier discrète de chaque fenêtre temporelle est ensuite effectuée.
-Le coefficient de corrélation est calculé pour chaque fenêtre fréquentielle et par la suite le maximum du coefficient de corrélation est déterminé, ce maximum correspond au décalage temporelle entre les signaux considérés.
- Enfin, chaque valeur de décalage temporel est associée à une valeur discrète de temps, déterminée comme étant le centre de la fenêtre temporelle correspondante.

2. 6. Conclusion

En tenant compte de la sensibilité des ultrasons aux différents paramètres structuraux du béton (porosité, teneur en eau, défauts,…), l'acoustique non linéaire présente un fort potentiel dans le cadre de la caractérisation non destructive des matériaux. Elle est en mesure d'apporter des informations complémentaires à celles obtenues par acoustique linéaire.

Dans la suite de cette étude, nous nous attachons dans un premier temps à la description de la propagation des ondes ultrasonores dans du béton ainsi que son interaction avec un défaut mésoscopique. La capacité de ces ondes à caractériser un défaut mésoscopique sera ensuite éprouvée expérimentalement sur des échantillons en béton base polymère.

Référence bibliographique

[ABEE 00] ABEELE, V. K. A ; Johnson,; Sutin. A., « Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, partI: Nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS) », Res Nondestr Eval, vol 12, pp:17–30, 2000.

[ABEE 96] ABEELE, V. K. A , « Elastic pulsed wave propagation in media with second- or higher- order nonlinearity. Part I: theoretical framework», the Journal of the Acoustical Society of American, Vol. 99, pp: 3334-3345, 1996.

[AKI 75] AKI, K., CHOUET, B., "Source, Attenuation, and Scattering Effects Origin of Coda Waves", J. Geophys. Res. Vol 80, N 23, 1975.

[AKI 69] AKI , K., "Analysis of the Seismic Coda of Local Earthquakes as scattered Waves", J.Geophys. Res. Vol 74, N 2, 1969.

[BACC 13] Y. BACCOUCHE., « Caractérisation non linéaire de l'endommagement des matériaux composites par ondes guidées », thèse de doctorat, université du Maine, 2013.

[BENT 05] BENTAHAR, M., " Acoustique non-linéaire : application à la caractérisation ultrasonore de l'endommagement des matériaux hétérogène et à la prédiction de la durée de vie », thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005,

[BERT 91] BERTHAUD, Y., "Damage Measurement in Concrete via an Ultrasonic Technique - Part I Experiment", Cement and Concrete Research, Vol 21, pp: 73-82 , 1991.

[BLAN 13] BLANLOEUIL, P., « Analyse de la non-linéarité acoustique de contact pour l'Evaluation et le Contrôle Non Destructif », thèse de doctorat, université Bordeaux, 2013.

[COUL 10] COULOUVRAT, F., « Bases en acoustique non linéaire », 2010.

[GOLD 71] GOL'DBERG, Z. A., « Interaction of plane longitudinal and transverse elastic waves », Sov Phys Acoust, Vol 6, pp : 306–310, 1971.

[GUYE 99a] GUYER, R. A; JOHNSON, P. A., "Nonlinear Mesoscopic Elasticity: Evidence for a New Class of Materials", Physics Today, Vol 52(4), pp.30–36, 1999.

[GUYE 99b] GUYER, R. A; TenCate, J. A; Johnson, P. A., "Hysteresis and the dynamic elasticity of consolidated granular materials", Phys. Rev. Lett, Vol. 82 (16), pp: 3280-3283,1999.

[HAMI 97] HAMILTON, M.F ; BLACKSTOCK, D.T., « Non linear acoustics », Recherche, 67, p : 02, 1997.

[JOHN 05] JOHNSON, P.A; Zinszner, B; RASOLOFOSAON, P; COHEN-TENOUDJI, F; Van Den Abeele, K.E.-A., ''Dynamic measurements of the nonlinear elastic parameter α in rock under varying conditions,'' Journal of Geophysical Research, Vol 117, pp:124-130, 2005.

[JOHN 96] JOHNSON, P. A; ZINSZNER, B; RASOLOFOSAON, P. N. J., ''Resonance and elastic nonlinear phenomena in rock''J. Geophys. Res.,Vol.101, pp: 11553–11564, 1996.

[KHYN 09] KYUNG-YOUNG, J., « Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material », A review, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol 10(1), pp :123–135, 2009.

[LACO 03] LACOUTURE, J. C; JOHNSON, P. A; COHEN-TENOUDJI, F., "Study of critical behaviour in concrete during curing by application of dynamic linear and nonlinear means", J. Acoust. Soc. Am, Vol 113, N3, pp: 1325-1332, 2003.

[LAND 59] LANDAU, L. D; LIFSHITZ, E. M.," theory of elasticity", Pergamon, Tarrytown, NY, Vol 187, 1959.

[LEEY 95] LEE Y, S ; Hamilton, M. F., « Time domain modeling of pulsed finite-amplitude sound beams ». J. Acoust. Soc. Am, Vol97(2), pp : 906–917, 1995.

[MCCA 94] MCCALL, K.R ; GUYER, R.A., « Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials », J. Geophys. Res., Vol 99(B12), pp :23887–23897, 1994.

[MOUS 02] MOUSSATOV, A; CASTAGNIEDE, B.; GUSEV, V., "Frequency up-conversion and frequency down- conversion of acoustic waves in damaged materials", Phys. Lett. A, Vol. 301, pp: 281 90 , 2002.

[MURN 51] MURNAGHAN, F. D., « finte deformations of elastoc solids », Chapman and Hall, New York, 1951.

[OSTR 01] OSTROVSKY, L. A; JOHNSON, P., "dynamic nonlinear elasticity in geomaterials", la rivisita del nuavo cimento, Vol 24, p: 1-46, 2001.

[PAYA 14] PAYAN, C ; LE BAS, P.Y ; GARNIER, V ; ULRICH, . T.J ; GRIFFA, M., « Caracterisation non destructive du comportement élastique non linéaire du béton : potentiel, limitations et perspectives », partie1 : évaluation non destructive des matériaux, 2014.

[PAYA 09] PAYAN, C., « Determination of third order elastic constants in a complex solid applying coda wave interferometry », Applied Physics Letters, Vol 94, N1, pp : 011904–011904, 2009.

[PAYA 07] PAYAN, C., GARNIER, V., MOYSAN, J., JOHNSON, P. A., "Applying nonlinear resonant ultrasound spectroscopy to improving thermal damage assessment in concrete", J. Acoust. Soc. Am, Vol 121, N4, EL125-EL130, 2007.

[QUIV 12] QUIVIGER, A., « Ultrasons diffus pour la caractérisation d'une fissure dans le béton Approche linéaire et non linéaire » ; thèse de doctorat, ecole doctorale sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique (Marseille), 2012.

[RASO 97] RASOLOFOSAON, P.N.J ; ZINZSNER, B ; JOHNSON, P.A., « Propagation of elastic waves in nonlinear materials survey of laboratory results on rock and

geophysical applications », Revue de l'Institut Française du Pétrole, Vol 52(6), pp : 585–608, 1997.

[RENA 13] RENAUD, G ; Rivière, J ; Haupert, S ; Laugier P., « Anisotropy of dynamic acoustoelasticity in limestone, influence of conditioning, and comparison with nonlinear resonance spectroscopy », J. Acoust. Soc. Am, Vol 133, N 6, 2013.

[RENA 08] RENAUD, G., « Mesure de non-linéarités élastiques et dissipatives par interaction d'ondes acoustiques : application à la quantification du micro-endommagement de l'os trabéculaire », thèse de doctorat, université François Rabelais de Tours, 2008.

[SCAL 15] SCALERANDI, M., « Power laws and elastic nonlinearity in materials with complex microstructure », Phys, Lett, A, 2015.

[SCAL 08] SCALERANDI, M ; GLIOZZI, A. S ; BRUNO, C. L. E ; and Van Den Abeele ; K., « Nonlinear acoustic time reversal imaging using the scaling subtraction method », J. Phys. D: Appl. Phys.Vol 41, 2008.

[SHKO 05] SHKOLNIK., « Effect of nonlinear response of concrete on its elastic modulus and Strength », Cement and Concrete Composites, Vol 27(7-8), pp :747–757, 2005.

[SNIE 07] SNIEDER, R., PAGE, J., "Multiple scattering in evolving media", American Institute of Physics, S-0031-9228-0705-020-X, 2007.

[SNIE 06] SNIEDER, R., "The Theory of Coda Wave Interferometry", Pure Appl. Geophys, Vol 163, 2006.

[SNIE 99] SNIEDER, R., "Difuse Waves in Complex Media", In (J.P. Fouque, ed.), pp: 405–454, 1999.

[THOM 98] THOMSON, W; DAHLEH, M., "Theory of Vibration with Applications", 5e edition, Prentice-Hall, 1998.

[TIMO 21] TIMOSHENKO, S., "On the correction of transverse shear deformation of the differential equations for transverse vibrations of prismatic bars," Philosophical Magazine, Vol.41, N6, pp. 744–746, 1921.

[WEGL 99] WEGLER. U ; Luhr, B. G ; Ratdomopurbo, A., « A repeatable seismic source for tomography at volcanoes », Ann. Geofisica, Vol 42, pp : 565–571, 1999.

[ZAIT 03] ZAITSEV, V; GUSEV,V; CASTAGNEDE, B., "Thermoelastic mechanism for logarithmic slow dynamics and memory in elastic wave interactions with individual Cracks" , Phys Rev Let, Vol.90, pp: 075501-075504, 2003.

Chapitre 3

Caractérisation de l'endommagement du béton base polymère

Sommaire

3. 1. Introduction 50
3. 2. Matériau et endommagement 50
3. 2. 1. Elaboration du béton polymère 50
3. 2. 2. Essai mécanique et endommagement du béton polymère 51
3. 3. Caractérisation de l'endommagement 52
3. 3. 1. Caractérisation de l'endommagement par résonance 53
3. 3. 2. Approche multimodale : motivée par le caractère localisé de l'endommagement 53
3. 4. Dispositif expérimental 56
3. 4.1. Résultats 57
3. 4.1. 1. Dynamique rapide 57
3. 4.1. 2. Dynamique lente 58
3. 5. Caractérisation de l'endommagement par Interférométrie d'Ondes Coda (CWI) 60
3. 5.1. Approche classique 60
3. 5.1.1. Dispositif expérimental 60
3. 5. 1. 2. Coefficient de corrélation 61
3. 5. 3. Résultats 61
3. 6. Application simultanée de la CWI et de la résonance non linéaire pour la caractérisation de l'endommagement 62
3. 7. CWI en présence d'une résonance non linéaire 63
3. 8. Localisation d'un défaut mésoscopique dans un béton base polymère 66
3. 8. 1. Dispositif expérimental pour mettre en évidence la résonance. 66
3. 8. 2. Résultats 67
3. 9. CWI en presence d'une résonance linéaire 68
3. 9. 1. Résultats et discussion 69
3. 10. Sensibilité des modes à l'endommagement 71
3. 11. Temps de relaxation et configuration expérimentale 72
3. 11. 1. Résultats 73
3. 12. Choix de la fréquence de la coda 74
3. 12. 1. Résultats expérimentaux 75
3. 13. Localisation de défaut 75
3. 13. 1. CWI simultanément avec la résonance linéaire 75
3. 13. 1. 1. Coefficient de décorrélation *K* 77
3. 14. Sensibilité de mode à caractériser le défaut 79
3. 15. Conclusion 79
Référence bibliographique 81

3. 1. Introduction

Avec le développement de nouvelles technologies de conception et de réalisation, l'heure est à la construction d'habitation à structures légères. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, les bétons à base de granulat légers, connaissent un véritable regain d'intérêt à travers le monde. Au cours de leurs vies, ces matériaux sont soumis à différents types d'agressions externes, d'origines thermique, chimique ou mécanique. Ces différentes sollicitations conduisent à une dégradation des propriétés initiales du béton. Au niveau de la structure du béton, ces endommagements se traduisent, dans un premier temps, par le développement de microfissures. Celles-ci viennent s'ajouter à celles initialement induites par le mécanisme de prise dans le cas de béton de génie civil. Par la suite, pour un niveau de sollicitation plus élevé, l'endommagement se traduit par la génération de macro fissures qui, à terme, peuvent conduire à la rupture. Il est donc particulièrement important de pouvoir caractériser l'état de fissure initial afin, de prévenir au plutôt tout endommagement de la structure.

Ce chapitre se divise en trois parties. La première est une présentation du matériau étudié, de son élaboration et de la méthode utilisée pour l'endommager. La deuxième partie aura pour but de caractériser le défaut en utilisant différentes techniques telles que la résonance non linéaire et l'interférométrie par onde de coda. Cette partie se termine par la présentation d'une technique originale qui consiste à caractériser le défaut mésoscopique par Interférométrie par onde de coda lorsque l'échantillon est mis en résonance linéaire. Enfin, nous discutons les résultats obtenus.

3. 2. Matériau et endommagement

Le matériau étudié est un granulaire consolidé à base polymère de type béton synthétique. La mise en œuvre et l'endommagement du matériau ont été réalisés au cours de la thèse de Rachid Berbaoui soutenues au LAUM en 2010 **[BERB 10]**. Les différentes étapes d'élaboration et d'endommagement sont expliquées ci-dessous.

3. 2. 1. Elaboration du béton polymère

Le béton polymère considéré dans ce travail est réalisé au laboratoire à partir d'une matrice polymère en résine époxyde renforcée par des granulats et du sable, avec les pourcentages suivants : 40% de sable fin, 30% d'agrégats et 30% de résine époxyde. Le moulage est réalisé dans un moule préalablement ciré afin de faciliter le démoulage (**Fig3.1**). Après quelques jours de polymérisation à température ambiante, les éprouvettes parallélépipédiques sont découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir de plaques de (250 x 250) mm^2 de surface et de 15 mm d'épaisseur. Les dimensions des

éprouvettes d'essais sont : L = 162 mm, l = 40 mm et e = 11 mm, où « L », « l » et « e » sont respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur des éprouvettes.

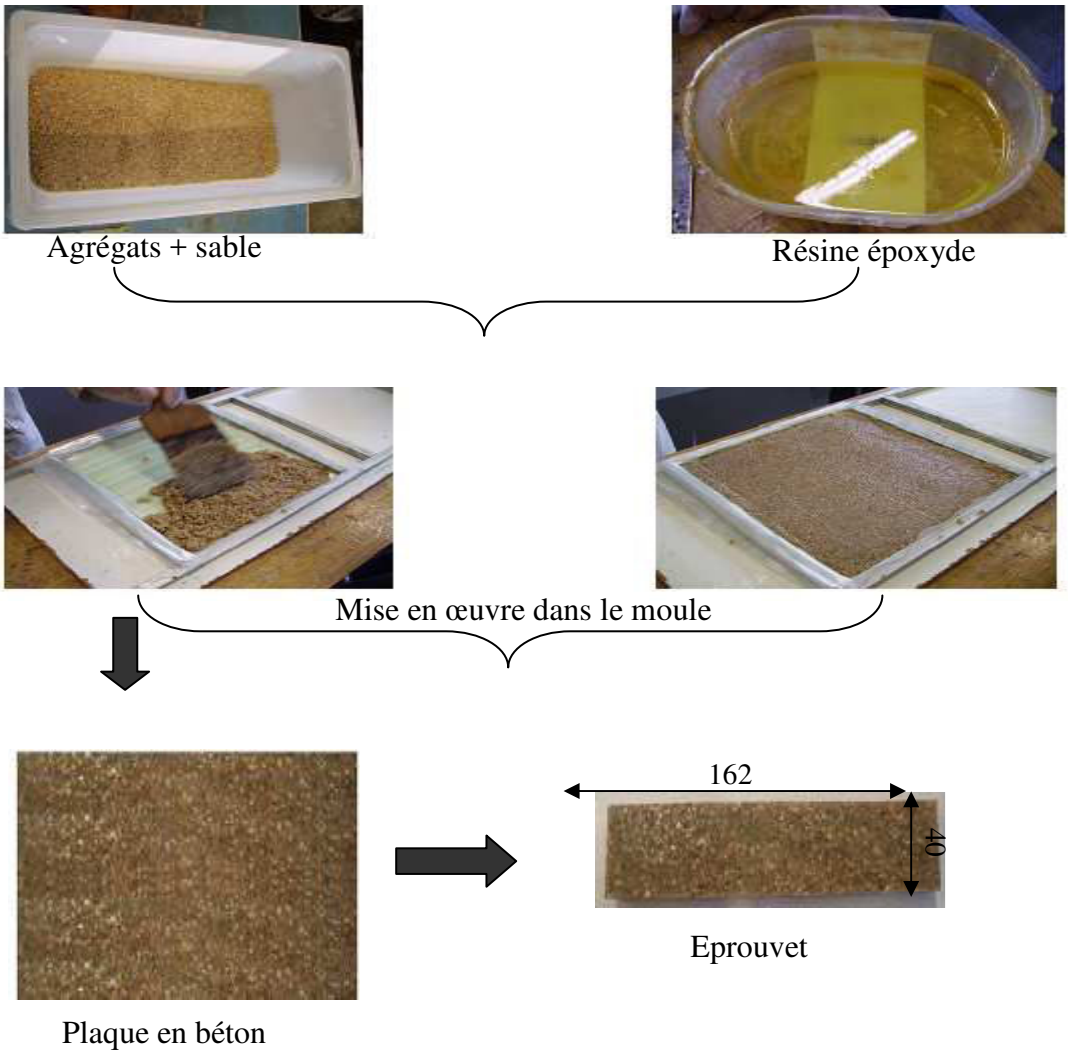


Figure 3.1 : Réalisation d'une plaque de béton base polymère **[BERB 10]**.

3. 2. 2. Essai mécanique et endommagement du béton polymère

Dans le but de créer un défaut de taille mésoscopique dans le matériau granulaire, les éprouvettes parallélépipédiques (162 x 40 x 11) mm^3 sont sollicitées en fluage moyennant un essai de flexion trois points avec une distance entre appuis égale à 120 mm. Les essais sont effectués sur une machine d'essais hydraulique universelle type INSTRON modèle 8516 de capacité 100 kN, pilotée par ordinateur (**Fig3.2**). Les essais de fluage d'une dizaine d'éprouvettes sont effectués avec une charge appliquée de 3 kN.

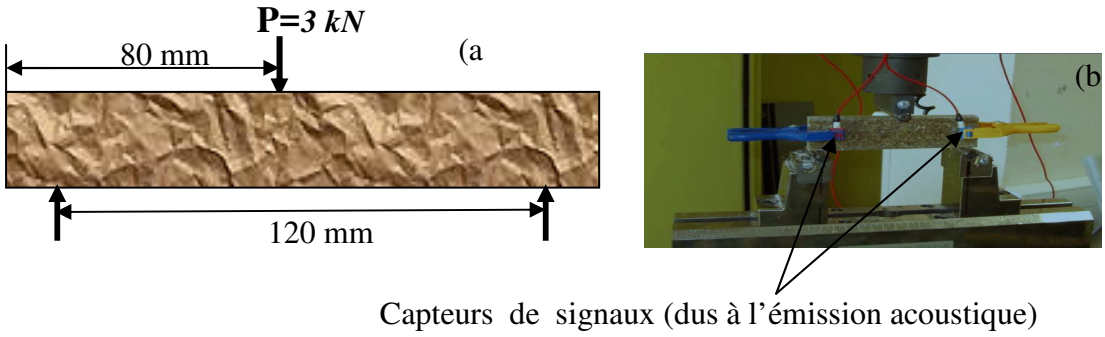


Figure 3.2 : (a) Essai de flexion trois points. (b) Eprouvette montrée sur machine de flexion.

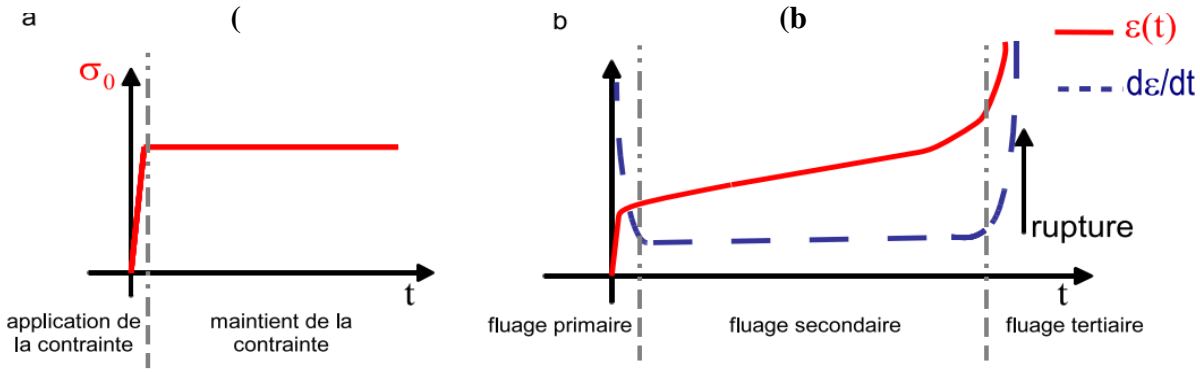


Figure 3.3 : Essai de fluage : (a) contrainte appliquée σ_0, (b) réponse en déformation $\varepsilon(t)$ et taux de déformation $\frac{d\varepsilon}{dt}$ **[ANNE 08].**

Les essais de fluage déterminent la déformation à long terme sous une charge statique. Un chargement constant est appliqué aux matériaux et la déformation est suivie simultanément. La réponse en déformation typique à un essai de fluage sur un matériau composite est généralement divisée en trois parties (**Fig3.3) :**

Fluage primaire : il correspond à une déformation instantanée élastique sous l'effet de la contrainte mécanique initiale suivie d'une déformation dépendante du temps.

Fluage secondaire : il correspond à un taux de déformation quasi constant avec le temps.

Fluage tertiaire : il correspond à une accélération brutale et continue de la déformation menant à la rupture finale du matériau **[NECH 04, NECH 05, ANNE 08]**.

3. 3. Caractérisation de l'endommagement

Dans l'industrie, le C.N.D se limite à la détection de défauts dans une structure. Le terme défaut reste toutefois ambigu. Il correspond à la fois à des hétérogénéités de surface mais également de volume. Les premières sont accessibles à l'observations directe mais pas toujours visibles à l'œil nu. Deux classes sont identifiées : les *hétérogénéités ponctuelles* qui correspondent aux plus « nocives » puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures,

généralement aptes, à terme, à provoquer la rupture de la pièce et les *hétérogénéités d'aspect*, correspondant essentiellement à des variations de paramètres géométriques ou physiques tels qu'un changement de rugosité, d'épaisseur ou l'apparition de taches. Les défauts de volume sont des hétérogénéités de natures de formes et de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité industrielle. En général le béton présente souvent un comportement élastique qualifié non linéaire, entraînant des conséquences importantes sur la propagation des ondes ultrasonores, cette non linéarité élastique est surtout causée par les microdéfauts mécaniques ubiquistes (microfissures, joints de grains, macles, etc...) dont la rigidité varie sous l'effet de la contrainte **[RASO 97, NAZA 07]**. Cette importante diversité de défauts a nécessité le développement d'une grande variété de techniques de Contrôle non destructif.

3. 3. 1. Caractérisation de l'endommagement par résonance

La méthode de résonance est basée sur la sollicitation et le suivi d'un ou de plusieurs modes de résonance en fonction du niveau d'excitation. Lorsqu'il s'agit d'un matériau pris à l'état sain, une augmentation du niveau d'excitation a peu d'effet sur le module élastique du matériau sondé à travers la valeur de la fréquence de résonance. Par contre, lorsqu'il s'agit d'un matériau endommagé, l'élévation de l'amplitude de l'excitation acoustique est suivie d'une perte de raideur appelée 'ramollissement'. Par conséquent, la fréquence de résonance se déplace vers les basses fréquences et les courbes de résonance deviennent plus larges mettant en évidence une augmentation de l'absorption **[BENT 05]**. Dans le cas de ce travail la mise en œuvre de cette méthode est expliquée ci-dessous.

3. 3. 2. Approche multimodale : motivée par le caractère localisé de l'endommagement.

La technique de résonance non linéaire nécessite la connaissance de l'amplitude de la déformation maximale $\Delta\varepsilon$ appliquée à l'échantillon à chaque niveau d'excitation. En effet, suivant les conditions aux limites de la résonance (souvent libre-libre **[JOHN 04]**, ou encastrée-libre **[NAZA 07]**), le champ de déformation varie, modifiant ainsi la position des nœuds et des ventres de vibration. Ainsi, dans le cas particulier où l'endommagement (microfissure ou dislocation) à l'origine du comportement non linéaire hystérétique du matériau se trouve confondu avec un nœud de déformation, la vibration de l'échantillon sera sans effet sur lui et aucun comportement hystérétique ne sera mesuré. On comprend donc aisément que, dans le cas d'une répartition inhomogène des endommagements, la non linéarité globale du matériau dépend du champ de déformation et du mode excité.

De nombreux travaux se sont intéressés à la détermination des paramètres non linéaires : Van den Abeele **[ABEE 00a, ABEE 00b]** et Liu *et al.* **[LIU 10]** ont décrit théoriquement la dépendance modale des paramètres non linéaires, pour un barreau (1-D) en condition libre-libre et en condition encastrée-libre, respectivement. Le décalage en fréquence peut être analytiquement exprimé dans les deux cas par l'équation suivante :

$$\frac{\Delta f}{f} \approx \overline{\alpha} * \left(1 + \frac{4}{3\pi Q}\right) * \left|\sin^3\left(k_{res}\chi_d\right)\right| \Delta\varepsilon \qquad \textbf{(3.1)}$$

Où $\overline{\alpha} = \alpha d/L$ est le paramètre non linéaire hystérétique moyen, proportionnel à la longueur d'un endommagement (de longueur *d*) le long du barreau (de longueur *L*) ; χ_d correspond à la position centrale de l'endommagement ; $\Delta\varepsilon$ est le niveau de déformation maximale ; et Q est le facteur de qualité. Le nombre d'onde $k_{res} = 2\pi / L * (2n-1)$ pour le cas encastrée-libre ou $k_{res} = \pi / L * n$ pour le cas libre-libre, n étant l'ordre du mode de résonance ($n > 0$) **[HAUP 12].** D'après cette expression, on remarque que le paramètre non linéaire α qui correspond à la non linéarité intrinsèque du matériau, dépend des paramètres spatiaux (la position χ_d et la longueur relative d/L de la source hystérétique et des paramètres modaux (Q et k_{res}). Nous remarquons que le rôle de Q est négligeable lorsque le matériau n'est pas très atténuant ($Q < 10$), ce qui est souvent le cas. Prenons quelques exemples pour illustrer la variation du décalage en fréquence en fonction des paramètres spatiaux et modaux.

Pour un matériau dont la distribution des microfissures est homogène sur toute la longueur du barreau ($\overline{\alpha} = \alpha$), la valeur du paramètre non linéaire α ne dépend que du facteur $\left|\sin^3\left(k_{res}\chi_d\right)\right|$. La valeur moyenne de ce facteur est comprise entre 0.42 et 0.55 selon les conditions aux limites et le mode de vibration considéré **[HAUP 12]**. Ainsi pour un échantillon ayant une distribution homogène des sources non linéaires, la valeur de la non linéarité non classique intrinsèque α peut varier de 19%, seulement à cause des conditions aux limites et du choix du mode excité.

Si nous ne regardons plus la valeur moyenne du facteur $\left|\sin^3\left(k_{res}\chi_d\right)\right|$ mais sa valeur en chaque point du barreau, le coefficient de proportionnalité est clairement différent suivant le mode et les conditions aux limites (**Fig3.4**).

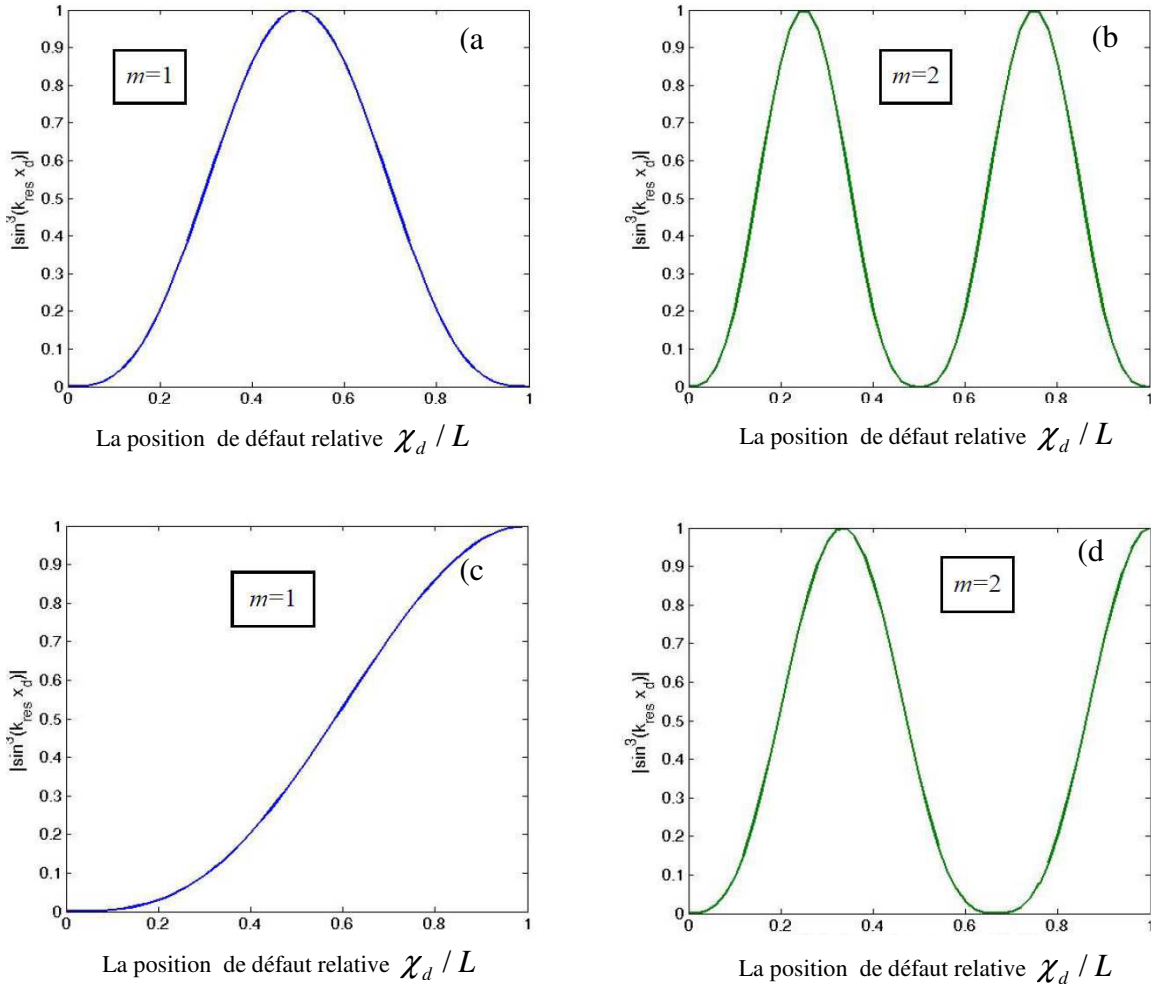


Figure 3.4 : Valeur du facteur de proportionnalité $\left|\sin^3\left(k_{res}x_d\right)\right|$ normalisé à 1 en fonction de la position du défaut χ_d / L (source non linéaire non classique), dans différents conditions au limites libre-libre (a, b), encastrée-libre (c, d) pour les modes de vibration ($m = 1$ (a, c) ou $m = 2$ (b, d)) **[HAUP 12].**

Avec l'exemple précédent, il est facile de comprendre qu'en choisissant judicieusement les champs de déformation (associés aux modes et aux conditions aux limites), il devient possible de remonter à la localisation et à la largeur d'une microfissure à l'aide d'un problème inverse **[VAN 07]**. L'approche multimodale a été testée expérimentalement avec succès sur un barreau de ciment ayant une microfissure localisée à l'une de ses extrémités **[LIU 10]**. Une autre étude basée sur la modulation d'amplitude **[DONS 01]**, montre que l'amplitude relative des raies latérales dépend du mode choisi pour servir d'onde pompe basse fréquence. Le mode exerçant le moins de contrainte sur la fissure (i.e maximum de déplacement), engendre une raie latérale de plus faible amplitude. Des simulations réalisées à partir d'un modèle *PM-Space* confirment que la non linéarité globale moyenne dépend du

mode, de la position et de la taille de la source non linéaire **[GLIO 06]**. Grâce à l'approche multimodale, il serait envisageable de distinguer la source de l'augmentation de la non linéarité. Ainsi, dans le cas d'un endommagement localisé, la variation du paramètre α doit être identique pour tous les modes testés. Le coefficient de proportionnalité reste le même pour chaque mode, seule la valeur de la non linéarité intrinsèque α change. Par ailleurs, si au cours de l'endommagement de nouvelles sources hystérétiques apparaissent, le coefficient de proportionnalité doit varier différemment suivant les modes testés. L'évolution multimodale de la non linéarité devrait donc permettre de distinguer l'origine locale ou diffuse (multi-sites) de l'endommagement **[HAUP 12]**.

3. 4. Dispositif expérimental

Pour effectuer la caractérisation dynamique de l'état de santé des matériaux étudiés, nous avons monté un dispositif expérimental qui permet d'exciter différents modes de résonance en flexion dans une configuration encastré-libre (**Fig3.5**). Les trois régimes de comportement élastique ont été identifiés à travers les variations des résonances en fonction de la déformation induite et ce, lorsque le matériau étudié est mis selon différents plans d'excitation. Dans notre travail, il s'agit d'une disposition côte l'épaisseur appelée « position verticale » et d'une disposition côte largeur, appelée « position horizontale » (**Fig3.6, Fig3.7**).

Figure 3.5 : Différents plans d'excitation à la résonance : (a) position Verticale, (b) position Horizontale. La profondeur d'encastrement est égale à 2 cm.

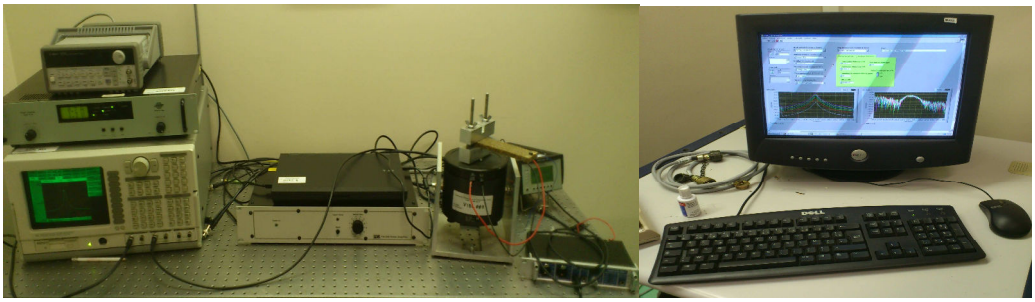


Figure 3.6: Banc expérimental pour mettre en évidence les trois régimes de comportement élastique.

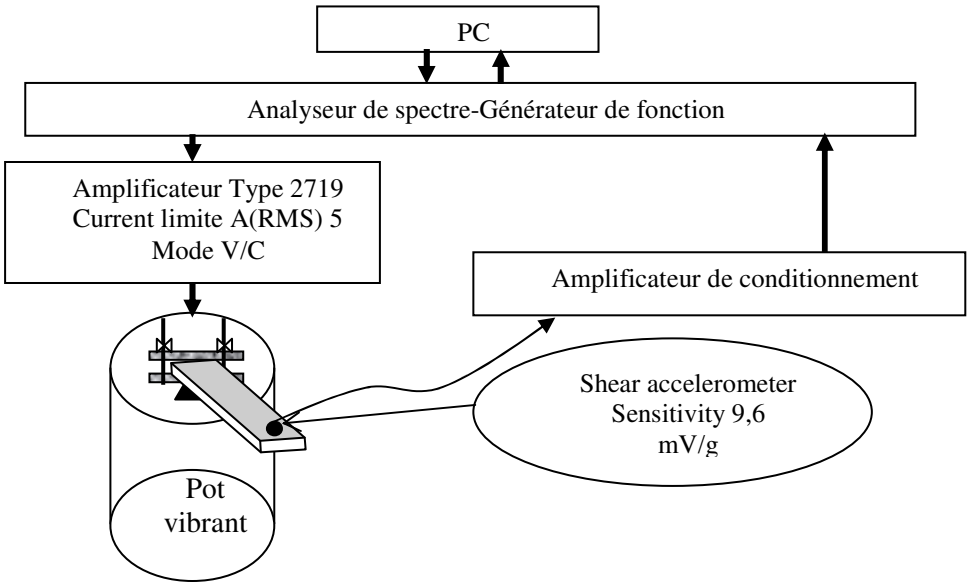


Figure 3.7: Montage expérimental dédié à la mise en évidence la résonance linéaire (classique) et non linéaire (hystérétique).

3. 4.1. Résultats

3. 4.1. 1. Dynamique rapide

Les essais en dynamique rapide consistent en la mesure du spectre de vibration autour d'une fréquence de résonance à des amplitudes croissantes en considérant la même fenêtre fréquentielle. Les fréquences de résonance ciblées pour cette étude sont les deux premiers modes de résonance en flexion dans les configurations horizontale et verticale de l'échantillon. Le balayage en amplitude du signal d'excitation s'étale de 10 à 400 mV par pas de 10 mV amplifié de 14 dB. La sonde utilisée est un accéléromètre transversal fonctionnant dans la gamme fréquentielle [10 Hz… 10 KHz].

La **Figure3.8** montre qu'un essai en dynamique rapide est capable de révéler l'existence d'un endommagement au sein d'un matériau microfissuré. Il est aussi possible de voir que selon le mode considéré et l'amplitude d'excitation, la distorsion de la courbe de résonance peut être plus ou moins importante. En effet, la prise en compte des distorsions peut être effectuée soit à l'aide de la fréquence de résonance, soit à l'aide du coefficient d'amortissement **[BENT 05]**.

Cela permet donc de définir deux paramètres non linéaires hystérétique α_f *et* α_Q, pour chacun des quatre essais et étudier ainsi la dispersion géométrique de façon similaire à celle étudiée par Y. Baccouche **[BACC 13].**

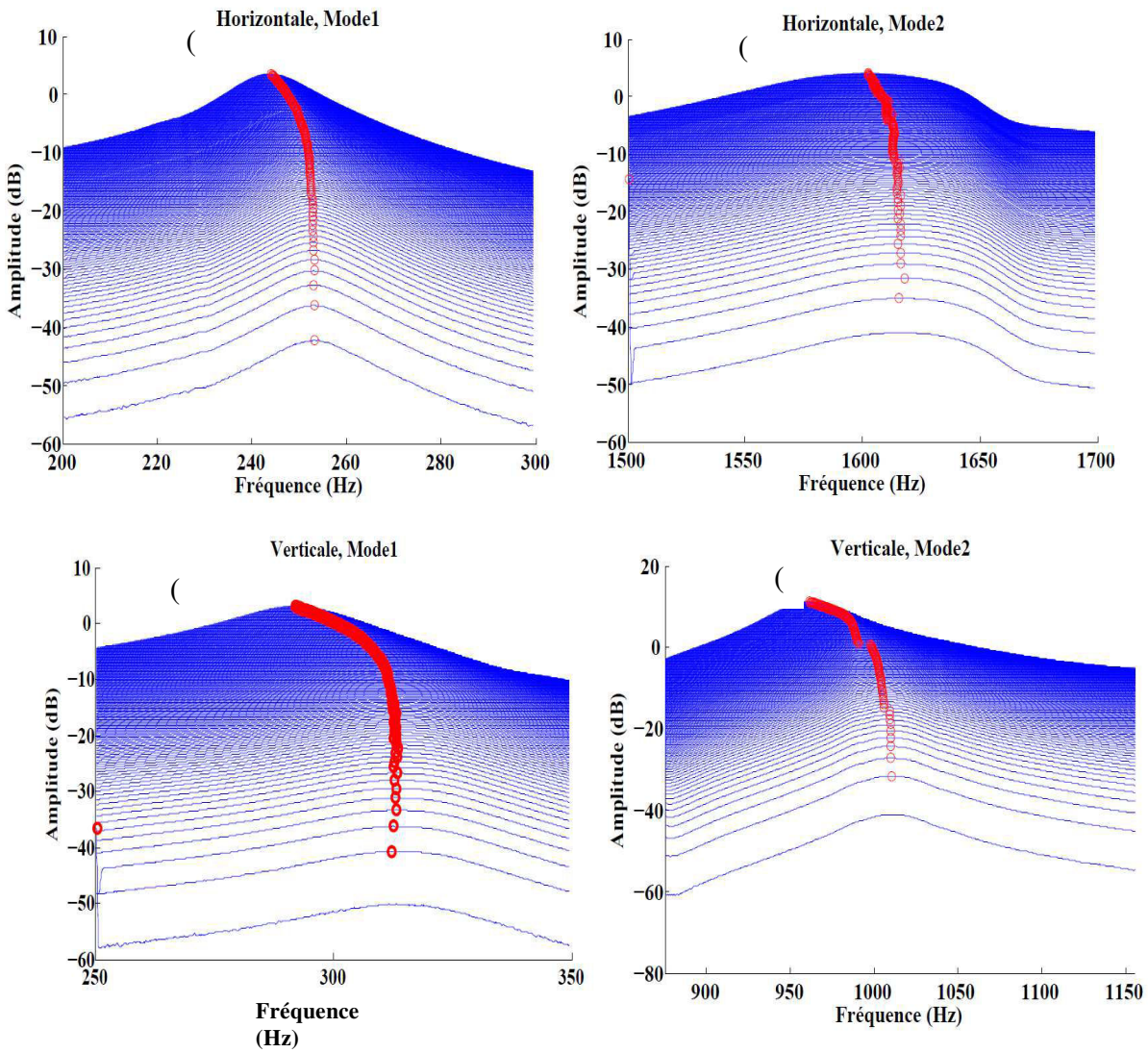


Figure 3.8: Etude de la résonance en flexion du béton polymère en fonction de l'excitation dans la configuration encastre-libre pour la disposition: horizontale mode 1 (a) et mode 2 (b) ; verticale mode 1(c) et mode2 (d).

3. 4.1. 2. Dynamique lente

Un solide hétérogène (poreux, granulaire, multi-composite...) soumis à une sollicitation mécanique de forte amplitude voit sa rigidité chuter sensiblement pendant quelque temps. Pendant ce temps, appelé temps de conditionnement, nous observons des variations quasi continues dans les propriétés viscoélastiques du matériau étudié. Quand le conditionnement est arrêté, le solide retrouve lentement son état initial avec une dynamique dite lente. Ce processus de dynamique lente ne peut pas être expliqué par les lois classiques de la mécanique

non linéaire des solides. Les premières observations sont dues à Tencate et Shankland **[TENC 96]**, pour qui la perte de rigidité était observée à partir de phénomènes de résonance, donc un effet global macroscopique dans la matière **[LARO 10]**.

Dans nos expériences, nous avons utilisé un signal de faible amplitude 15 mV de manière à exciter le matériau en régime linéaire (Nous avons vérifié qu'à une amplitude d'excitation de 15 mV le matériau est en relaxation, pas de variation de la fréquence en fonction de temps d'enregistrement des signaux).

Par la suite, le matériau est conditionné avec un signal d'amplitude 260 mV amplifié de 14 dB pendant 3 heures. La relaxation du matériau a été suivie autour de la résonance à l'aide d'un signal de faible amplitude (15 mV).

Les résultats expérimentaux sont représentés sur la **Figure3.9** où l'on peut voir l'évolution de fréquence de résonance en fonction de log (temps d'enregistrement) pour un béton endommagé à deux positions de l'échantillon (H, V). Comme attendu, Les constantes élastiques du matériau s'adoucissent en réponse à un fort niveau d'excitation, ensuite, la fréquence recouvre lentement sa valeur initiale (avant conditionnement) après l'enlèvement de cette forte perturbation.

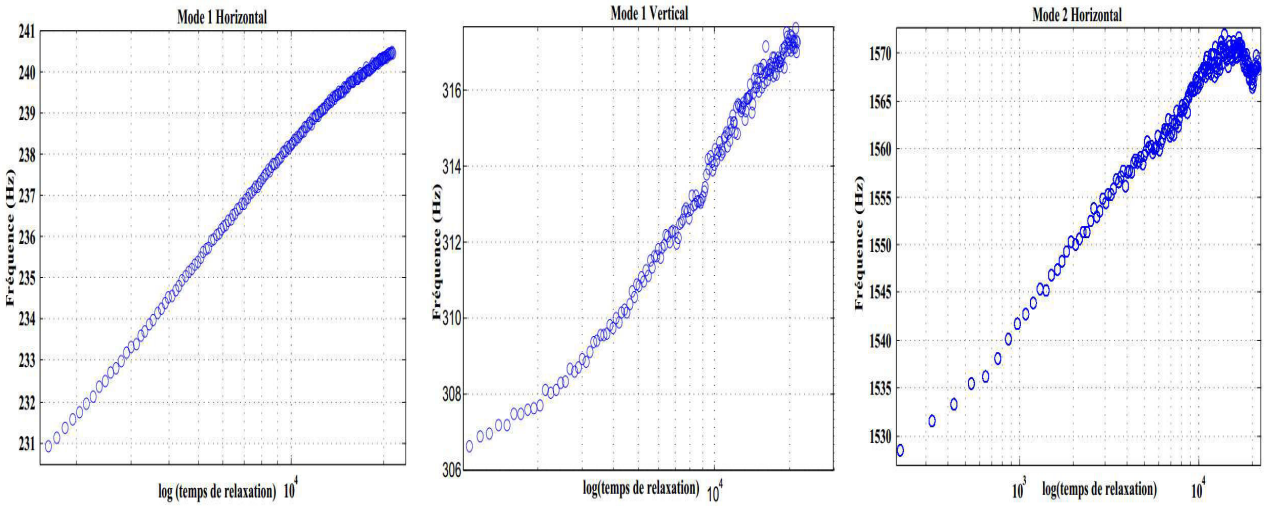


Figure 3.9 : Représentation semi-logarithmique de l'évolution de la fréquence en fonction de log(temps de relaxation); (a) : M2H, (b) : M1V, (c) :M2H.

La représentation logarithmique de la dynamique lente (la relaxation fréquentielle) présentée dans la **Figure3.9,** incite à prendre la pente de variation comme indicateur de la sensibilité de mode à détecter l'endommagement. Nous pouvons lier les variations fréquentielles et temporelles en utilisant l'équation de la droite $f = a\log(t) + b$ **[BENT 05].** Le lissage des évolutions fréquentielles avec une fonction logarithmique a donné les coefficients « a » dont la valeur dépend du mode suivi ainsi que de la configuration considérée. Nous avons trouvé que le

paramètre « *a* » est égal à 10^{-3} Hz pour le premier mode horizontal et 6 10^{-4} Hz dans la configuration verticale. Par ailleurs, le paramètre « *a* » est égal à 9 10^{-3} Hz. Cela sous entend que la configuration horizontale est plus sensible que la configuration verticale.

Dans le but de détecter et localiser un endommagement dans un béton polymère de façon précoce afin de limiter le coût de réparation et de pouvoir prédire la durée de vie résiduelle, nous allons utiliser une technique d'interférométrie par onde coda (C. W. I.) non linéaire.

3. 5. Caractérisation de l'endommagement par Interférométrie d'Ondes Coda (CWI)

Lorsqu'une onde rencontre une hétérogénéité dont la taille est du même ordre de grandeur que sa longueur d'onde, telle qu'une particule ou une bulle en suspension dans un fluide, une fluctuation de densité, un défaut dans un solide cristallin ou une cellule dans un tissu biologique, elle est diffractée dans de multiples directions ; on peut parler d'éparpillement. Ce phénomène est appelé **diffusion**, et l'hétérogénéité est alors appelée diffuseur ou centre diffuseur. Dans le cas d'un milieu hétérogène et désordonné, tous ces phénomènes peuvent se produire de nombreuses fois entre la source et le récepteur. C'est la raison pour laquelle on ne voit pas à travers sa main placée devant une lampe sans en apercevoir le squelette. La lumière est déviée dans tous les sens par les hétérogénéités et « oublie » sa direction d'origine **[DOMI 08]**.

Les champs ultrasonores observés sont constitués d'une partie dite onde cohérente cette onde appelée également onde balistique résiste au calcul de moyenne sur plusieurs réalisations indépendantes du désordre, ainsi que d'autre configurations lié à la position/taille d'hétérogénéités. Une partie incohérente, également appelée CODA est constituée d'arrivées tardives des ondes ayant subi plusieurs événements de diffraction. La partie cohérente des ondes correspond à une onde s'étant propagée dans un milieu homogène effectif. La CODA s'étend temporellement sur plusieurs dizaines de fois la durée de l'impulsion initiale. Ces deux parties du champ ultrasonore contiennent des informations de natures différentes sur le matériau **[CHER 08].**

Par la suite, nous nous intéressons à caractériser le béton polymère avec la technique d'interférométrie par onde de la coda (CWI). Cette technique est basée sur la comparaison entre deux signaux issus d'une même source et à instants différents.

3. 5.1. Approche classique

3. 5.1.1. Dispositif expérimental

A l'état intact ainsi qu'à l'état endommagé les échantillons sont excités à l'aide d'ondes ultrasonores par un générateur d'impulsions Sofranel 5072PR via un transducteur piézoélectrique ayant une fréquence centrale de 300 kHz et un diamètre de 10 *mm* accolé sur l'une des faces du béton base polymère. L'impulsion ultrasonore est interceptée à l'aide d'un transducteur ultrasonore identique au premier relié à un oscilloscope, ce qui nous permet de visualiser le signal reçu. Un ordinateur relié à l'oscilloscope permet de faire l'acquisition des différentes formes d'ondes reçues (**Fig3.10**). Selon les configurations expérimentales, la durée d'enregistrement des signaux peut aller de quelques secondes à quelques minutes.

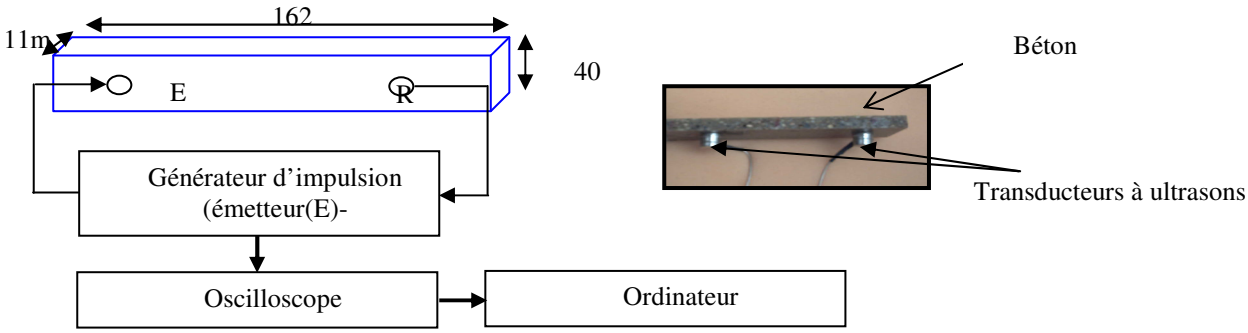


Figure 3.10: Protocole expérimental pour générer les ondes de la Coda.

3. 5. 1. 2. Coefficient de corrélation

La méthode CWI est basée sur l'exploitation de deux enregistrements d'ondes acoustiques $u(t)$ à la date t_1 et $\tilde{u}(t)$ à la date t_2 permettant ainsi de définir un coefficient de corrélation $R(t_s)$ **[SNIE 06]**:

$$R(t_s) = \frac{\int_{t-T}^{t+T} u(t')\tilde{u}(t'+t_s)dt'}{\sqrt{\int_{t-T}^{t+T} u^2(t')dt' \int_{t-T}^{t+T} \tilde{u}^2(t'+t_s)dt'}} \qquad \textbf{(3.2)}$$

où t_s est le décalage entre les deux signaux $u(t)$ et $\tilde{u}(t)$.

3. 5. 3. Résultats

Le dispositif expérimental a été calibré à travers une série de mesures où les différents aspects liés au positionnement des transducteurs ainsi qu'au couplant (repositionnement des transducteurs) utilisé ont été pris en compte. Ainsi, les nombreuses mesures ont montré que pour un positionnement donné la reproductibilité liée au décalage entre les signaux multi-diffusés est satisfaisante vu qu'elle demeure inférieure à 6 ns.

Au moment où le très faible décalage mesuré est satisfaisant à l'état intact, son existence à l'état endommagé pose problème. En effet, nous nous attendions à ce que l'interaction « endommagement-onde ultrasonore » soit sensible aux non linéarités engendrées par l'augmentation du niveau d'excitation (de la déformation) ce qui aurait pour effet

d'augmenter le décalage temporel. Dans notre cas il est important de noter que l'interaction est directement liée au chemin suivi par l'onde ultrasonore dans le béton et de ce fait au positionnement des transducteurs à ultrasons (émetteur et récepteur). Pour palier à cette insuffisance, nous pouvons augmenter le niveau d'excitation. Cependant, le but de ce travail étant de détecter et ensuite localiser l'endommagement à partir d'une position supposée ignorer la position de l'endommagement, nous ne pouvons pas non plus augmenter le niveau d'excitation (déjà supérieur à 200V) sans nous soucier des non linéarités électroniques que pourrait générer notre dispositif expérimental et perturber notamment le couplant liant les transducteurs au matériau. Cette raison nous a amené à choisir une solution globale. Ceci sera présenté dans le paragraphe suivant.

3. 6. Application simultanée de la CWI et de la résonance non linéaire pour la caractérisation de l'endommagement

Dans le but d'améliorer l'interaction « onde ultrasonore-endommagement », nous avons appliqué une approche originale qui consiste à détecter l'onde coda et ce lorsque le matériau est mis en résonance. Dans cette partie, le but n'est pas d'exciter le matériau en résonance non linéaire à fort niveau de façon à produire ramollissement du module élastique d'une façon considérable mais de nous contenter d'une résonance faiblement amplifiée dont le but est de permettre à la signature non linéaire du matériau d'interagir avec l'impulsion ultrasonore de façon optimale. Expérimentalement, la résonance est créée à l'aide d'un transducteur large bande (25kHz-600kHz) relié à un générateur de fonction (**Fig3.11**). Le but étant d'exciter le matériau autour d'un mode de résonance avant et après amplification.

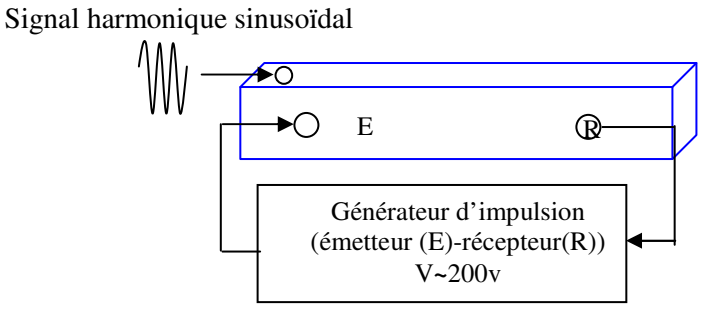


Figure 3.11 : Schéma figurant le dispositif expérimental.

En l'absence d'amplification, nous excitons le matériau en résonance au moment où l'impulsion ultrasonore est multi-diffusée par les différents granulats constituant le béton. Pour une impulsion ultrasonore de ~200 V, nous avons remarqué l'absence de toute interaction mesurable entre l'endommagement et l'onde ultrasonore. En effet, le décalage temporel mesuré à partir du maximum du coefficient de corrélation $R(t_s)$ est égal à zéro (à la précision de mesure près 6 ns) et ce pour des niveaux d'excitation en résonance allant de 50

mV à 400 mV, tel que montré sur la **Figure3.12** pour différentes valeurs de temps central. Dans ce cas, le module élastique E du matériau ne subit aucune variation et peut s'écrire sous la forme non linéaire classique suivante **[BENT 05]**:

$$E = E_0(1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2) \qquad \textbf{(3.3)}$$

E **:** Le Module élastique du matériau. E_0**:** Le Module élastique linéaire. β**:** Le Paramètre non linéaire quadratique δ : Le Paramètre non linéaire cubique. ε : La déformation.

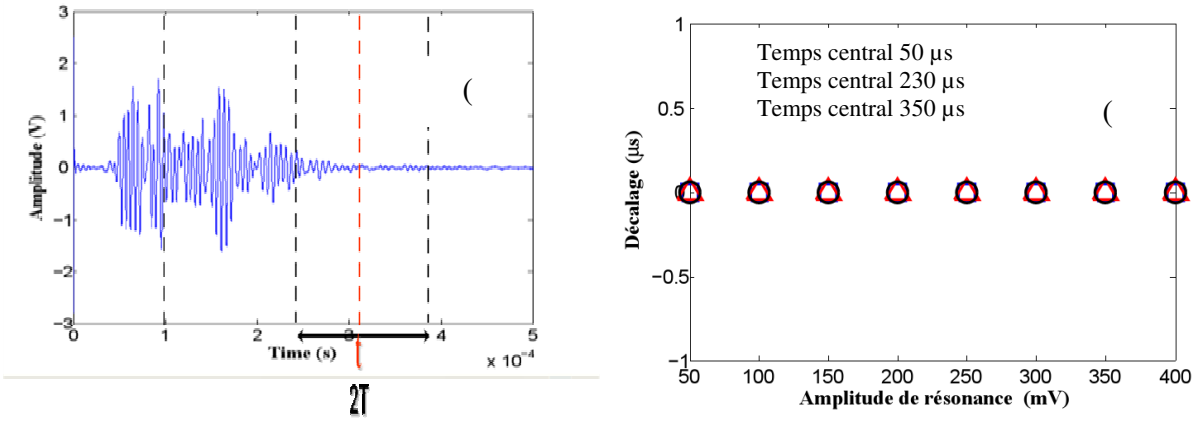


Figure 3.12: (a) Le signal de l'onde ultrasonore détectée est divisé en 8 fênetre où $2T$ est largeur de la fênetre et t est le temps central. (b) Décalage temporel entre les signaux obtenus en fonction de l'amplitude du signal harmonique pour le premier mode de résonance en flexion. L'absence de décalage a également été observé pour les autres modes de résonance.

Dans le but de mettre en évidence l'existence de l'endommagement nous avons reproduit la même expérience mais en amplifiant les niveaux d'excitation à la résonance susmentionnés de 52 dB. De ce fait, pour chaque fréquence de résonance, nous excitons l'échantillon pendant 3 minutes environ et ce pour des niveaux d'excitation allant de 20V à 160V par pas de 20V. Dans ce cas, le module élastique E du matériau décroît en fonction du niveau d'excitation (déformation). Une mesure qui témoigne de l'existence d'un comportement non linéaire hystérétique et s'écrit sous la forme suivante **[NOVA 12]**:

$$E = E_0(1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2 - \cdots - \alpha(\Delta\varepsilon + sign(\dot{\varepsilon})\varepsilon)) \qquad \textbf{(3.4)}$$

α : Paramètre non linéaire hystérétique, $\Delta\varepsilon$: Amplitude moyenne de déformation,

$\dot{\varepsilon}$: Le taux de déformation, Sign: elle est égale à +1 si le taux de déformation est positif et à -1 si ce dernier est négatif.

3. 7. CWI en présence d'une résonance non linéaire

Ces essais sont effectués lorsque le matériau est excité autour d'un seul mode de résonance en régime non linéaire où le taux d'amplification est de 52 dB. Dans ce cas, chaque

mode est excité à plusieurs amplitudes croissantes sans laisser au matériau le temps de se relaxer. Les mesures sont par la suite interrompues afin de laisser au matériau le temps de se relaxer. Expérimentalement, au vu des niveaux d'excitations modérés, nous avons vérifié qu'une durée de 60 minutes était suffisante pour que le matériau recouvre ses propriétés initiales (ou sa fréquence de résonance et son facteur de qualité) d'avant excitation amplifiée. De cette façon, chaque nouvelle mesure correspondant à un nouveau mode de résonance ne peut être perturbée par la mesure qui la précède. L'avantage d'utiliser la résonance amplifiée peut être observé sur la **Figure3.13**.

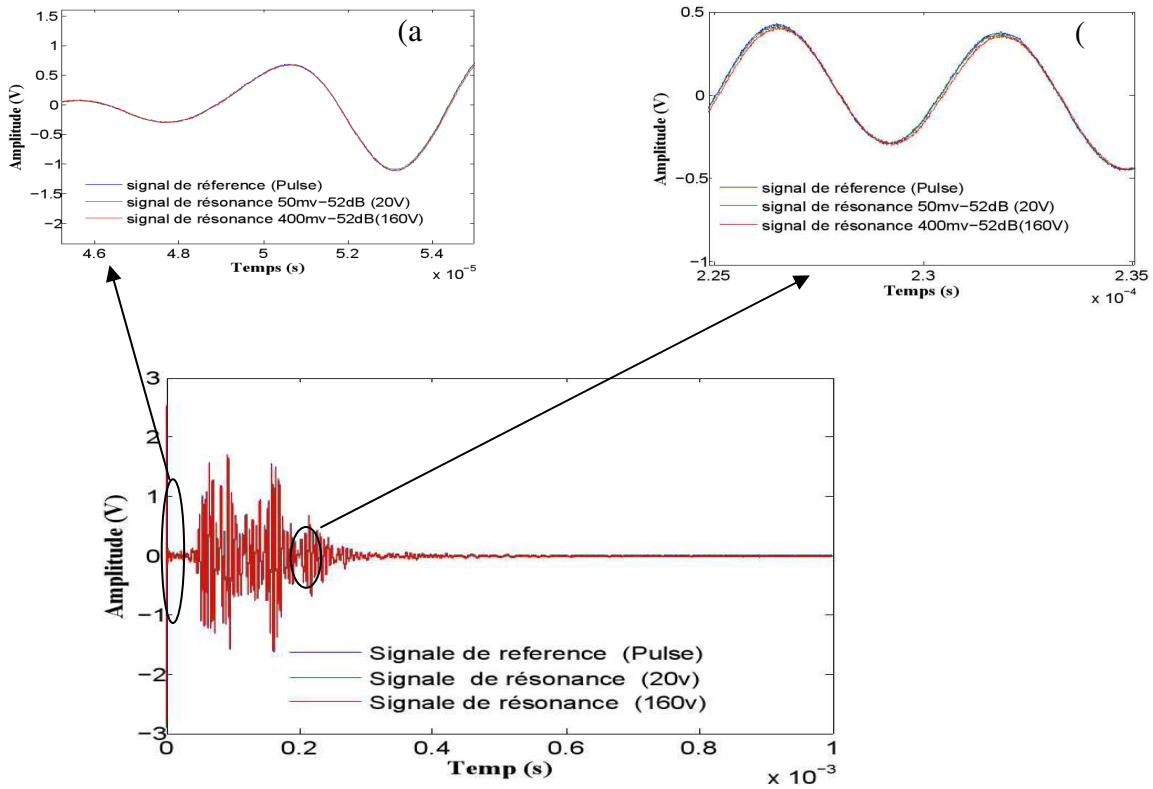
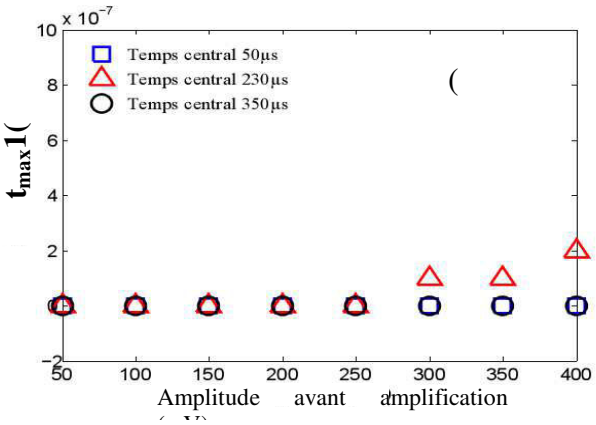


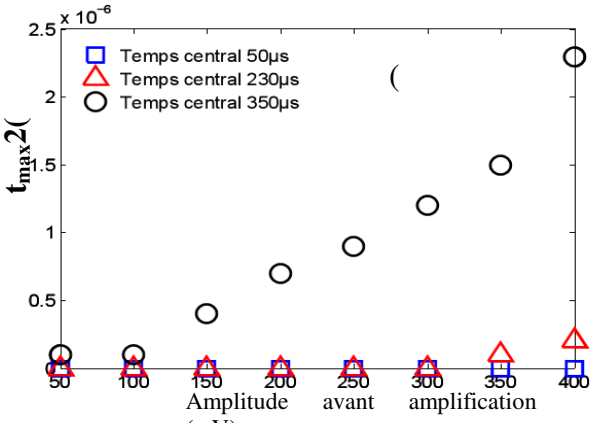
Figure 3.13: Signaux d'ondes ultrasonores transitoires enregistrés avec et sans résonance, (a) début d'intervalle de temps (observation centrée à 50µs), (b) la fin d'intervalle de temps (observation centrée à 230µs).

La **Figure3.13** montre qu'il n'est pas possible d'estimer, à priori, les décalages existant entre le signal de référence (sans résonance) et ceux acquis à différents niveaux d'excitation en résonance. Le calcul des décalages se fait en considérant des fenêtres temporelles dont l'emplacement du temps central est déterminant. En effet, nous avons vérifié l'inexistence de décalage pour des fenêtres centrées au début des signaux (onde directe). La **Figure3.13-a** centrée à 50 µs montre que la partie directe du signal n'est pas sensible à l'endommagement et ce même pour les niveaux d'excitation en résonance les plus élevés. Par ailleurs, cela n'est plus le cas une fois le temps central de la fenêtre considérée coïncide avec la partie multi-

diffusée du signal. Cela a été vérifié pour une fenêtre centrée à 230 µs où il devient possible de vérifier l'existence d'un décalage temporel (**Fig3.13-b**).

A la suite de cette série de mesures, qui ont souligné l'importance de mettre le matériau en résonance lorsqu'il est traversé par une impulsion ultrasonore, nous nous sommes intéressés à la sensibilité de la coda à l'ordre du mode de résonance appliqué. Ainsi, pour trois fenêtres centrées à différents moments du signal (50µs, 230µs et 350µs) nous avons mesuré le décalage induit par l'interaction onde basse fréquence-endommagement pour les modes de résonance en flexion à 253Hz et 510 Hz. En effet, les **Figures3.14-a** et **Figures3.14-b** montrent qu'il est possible d'augmenter de façon très importante la sensibilité de la coda à l'endommagement lorsque le mode de résonance excite de façon optimale la zone endommagée. A travers la **Figure3.14-a** on constate un décalage maximal de 0.2µs, et ce lorsque le matériau est excité à 160 V aux alentours du mode de flexion à 253 Hz. La **Figure3.14-b** montre qu'en excitant le mode à 510 Hz et au même niveau d'excitation il est possible de multiplier le décalage susmentionné par douze (2.4 µs). Cependant, cette amélioration semble dépendre du temps central de la fenêtre temporelle. En effet, à travers les résultats de la **Figure3.14-c** nous pouvons voir que les fenêtres centrées à 50µs et 230µs ne sont guère sensibles au changement de mode de résonance et que seule la fenêtre centrée à 350µs évolue de façon considérable. Même si l'explication d'une telle sensibilité nécessite une étude plus approfondie de la diffusion multiple dans un milieu non linéaire hystérétique, ces premiers résultats demeurent très encourageants pour des applications futures en CND.





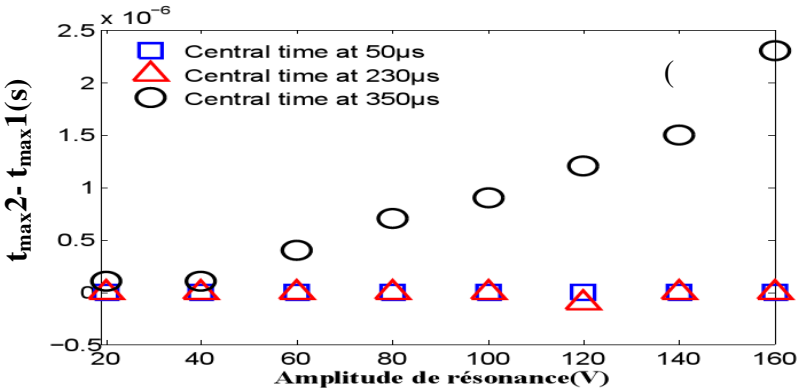


Figure 3.14: Décalage temporel en fonction de l'amplitude à la résonance: (a) mode de flexion à 253 Hz, (b): mode de flexion à 500 Hz, (c) : différence entre le décalage temporelle de deux modes.

Cette partie vise à caractériser l'endommagement en utilisant la CWI. Pour cela, nous avons monté un dispositif expérimental ayant une sensibilité et une reproductibilité suffisante pour détecter un endommagement localisé dans un béton polymère. En particulier, il nous a été possible de vérifier que la présence de l'endommagement n'est pas systématiquement liée à un décalage au niveau des signaux coda et qu'il est nécessaire d'exciter l'endommagement de façon à optimiser son interaction avec les signaux multi-diffusés. Cela a été effectué en couplant une résonance non linéaire avec une impulsion ultrasonore. Les différents résultats nous ont montré que le décalage temporel est sensible au mode de résonance excité, à l'amplitude de la vibration en résonance et au temps d'observation. Ces premiers résultats encourageants suggèrent la possibilité de localiser l'endommagement avec la CWI.

3. 8. Localisation d'un défaut mésoscopique dans un béton base polymère

3. 8. 1. Dispositif expérimental pour mettre en évidence la résonance.

Pour effectuer la caractérisation dynamique de l'état de santé des matériaux étudiés, nous avons monté un dispositif expérimental qui permet d'exciter différents modes de résonance en flexion dans une configuration encastré-libre (**Fig3.5**, **Fig3.6**). De ce fait, les trois régimes de comportement élastique ont été identifiés à travers les variations des résonances en fonction de la déformation induite et ce lorsque le matériau étudie est mis en résonance selon différents plans d'excitation (Verticale et Horizontale).

3. 8. 2. Résultats

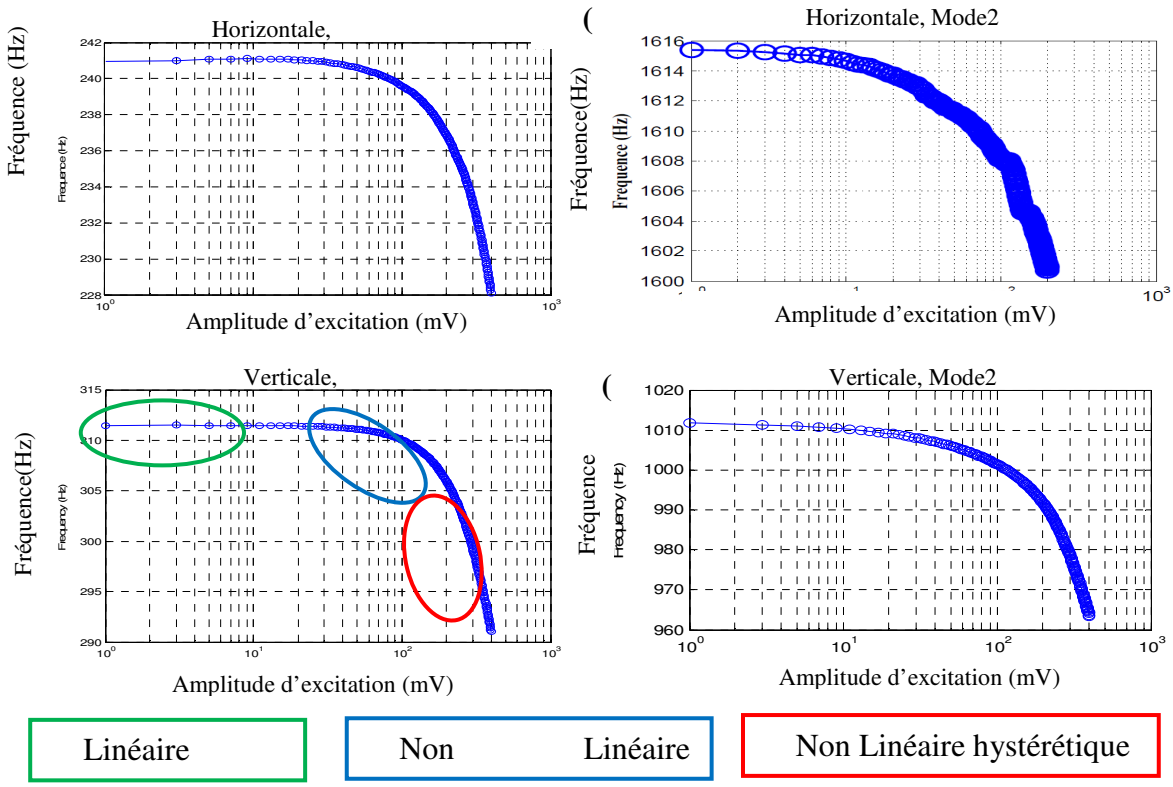


Figure 3.16: Mise en évidence les trois domaines de comportement élastique pour les deux premiers modes en flexion (a): configuration horizontale ; (b) : configuration verticale.

La **Figure3.16** présente la variation de la fréquence de résonance pour les deux premiers modes en flexion en fonction de l'amplitude d'excitation pour les deux configurations du spécimen béton polymère (H) et (V). Elle monte bien que la fréquence de résonance se décale vers les basses fréquences à amplitude d'excitation croissante. Nous pouvons facilement, d'après ces courbes, préciser les trois régimes de comportement élastique (régime linéaire, régime non linéaire classique et régime non linéaire hystérétique).

Comme nous l'avons précisé précédement, le but n'est pas d'exciter le matériau en résonance à fort niveau de façon à produire l'adoucissement du module élastique d'une façon considérable, mais plutôt de nous contenter d'une résonance faiblement amplifiée dont le but est de permettre à la signature non linéaire du matériau d'interagir avec l'impulsion ultrasonore de façon optimale.

Dans ces conditions, pour augmenter la sensibilité de la technique à détecter et localiser un défaut mésoscopique nous avons réalisé un scan à différentes positions le long du béton polymère où les ondes ultrasonores traversent l'échantillon selon différents trajets en présence d'une résonance de faible amplitude.

3. 9. CWI en presence d'une résonance linéaire

Les mesures en présence d'une résonance linéaire ont été effectuées à l'aide d'un dispositif expérimental constitué d'un pot vibrant de type BK4809 dont le but est de générer des résonances en flexion dans la configuration « encastre-libre ». Un générateur de fonction (Tektronix AFG 3022B) est utilisé pour générer les modes de résonance souhaités et pour des excitations allant de 10mV jusqu'à 300mV en présence d'une amplification constante de 14 dB (**Fig3.17**).

Dans ces conditions de résonance, les impulsions ultrasonores sont générés à plusieurs niveaux d'excitation allant de 50 mV à 3200 mV avant d'être amplifiées de 46 dB. Les transducteurs ultrasonores utilisés sont identique ont un diamètre de 10mm et résonnant à 300 KHz. Ils sont accolés en vis-à-vis suivant la longueur ou l'épaisseur de l'échantillon en fonction de la configuration souhaitée (**Fig3.18**).

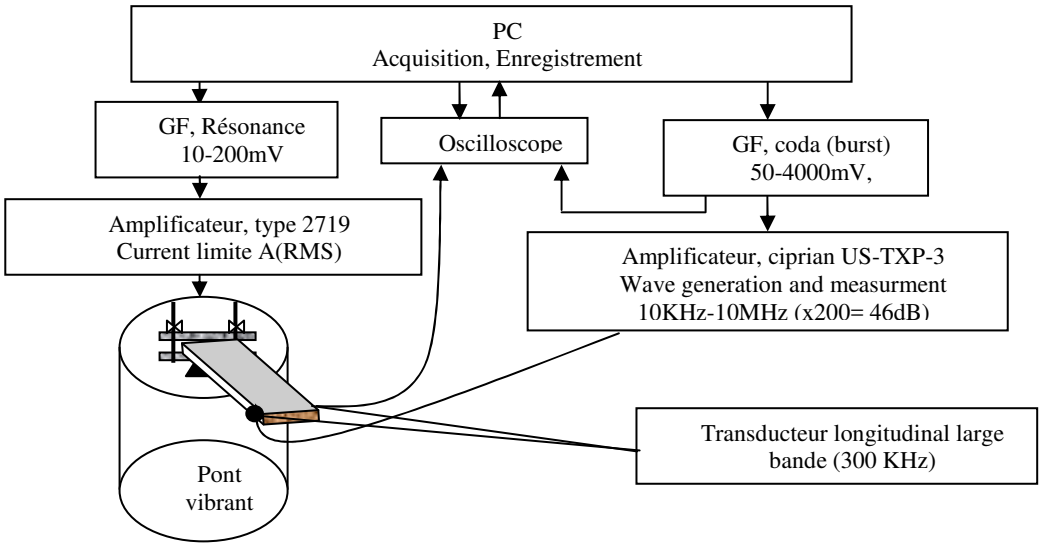


Figure 3.17 : Montage expérimental pour la génération des ondes de coda en présence d'une résonance linéaire et non linéaire pour différentes positions, par rapport au défaut (P1 : 80 mm avant le défaut, P2 :40 mm avant de défaut, P3 : sur le défaut et P4 :40 mm après le défaut, respectivement).

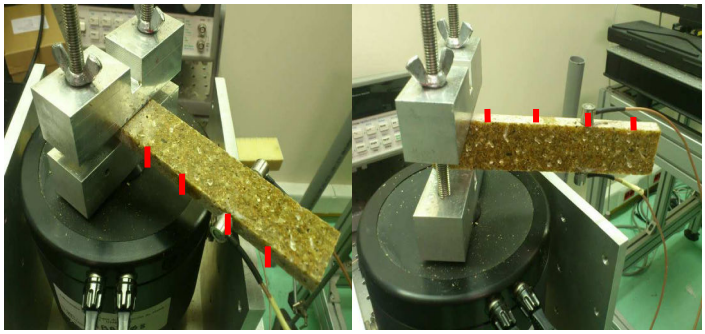


Figure 3.18 : Configuration expérimentale pour la génération des ondes coda, en simultané avec la résonance.

Les nombreuses mesures ont montré que pour une position P_i (i=1,4) donnée la reproductibilité liée au décalage entre les signaux multi-diffusés est satisfaisante vu, qu'elle demeure inférieure à 50 ns. Les différents essais de sensibilité nous ont amené à fixer l'amplitude de coda à 50 mV_{pp} et l'amplitude de résonance à 10 mV_{pp} avant amplification.

3. 9. 1. Résultats et discussion

Les mesures ont été réalisées dans les deux configurations V et H de l'échantillon pour les deux premiers modes de résonnances de chaque configuration. Ces configurations seront dénommées **MnL** où n représente le mode excité et L la configuration, ainsi M2H correspond à une acquisition obtenu en excitant le deuxième mode de résonance dans la configuration horizontale. Les mesures ont été faites pour les quatre positions des transducteurs (P_1, P_2, P_3, P_4). On notera que l'endommagement est localisé entre la deuxième et la troisième position (P2, P3).

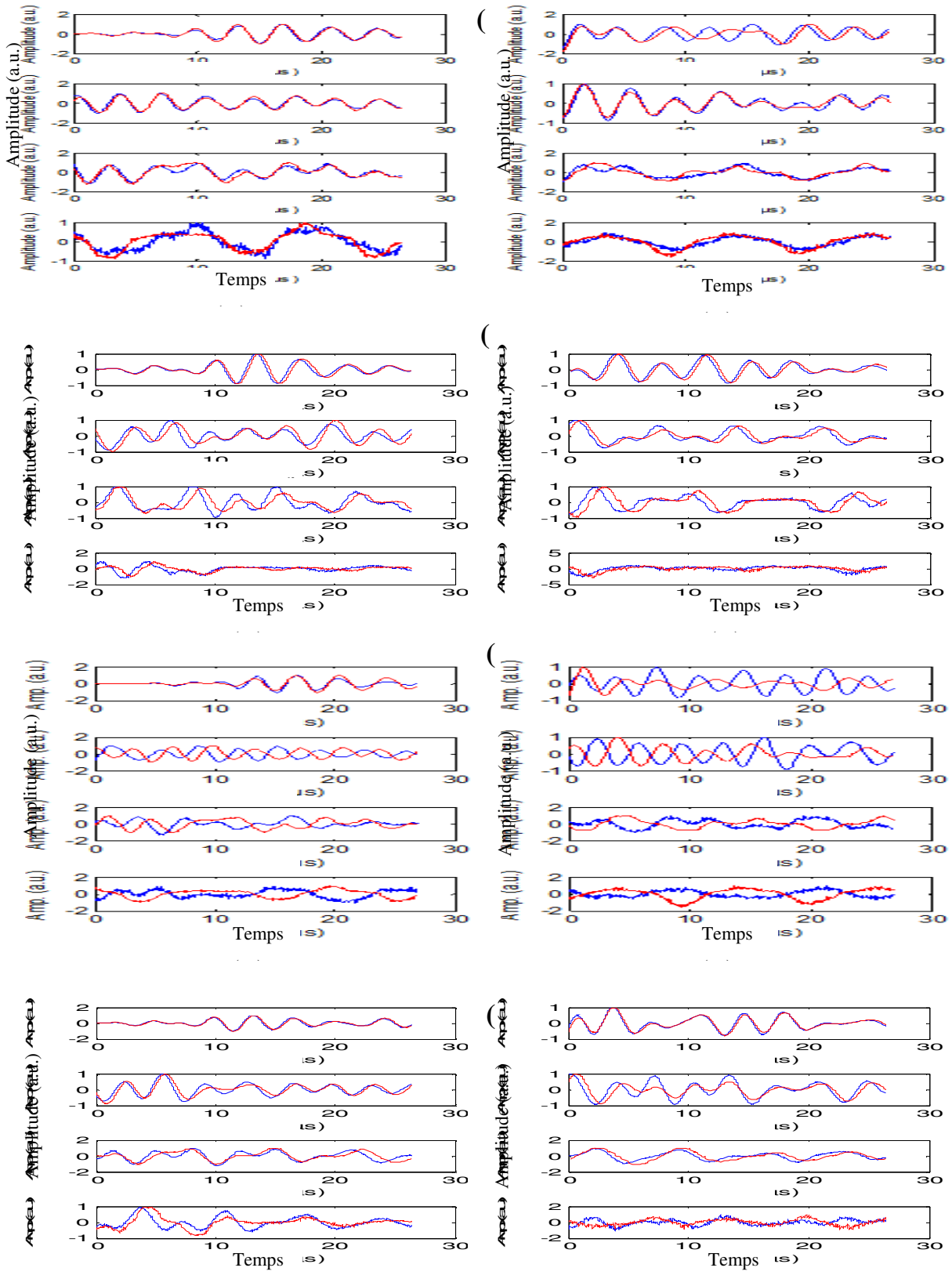


Figure 3.19 : Signaux d'onde coda enregistrés pour différentes positions du transducteur pour différents position de transducteur, (a) : P_1, M1H ; (b) : P_2, M1H ; (c) : P_3, M2H ; (d) : P_4,

M1V respectivement. La largeur de la fenêtre '2T' utilisée pour avoir ces courbes est égale à 30 µs.

La **Figure3.19-a** correspond à la mesure M1H de la première position spatiale P1 des capteurs. Dans cette position nous remarquons l'absence de décalage temporel entre le signal de référence (rouge) et le signal avec résonance (bleu). En position 'P_2'en revanche, nous remarquons un décalage temporel de l'ordre de 0,45 µs (**Fig3.19-b**). En **Figure3.19-c**, nous observons une augmentation significative du décalage temporel dans la position 'P_3', où le décalage est de l'ordre de 1,4µs pour le deuxième mode en flexion horizontale (M2H). Par ailleurs, en position 'P_4', quand on est loin de l'endommagement, nous observons une diminution importante en décalage temporel (**Fig3.19-d**).

3. 10. Sensibilité des modes à l'endommagement

A l'aide des différents décalages temporels observés, nous avons calculé les retards entre deux signaux pour une fenêtre de largeurs de 30µs, et ce par intercorrélation. Dans ce cas le signal de référence est enregistré en l'absence de résonance.

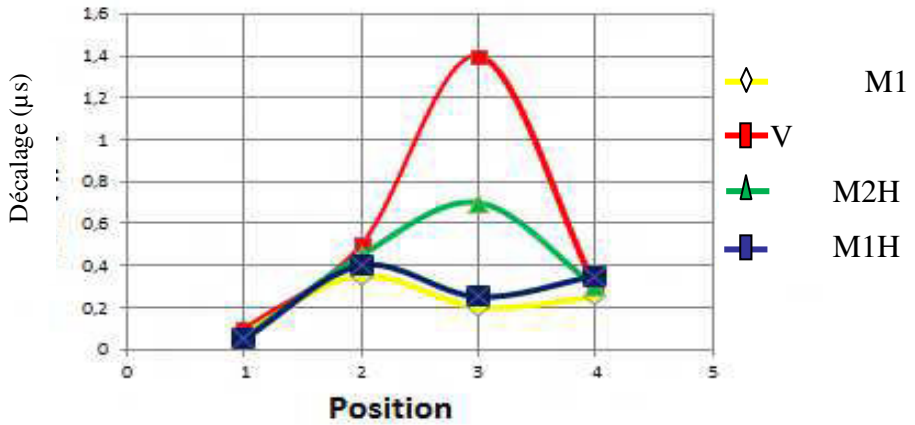


Figure 3.20 : Décalage temporel en fonction des positions des transducteurs et des modes excités.

La **Figure3.20** montre le décalage temporel en fonction des positions des transducteurs, pour différents modes de résonance en flexion. Dans la position P3 par exemple, nous remarquons que le Mode M2H est plus sensible à détecter la présence de l'endommagement que le Mode M1H.

Ces expériences ont mis en évidence une dépendance entre les modes de résonance excités et le défaut dont la force dépend du positionnement des nœuds et des ventres de vibration par rapport à la zone endommagée. Ces résultats nous ont conduits à développer

notre plan d'expérience. Par ailleurs, il a été également observé que la disposition de l'échantillon lors des tests de résonance (en configuration horizontale H et/ou verticale V) a une forte influence sur le signal diffusé. Cela nous a conduit à développer l'étude autour de ces deux positions de résonance qui permettent de souligner l'importance de la prise en compte de l'anisotropie de l'endommagement.

Finalement, l'outil que nous utilisons pour investiguer la présence de défaut est très sensible aux paramètres expérimentaux et environnementaux notamment, à la température et à la relaxation de l'échantillon. Nous avons alors mené une étude visant à vérifier la reproductibilité des résultats expérimentaux lies à cette nouvelle configuration. Cette procédure de validation a été menée selon le protocole suivant :

- Etudier la sensibilité des quatre premiers modes de résonance en flexion à l'endommagement dans l'échantillon dans les deux configurations de résonnance verticale (V) et horizontale (H),
- A forte sollicitation en résonance, l'échantillon présente un comportement non linéaire hystérétique. Nous avons alors mené des expériences permettant de déterminer le temps de relaxation ; c'est à dire le temps nécessaire à l'échantillon pour recouvrir ses propriétés mécaniques initiales, et ce dans les deux configurations H et V.
- La diffusion a lieu lorsque la taille des diffuseurs est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde acoustique. Nous avons alors mené une étude en fréquence afin d'optimiser la diffusion selon deux critères :
    - Maximiser l'énergie de l'onde non balistique dans le but d'avoir plus d'énergie sur la partie multi-diffusée
    - Optimiser la durée du signal coda qui contient l'information utile.
- Nous avons pour objectif d'améliorer la résolution spatiale de la méthode de localisation du défaut. Ceci passe par une augmentation du nombre de positions à scanner (10 positions), qui est limitée par taille de transducteur dans le cas des mesures au contact.

Ces différents éléments ainsi que le dispositif expérimental seront détailles dans la suite de ce chapitre.

3. 11. Temps de relaxation et configuration expérimentale

Lors de cette série d'expériences, nous avons mesuré le temps de relaxation lié à deux modes de résonance en flexion : M1H et M1V. Pour cela, nous utilisons une carte d'émission réception de type Handyscope HS5 (TiePie). Ainsi, nous avons utilisé un signal de faible amplitude 15 mV de manière à exciter le matériau en régime linéaire (**Fig.3.21**). L'application

de cette faible amplitude pendant une durée assez longue (= 34 minutes) a permis de vérifier la relaxation du matériau. Ensuite, le matériau est excité à fort niveau (260 mV) pendant une durée de 3 heures (moyennant un amplificateur de puissance). Cela permet de le conditionner de façon continue à travers le ramollissement de ses propriétés élastiques et ce jusqu'à une valeur limite qui dépend de l'état du matériau ainsi que du niveau d'excitation imposé. En dernier, la forte excitation est arrêtée et le matériau est sondé par une très faible excitation afin de sonder la relaxation du matériau (retour à l'état initial). Cette opération peut durer jusqu'à plusieurs heures selon le conditionnement imposé.

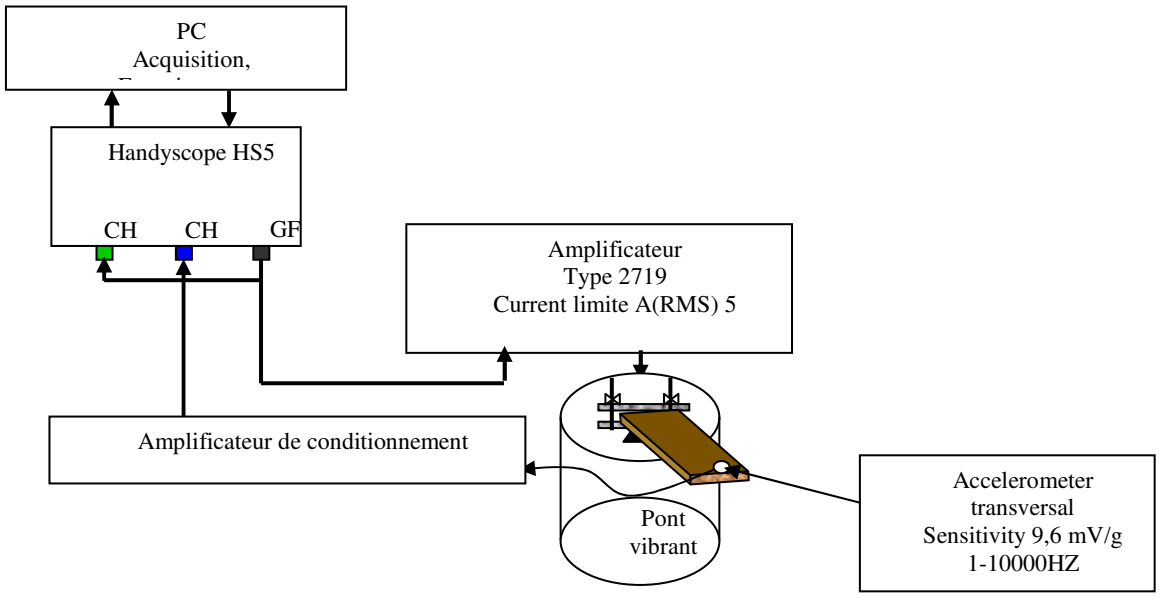


Figure 3.21 : Banc expérimental pour mesurer le temps de relaxation lié à chaque mode de résonance.

3. 11. 1. Résultats

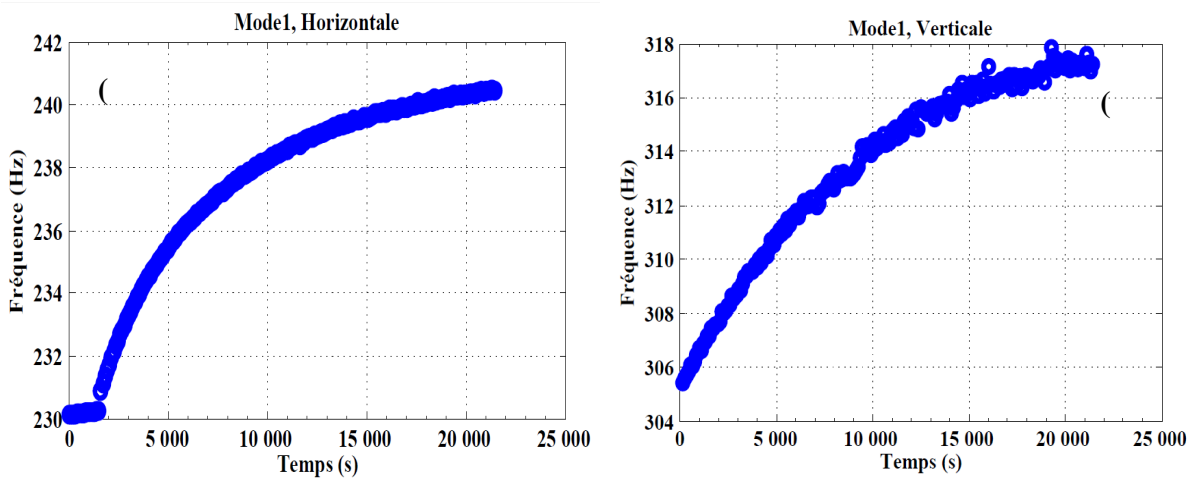


Figure 3.22: Fréquence de résonance en fonction du temps de relaxation ; (a) : configuration Horizontale Mode 1, (b) : configuration Verticale Mode 1.

La **Figure3.22** présente l'évolution de la fréquence en fonction du temps d'enregistrement pour les deux configurations en résonance. Cette figure montre que les temps de relaxation ne sont pas les mêmes, lorsque le 1er mode en flexion est généré dans la configuration H et V. En effet, la variation du temps de relaxation est de plus en plus de 20%. Ce Ce qui intéressant dans ce résultat c'est qu'il s'agit bien du même défaut et de la même distribution des neouds et des ventres. Dans ce cas, il est clair que selon la configuration (H ou V), l'endommagement n'est pas sollicité de la même manière, ce que devait être lié à une distribution anisotrope des sources de non linéarité dans le matériau étudié. Cette anisotropie de l'endommagement doit être prise en compte non seulement dans les modèles théorique basés par exemple sur le model P-M space.

Tableau3.1 : Modes de résonance en fonction de temps de relaxation.

Modes de résonance	M1H	M1V
Temps de relaxation (s)	15000	18000

Par la suite, nous mesurons la meilleure fréquence des ondes de la coda.

3. 12. Choix de la fréquence de la coda

La diffusion a lieu lorsque la taille des objets diffusants est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde acoustique. Nous avons alors mené une étude en fréquence afin d'optimiser la diffusion selon deux critères ; la baisse de l'énergie de l'onde balistique (donc plus d'énergie sur la partie non balistique) et la durée du signal coda qui contient l'information utile.

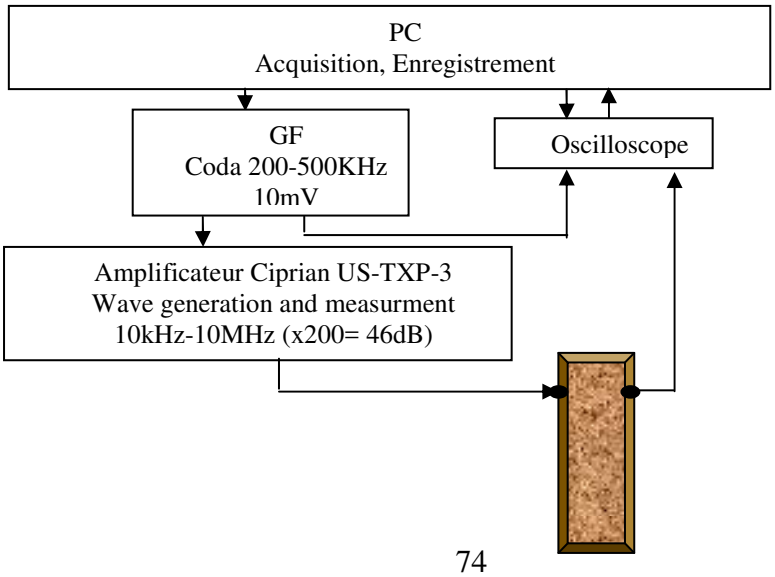


Figure 3.23 : Banc expérimental pour générer les ondes de la coda.

Pour cela, nous avons fait un balayage en fréquence, nous avons utilisé le montage de la **Figure3.23**. La **Figure3.24** montre quelques types de signaux obtenus à différentes fréquences. L'objectif est d'augmenter l'énergie de l'onde multi-diffusée en liaison avec le rapport signal sur bruit. A énergie égale, cela a pour conséquence de baisser l'amplitude de l'onde balistique. D'après la **Figure3.25,** le choix de la fréquence d'excitation aux alentours de 350 kHz semble être le plus judicieux pour la suite de ce travail.

3. 12. 1. Résultats expérimentaux

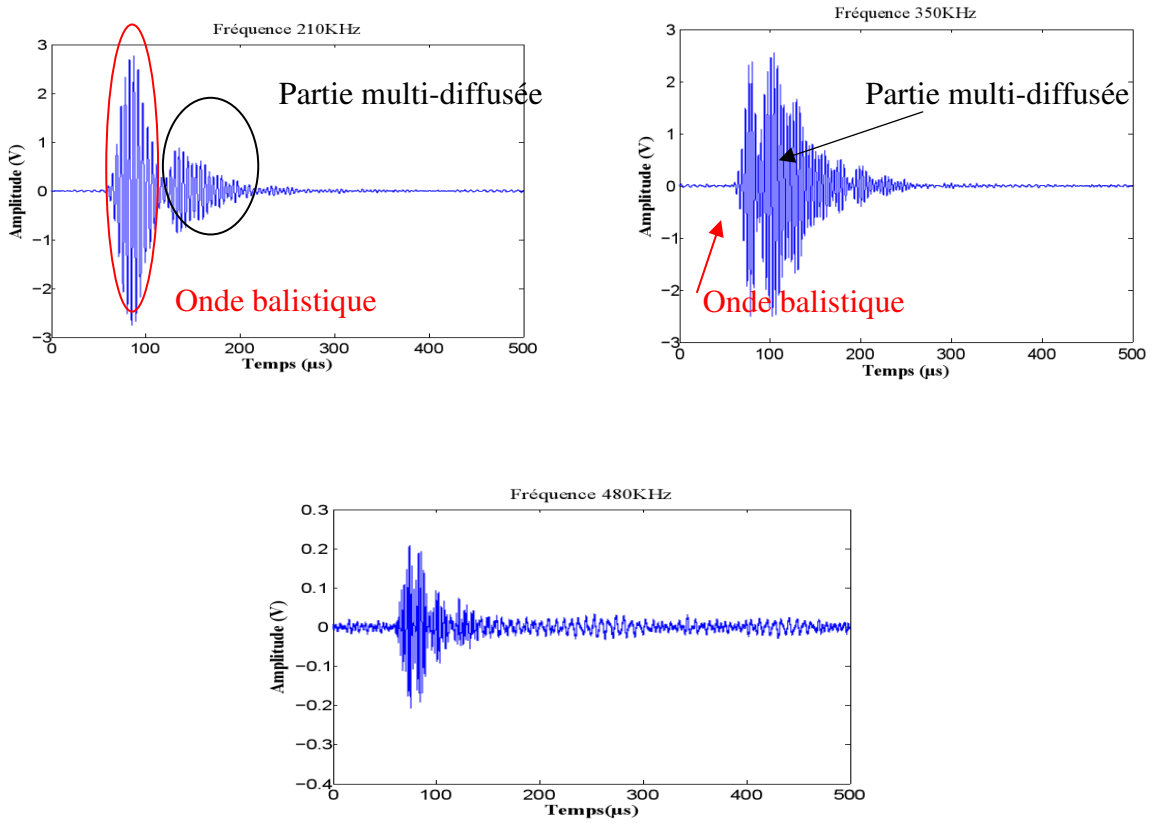


Figure 3.24 : Signaux d'ondes ultrasonores multi diffusée émis aux fréquences, 210, 350 et 480 kHz.

Dans le but d'améliorer la résolution spatiale de la méthode de localisation de défaut mésoscopique, nous avons augmentés le nombre de positions à scanner (10 positions).

3. 13. Localisation de défaut

3. 13. 1. CWI simultanément avec la résonance linéaire

Pour ces mesures, le dispositif expérimental permet de générer les ondes de coda à l'aide d'un sinus profile gaussien pour des niveaux d'excitations de 50 mV amplifiés de 46 dB

via un transducteur piézoélectrique large bande (fréquence 350 kHz) de diamètre 10 mm. Ce dernier est accolé sur l'épaisseur du béton polymère. La colle utilisée dans notre cas pour assurer le couplage entre le transducteur et le composite est le Salolsalicylate de phényle ou Salol. Le couplage est un facteur sensible qui peut générer des effets non linéaires indésirables **[SUN 06, YOU 01, BACC 13]**. Cette colle se présente sous la forme d'une poudre qui cristallise à température ambiante et qui se liquéfie aux alentours de 40°C. Ce couplant offre la possibilité de démonter les capteurs PZT sans les endommager, contrairement à la colle époxy.

Nous avons également utilisé un pont vibrant de type 4809 et un générateur de fonction (Tektronix AFG 3022B) pour générer les modes de résonance en flexion souhaités en configuration horizontale et verticale avec un balayage en amplitude allant de 10 mV à 15 mV amplifiés de 14 dB. Par ailleurs, nous avons utilisé un programme sous LABVIEW permettant une acquisition et un enregistrement des signaux pour différentes positions du transducteur (dix position) par rapport au défaut, de manière automatisée (**Fig.3.25**).

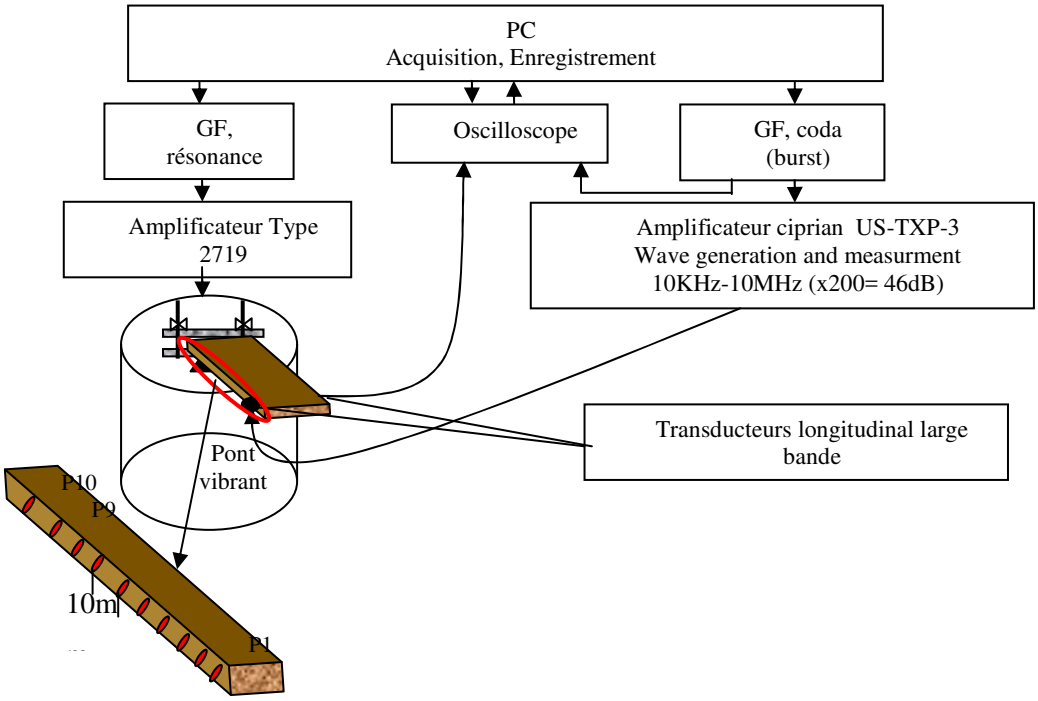


Figure 3.25 : Configuration expérimentale pour la génération des ondes de coda, en simultané avec la résonance pour 10 position (P) des transducteurs.

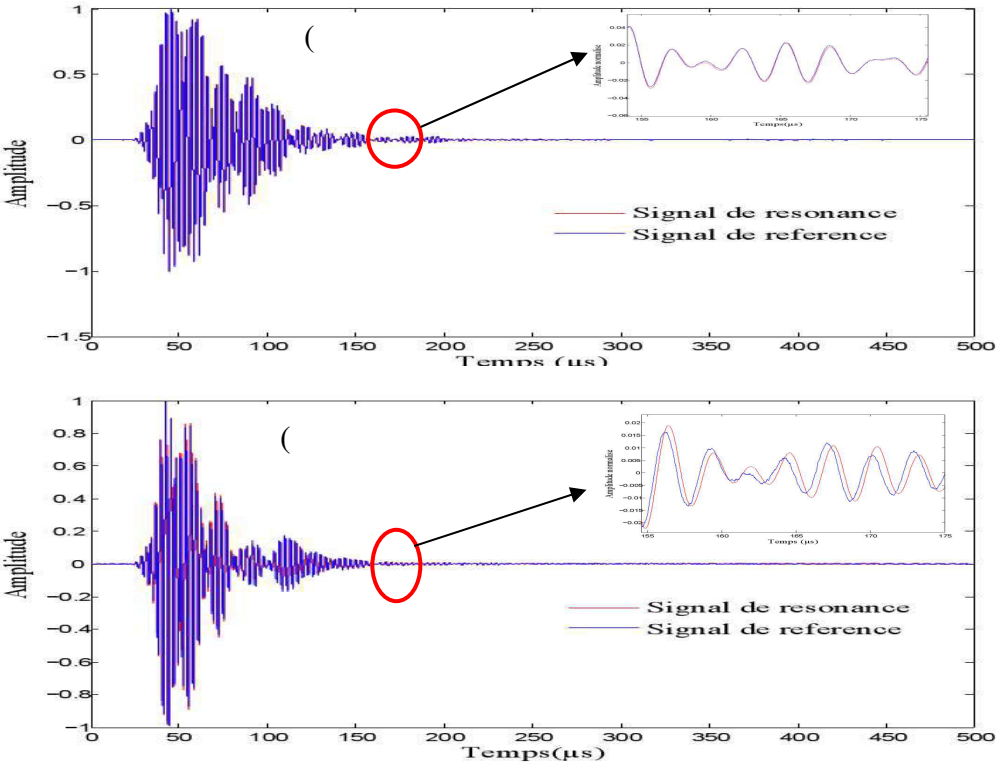


Figure 3.26: Signaux enregistrés avec et sans résonance, amplitude de résonance 10 mV amplifié 14 dB, observation centrée à t_c=166µs, (a) : P_1, M2H et (b) : P_5, M2H respectivement.

Les mesures sont faites pour dix positions (P_1, P_2, .., P_{10}) le long de l'échantillon. Chaque position est soumise à huit différents modes de résonance (quatre en position horizontal et quatre en position vertical).

La **Figure3.26** montre les formes d'ondes obtenues dans la position P_1 pour le deuxième mode M2H. Dans cette position nous avons remarqué l'absence de décalage temporel entre le signal de référence (bleu) et le signal avec résonance (rouge). Par contre en P_5, pour la même configuration M2H, un décalage temporel apparait sur la partie diffusée de l'onde. Il est important de noter le fait que l'onde balistique ne présente aucun décalage quelle que soit la configuration choisie.

L'exploitation de deux enregistrements d'ondes acoustiques $u(t)$ à la date t_1 et $\tilde{u}(t)$ à la date t_2 s'effectue de la même manière, l'équation 3.2 permet de mesurer le coefficient de corrélation R_{max}

3. 13. 1. 1. Coefficient de décorrélation *K*

Le coefficient de décorrélation *K* permet de mesurer le décalage entre deux signaux, Ce coefficient varie entre 0 et 2 : une valeur est égale à 0 montre qu'il n'y a pas un décalage entre les deux signaux enregistré, Une valeur différente de 0 montre l'existence d'un décalage

entre les signaux. Nous pouvons calculer K d'après la relation suivante **[PINE 88, COWA 00, LARO 10] :**

$$K = 1 - R_{\max} \tag{3.5}$$

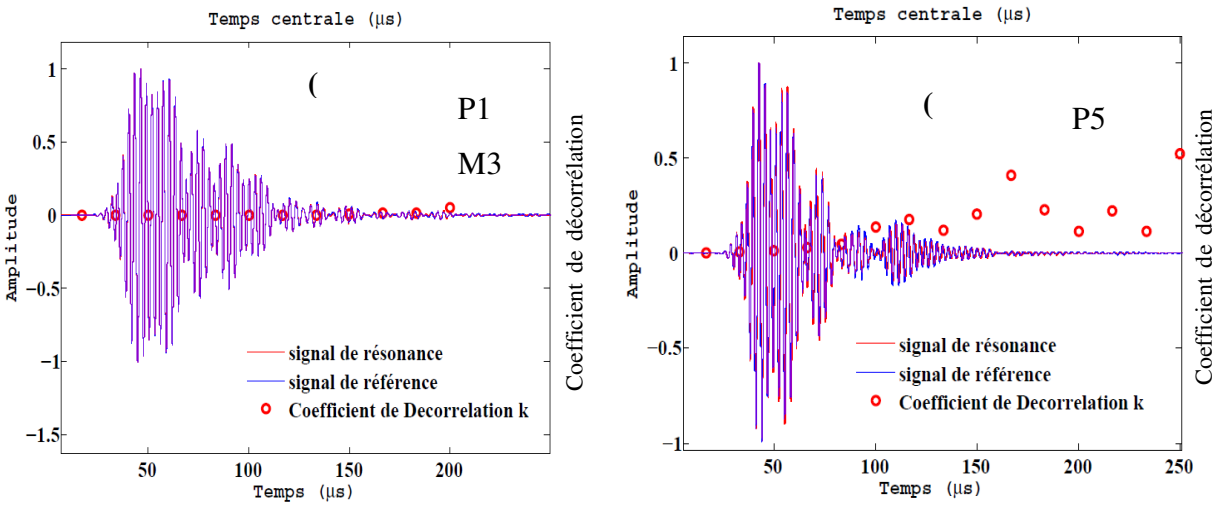


Figure 3.27: Signaux enregistrés avec et sans résonance et variation de coefficient de décorrélation pour la configuration horizontal en fonction de temps central de la fenêtre temporelle; (a) loin de défaut P1 M3, (b) proche de défaut P5M3.

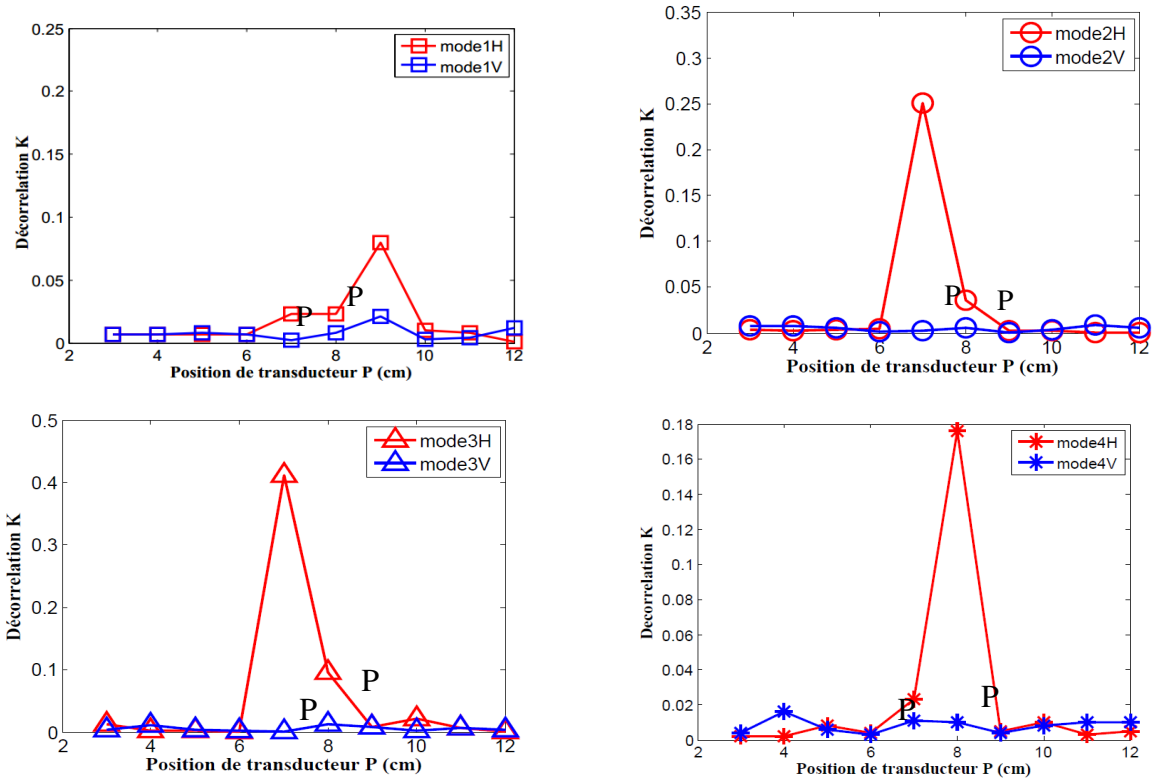


Figure 3.28 : Coefficient de décorrélation sous différentes configurations (V et H) les modes 1, 2, 3, 4.

La **Figure3.28** montre le coefficient de décorrélation en fonction de la position des transducteurs pour les différents modes en flexion et dans les 2 configurations (V et H). Ces différentes positions montrent que le coefficient de décorrélation *K* est très faible le long de l'échantillon et qu'il ne dépasse pas la valeur 0,02. Cela n'est pas le cas pour les positions P_5 et P_6 où, 2 fois selon le mode et la disposition de l'échantillon, *K* peut croitre de plus de 20 fois sa valeur initiale. Ce résultat montre l'intérêt d'utiliser cette combinaison pour détecter et localiser des défauts dans les matériaux microfissures. Par ailleurs, il est important de noter que la configuration H est celle pour la quelle *K* est le plus élevé. Cela est très probablement lié au mode d'endommagement appliqué au béton polymère, qui dans notre cas est un essai de flexion trois points appliqué suivant la largeur de l'échantillon.

3. 14. Sensibilité de mode à caractériser le défaut

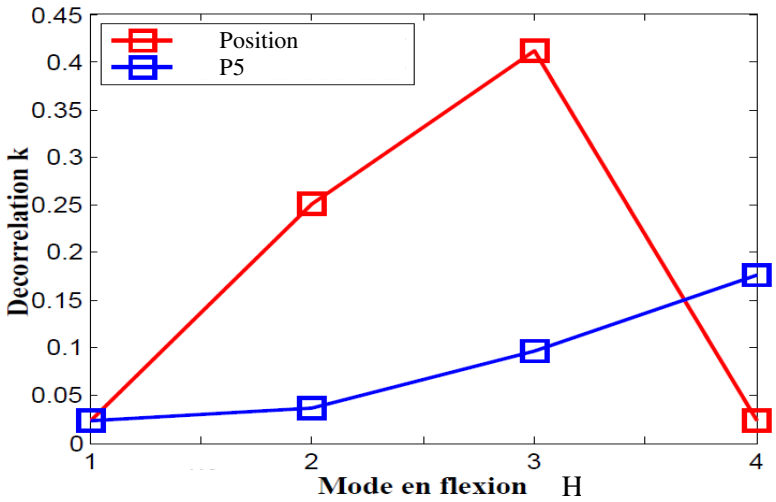


Figure 3.29 : Coefficient de décorrélation pour les positions P5 et P6 en fonction de mode de résonance en flexion en configuration Horizontal pour une amplitude de résonance 10mV.

La **Figure3.29** présente le coefficient de décorrélation pour les positions P5 and P6 en fonction du mode de résonance en flexion horizontal. Nous remarquons que le mode M3H est plus sensible à détecter la présence du défaut que les trois autres modes horizontaux.

3. 15. Conclusion

Le travail réalisé dans cette partie vise à caractériser l'endommagement dans des structures en béton composite à base polymère en couplant la technique d'interférométrie d'onde coda et la résonnance linéaire. Dans un premier temps, nous avons monté un banc de mesure permettant de générer simultanément des ondes guidées correspondant à la résonance en flexion de l'échantillon. Nous avons également réalisé un montage automatisé permettant des mesures impulsionnelles dans différentes configurations en transmission. Le banc de

mesure a été utilisé pour optimiser les gammes de fréquence et d'amplitude permettant de maximiser l'interaction entre le défaut et les ondes acoustiques.

Des expériences préliminaires nous ont montré une forte dépendance entre les modes excités et le défaut pour certains d'entre eux, ce qui nous a conduit à développer notre plan de travail afin de mieux étudier l'interaction entre le défaut et les vibrations générées. D'autre part, la position de l'échantillon, lors des expériences en résonance (horizontale ou verticale), a une forte influence sur le signal diffusé. Nous avons alors décidé de développer notre étude pour ces deux configuration de résonance afin d'étudier l'anisotropie de l'endommagement. Finalement, l'outil que nous utilisons pour investiguer la présence du défaut est très sensible aux paramètres expérimentaux et environnementaux notamment, à la température et à la relaxation de l'échantillon, ce qui nous a emmenés alors à initier une étude visant à s'assurer de la reproductibilité des résultats.

L'application de cette méthode sur un matériau multi-diffusant tel que le béton base polymère a donné des résultats probants :

- La résonance linéaire a augmenté la sensibilité de la technique CWI pour une meilleure caractérisation de l'endommagement.
- L'interaction entre le défaut et la vibration s'est avérée être plus importante dans la configuration horizontale que verticale et donc très dépendante de l'anisotropie de l'endommagement.
- L'interaction la plus sensible a été obtenue pour le mode M3H.

Enfin, il est important de souligner que les outils développés lors de ces mesures au contact peuvent être automatisés et ce pour imager le défaut lors de mesures automatisées sans contact. Les différents résultats sont présentés dans le chapitre quatre.

Référence bibliographique

[ABEE 00a] ABEELE, K.E.-A; JOHNSON, P.A ; SUTIN, A., "Nonlinear elastic wave spectroscopy NEWS techniques to discern material damage. Part I: Nonlinear wave modulation spectroscopy NWMS Resonance," Nondestructive Evaluation, Vol 12, pp : 17-30, 2000.

[ABEE 00b] ABEELE, K. E. A ; CARMELIET, J ; Ten Cate, J. A ; Johnson, P. A ; "Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part II: Single- Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy," Nondestructive Evaluation, Vol12, pp : 31-42, 2000.

[ANNE 08] ANNE, M., « Contrôle de santé des matériaux hétérogènes par émission acoustique et acoustique non linéaire : Discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante », thèse de doctorat, université du Maine, 2008.

[BACC 13] Y. BACCOUCHE., « Caractérisation non linéaire de l'endommagement des matériaux composites par ondes guidées », thèse de doctorat, université du Maine, 2013.

[BENT 05] BENTAHAR, M, " Acoustique non-linéaire : application à la caractérisation ultrasonore de l'endommagement des matériaux hétérogène et à la prédiction de la durée de vie », thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.

[BERB 10] BERBAOUI, R., « Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires à base polymère », thèse de doctorat, université du Maine, 2010.

[BERT 91] BERTHAUD, Y., "Damage Measurement in Concrete via an Ultrasonic Technique - Part I Experiment", Cement and Concrete Research 21, pp : 73-82, 1991.

[CHER 08] CHERKOUNE, M., « Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface ». Thèse de doctorat, école centrale de Nantes 2008.

[COWA 00] COWAN, M. L ; PAGE, J. H ; WEITZ, D. A., «Velocity Fluctuations in Fluidized Suspensions Probed by Ultrasonic Correlation Spectroscopy», Phys. Rev. Lett, p: 85,453, 2000.

[DOMI 08] DOMITILLE, A. M., " Propagation des ondes en milieu désordonné des ultrasons aux ondes sismiques. Etude de la phase», Thèse de doctorat, université Joseph Fourier - Grenoble I, 2008.

[DONS 01] DONSKOY, D ; SUTIN, A ; EKIMOV, A., "Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing", Ndt & E International, Vol 34, pp : 231-238, 2001.

[GLIO 06] GLIOZZI, A; NOBILI, M; SCALERANDI, M., "Modelling localized nonlinear damage and analysis of its influence on resonance frequencies", Journal of Physics D: Applied Physics 39, 3895, **2006**.

[HAUP 12] HAUPERT, S ; RIVIERS, J ; RENAUD, G ; LAUGIER, P., « Détection du micro-endommagement osseux et de l'ostéo-intégration d'implant par acoustique non-linéaire » ; thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2012.

[JOHN 04] JOHNSON, P. A ; ZINSZNER, B ; RASOLOFOSAON, P ; COHEN TENOUDJI, F ; ABEELE, K., "Dynamic measurements of the nonlinear elastic parameter alpha in rock under varying conditions," Journal of Geophysical Research-Solid Earth, Vol 109, (2004).

[LARO 10] LAROSE, E., PLANES, T., ROSSETTO, V., MARGERIN, L, "Locating a small change in a multiple scattering environment" Appl. Phys. Lett. 96, 204101, 2010.

[LIU 10] LIU, X; DAO, Z; ZHU, J; Qu, W; GONG, X; ABEELE, K; MA, L.,"Localization of material defects using nonlinear resonant ultrasound spectroscopy under asymmetric boundary conditions", Physics Procedia, Vol **3**, pp: 55-61, 2010.

[NAZA 07] NAZAROV, V.E; KOLPAKOV, A.B ; RADOSTIN, A.V., « Experimental study of nonlinear acoustical effects in limestone», Acous Phys, pp : 53-217, 2007.

[NECH 05] NECHAD, H; HELMSTETTER, A; ELGUERJOUMA, R; SORNETTE, D., "Creep ruptures in heterogeneous materials", physical review letters, Vol 4, 2005.

[NECH 04] NECHAD, H., « Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogene par ultrasons et emission acoustique: estimation de la durée de vie restante», thèse de doctorat, institut national des sciences appliquees de Lyon, 2004.

[NOVA 12] NOVAK, A ; BENTAHAR, M ; TOURNAT, V ; El GUERJOUMA, R ; SIMON, L., "Nonlinear acoustic characterization of micro-damaged materials through

higher harmonic resonance analysis", NDT&E International, Vol 45, pp. 1-8, 2012.

[PINE 88] PINE, D. J; WEITZ, D. A; CHAIKIN, P. M; HERBOLZHEIMER, E; "Diffusing wave spectroscopy", Phys. Rev.Lett, 60,1134,1988.

[RASO 97] RASOLOFOSAON, P.N.J ; ZINZSNER, B ; JOHNSON, P.A., « Propagation of elastic waves in nonlinear materials survey of laboratory results on rock and geophysical applications », Revue de l'Institut Française du Pétrole, Vol 52, N 6, pp : 585–608, 1997.

[SNIE 07] SNIEDER, R ; PAGE, J., "Multiple scattering in evolving media", American Institute of Physics, S-0031-9228-0705-020-X, 2007.

[SNIE 06] SNIEDER, R., "The Theory of Coda Wave Interferometry", Pure Appl. Geophys, Vol 163, 2006.

[SUN 06] SUN, L; KULKARNI, S; ACHENBACH, J; KRISHNASWAMY, S., « Technique to minimize couplant-effect in acoustic nonlinearity measurements", J.Acoust. Soc.Am, Vol 120, N 5, pp.2500-2505, 2006.

[TENC 96] TENCATE, J A ; SHANKLAND, T. J., « Slow dynamics in the nonlinear elastic response of Berea sandstone », GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL 23, N 21, pp : 3019-3022, 1996

[VANA 07] VANAVERBEKE ,S ; Van Den ABEELE, K., "Two-dimensional modeling of wave propagation in materials withhysteretic nonlinearity,"J. Acoust. Soc. Am, Vol. 122, pp : 58–72, 2007.

[YOUN 01] YOUNG H, K.; SUNG-JIN, S; SUNG-SIK, L; JEONG-Ki, L; SOON-SHIN, H., "A study on the couplant effects in contact ultrasonic testing", 10th APCNDT, Brisbanne, 2001.

Chapitre 4

Caractérisation de l'endommagement par émission acoustique

Sommaire

4. 1. Introduction 84
4. 2. Imagerie par ultrasons sans contact de la zone endommage 84
4. 4. Méthode d'analyse des signaux d'EA 88
4. 5. Mécanismes d'endommagement des matériaux composites 89
4. 5. 2. Béton polymère 91
4. 6. Analyse temporelle des signaux d'EA 91
4. 7. Mécanismes acoustiques non linéaires 93
4. 7. 1. Clapping 94
4. 7. 2. stick-Slip 94
4. 8. Etude expérimentale de l'endommagement à l'aide de l'EA et la résonance non linéaire 95
4. 8.1. Présentation du dispositif expérimental 95
4. 8. 2. Paramétrage du logiciel d'acquisition 97
4. 9. Résultats et discussions 98
4. 9.1. Activité acoustique 98
4. 10. Conclusion 105
Références bibliographiques 106

4. 1. Introduction

Il existe différentes méthodes de caractérisation de défauts dans les matériaux composites par voie ultrasonore telles que les méthodes acoustiques non linéaires. L'imagerie acoustique ultrasonore mettant en jeu l'interaction «ondes de surface ou de volume avec le défaut » est également utilisée et ce pour localiser et dimensionner les zone endommagées. Les matériaux composites sont des matériaux complexes où les méthodes acoustiques dites classiques ont montré leurs limites. La détection et/ou le dimensionnement des défauts dans ce type de matériaux nécessite l'emploi de nouvelles techniques innovantes permettant d'améliorer la sensibilité de détection. Dans le but de caractériser l'endommagement dans les structures composites, en l'occurrence en béton base polymère, et de montrer l'anisotropie d'un défaut mésoscopique dans ce type de matériaux, nous proposons l'utilisation l'imagerie par ultrasons sans contact de la zone endommagée et l'émission acoustique (EA) associée à une vibration modale de faible amplitude. Cette technique d'écoute largement employée dans l'industrie et les laboratoires de recherche a montré de grandes capacités à rendre compte des changements microscopiques ayant lieu dans les structures sous contraintes quasi-statiques. Elle a rarement été utilisée en dynamique et encore moins sur des matériaux microfissurés.

4. 2. Imagerie par ultrasons sans contact de la zone endommagée

Dans le but d'imager la zone de microfissure au sein du béton polymère, nous avons remplacé le système de balayage manuel par un système automatisé sans contact. Pour cela nous avons utilisé des transducteurs d'une largeur de bande allant de 300 kHz à 700 kHz (**Fig4.1**). Par la suite les transducteurs sans contact sont excités avec un signal à profil sinus-gaussien, où le signal reçu à été amplifie de 60 dB. Lors de ces mesures sans contact, le grand décalage existant entre les impédances acoustique «air/béton polymère», où $Z_{air} \cong 216 MRayl$, et $Z_{bp} \cong 9 MRayl$, fait que le coefficient de réflexion des ondes ultrasonore est important $\cong 99.98\%$. Par ailleurs, le fort signal d'excitation qui avoisine les $200V$ associé à un signal reçu moyenné de prés de 50 fois, permet d'obtenir un rapport signal sur bruit de 3 dB pour l'onde balistique. Dans la région coda, le rapport du signal sur bruit des signaux enregistrés est environ de 12 dB. Le signal de référence correspond au signal sans résonance obtenu lorsque l'imagerie en transmission est effectuée lorsque le matériau n'est soumis à aucune vibration. A ce signal, nous considérons également ceux obtenus pour les mêmes positions lorsque le matériau est excité aux alentour d'un de ses modes de résonance en

flexion. Les ondes coda sont analysées en considérant une fenêtre temporelle d'une largeur de ~ 20 µs (8 périodes)

Dans le cas d'un échantillon sain, les mesures n'ont montré aucun décalage entre les signaux de référence et ceux obtenus lors de la mise du matériau en vibration. Cela est aussi vrai pour l'onde balistique que pour la coda. En effet, les décalages temporels obtenus lors de ces mesures n'ont pas excédés les 50 ns et sont de ce fait en dessus de la sensibilité du dispositif expérimental.

Ainsi, l'estimation du coefficient de décorrélation *K* a été utilisée comme base pour la construction d'images ultrasonores de type C-Scan et ce en chaque point de mesure à l'aide du dispositif de la **Figure4.1**. Par ailleurs, le fait de monter l'échantillon sur un pot vibrant également aura permis d'étudier l'influence du mode de résonance généré sur l'image ultrasonore obtenue. En effet, l'endommagement de l'échantillon ayant été effectué par un essai de flexion trois points engendre de par sa nature des fissures orientées selon la direction de flexion. Cela a pour effet de créer un endommagement localisé et orienté de type anisotrope.

L'analyse des signaux obtenus a montré que le décalage temporel entre les signaux de mesure et ceux de référence ne concerne pas l'onde balistique et ce quelle que soit la disposition de l'échantillon et le mode de vibration considéré. Par contre, l'analyse de la partie coda des signaux a révélé l'existence d'un décalage très dépendant de la disposition de l'échantillon et du mode de résonance appliqué. En effet, les mesures ont montré que pour un même mode de résonance, le décalage observé dans la partie coda est très dépendant de la disposition de l'échantillon et du mode de résonance appliqué. En effet, les mesures ont montré que pour le même mode de résonance, le décalage observé dans partie coda est très dépendant de la direction de vibration choisie (**Fig4.2**) ce qui montre l'influence importante de l'anisotropie de l'endommagement sur la détection et la localisation des défauts **[TOUM 17].**

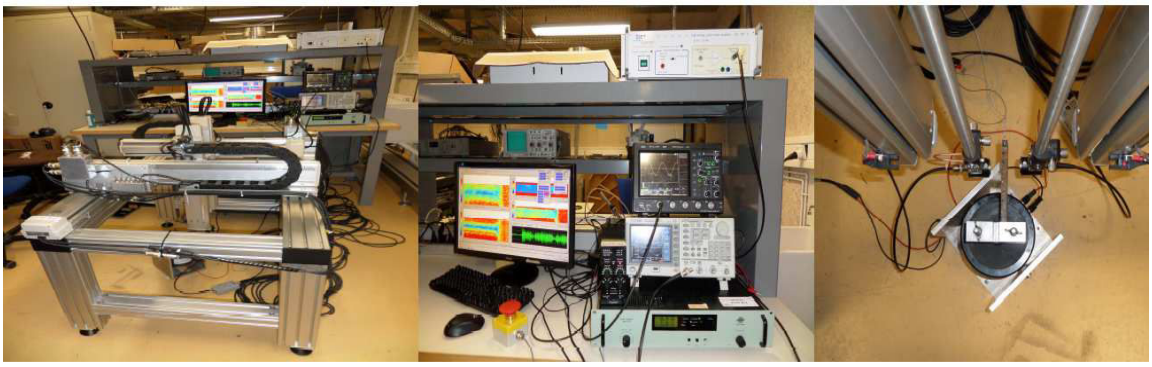


Figure 4.1 : Système d'imagerie par ultrasons aériens ayant servi à imager un béton polymère soumis à une résonance linéaire en flexion.

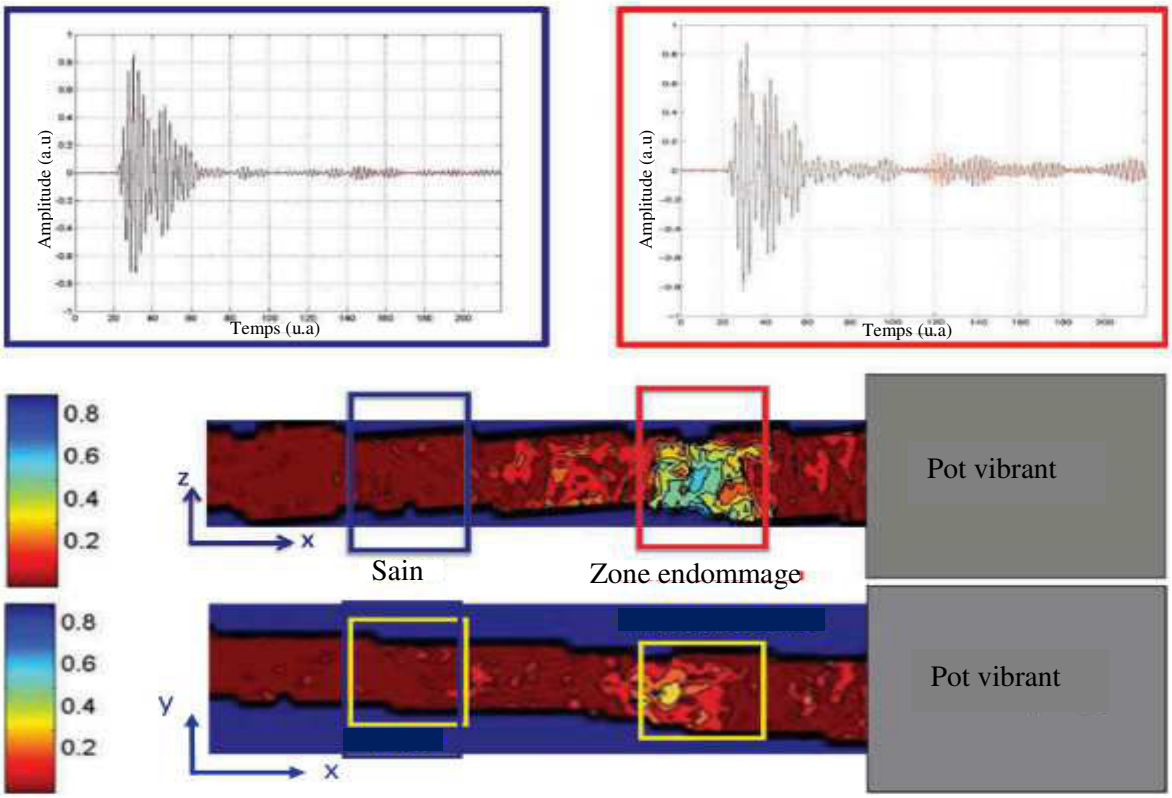


Figure 4.2: Imagerie par ultrasons sans contact de la zone endommagée au sein de béton polymère, où la barre des couleurs correspond au coefficient de décorrélation K déterminée à chaque position de scan. Les résultats sont obtenus quand le béton polymère est excité au voisinage du premier mode de résonance en flexion pour les deux dispositions de l'échantillon, dans le plans XY (verticalement) et le plan XZ (horizontalement).

Il est important de noter que contrairement au plan XZ les résultats relatifs au plan ZY montrent que le coefficient de décorrélation n'a pas permis de détecter et localiser la zone endommagée (**Fig4.2**).

4. 3. Emission Acoustique EA

L'émission acoustique (EA) est un processus physique qui permet de détecter en temps réel les mécanismes de rupture dans les matériaux de structure. Lorsqu'un mécanisme de rupture se produit au sein d'un matériau, il se crée localement une discontinuité du champ des déplacements et des contraintes. Cette discontinuité appelée événement devient la source d'une onde de déformation qui se propage dans le matériau (**Fig4.3**).

Le signal d'EA est traduit en un signal électrique à l'aide d'un capteur en réponse à une onde élastique se propageant entre la source et la surface du matériau. La forme de ce signal dépendra du mécanisme qui est à l'origine de l'onde acoustique se propageant dans le matériau, des propriétés du matériau dans lequel l'onde se propage, de la distance de propagation et du capteur qui transforme l'onde en signal électrique. Lors d'un essai en EA, l'opérateur n'a pas de contrôle sur les mécanismes physiques générateurs des signaux d'EA mais peut seulement soumettre le matériau à des sollicitations extérieures, souvent quasi statiques, et enregistrer les signaux d'émission acoustique pouvant se propager jusqu'à la surface du matériau ou la structure à caractériser **[THUM 04, SIBI 11, CARM 09]**.

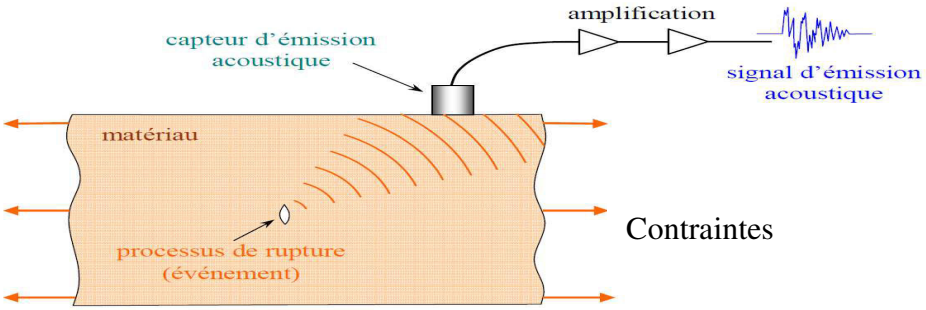


Figure 4.3 : Principe d'émission d'un signal acoustique dans un matériau sous contrainte.

Le principe de la méthode, dans lequel le matériau joue le rôle d'émetteur, n'exige ni l'utilisation d'un type particulier de matériau ni un environnement spécifique. Cet avantage privilégie l'utilisation de l'émission acoustique lorsqu'il est question de suivre in situ l'évolution de l'endommagement des matériaux en service. Cependant, ce même avantage est la source du plus grand problème pratique de cette technique. En effet, il n'y aucun moyen d'intensifier les ondes élastiques générées par un défaut et d'améliorer ainsi la sensibilité des capteurs **[NOND 05, BENT 05]**.

L'une des premières utilisations de l'EA est reportée par Portevin et Le Chatelier **[PORT 23]** lors de l'apparition de bandes dites de Lüders. Ces dernières correspondent à une

déformation hétérogène de l'échantillon, localisée dans des bandes qui se déplacent le long de l'éprouvette durant un essai de traction sur un alliage d'aluminium. Lorsqu'une structure contenant un défaut est soumise à une variation de contrainte et si ce défaut évolue sous cette sollicitation il devient source d'EA donnant naissance à des ondes élastique transitoires qui se propagent au sein du matériau. La détection d'un signal d'EA, ou d'une « Salve », permet de déceler en temps réel l'existence d'un défaut évolutif. L'EA générée peut être irréversible. Cela peut être vérifié à travers l'existence de l'effet Kaiser **[KAIS 50, AL HA 14, BENT 09]**. En effet, l'effet Kaiser est décrit par l'absence d'EA lorsqu'un matériau ou une structure portée à un niveau de sollicitation noté P1 puis déchargée n'émet pas tant que la sollicitation appliquée lors d'une deuxième mise en charge, reste inférieure à la valeur maximale précédemment atteinte, c'est à dire P1. Le niveau de sollicitation lié à l'apparition de l'EA lors de la deuxième mise en charge est noté P2. Dans le cas où la structure est endommagée alors P2 < P1. On peut ainsi définir le rapport de Felicity R_f qui permet de quantifier l'effet Kaiser par:

$$R_f = \frac{P_2}{P_1} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Si le matériau a été endommagé alors $R_f < 1$ **[ANNE 08].**

4. 4. Méthode d'analyse des signaux d'EA

Dans le cas d'une EA discrète tel que dans les composites, l'analyse des formes d'ondes et des paramètres de salve est primordiale. Ces paramètres permettent de caractériser le type de signal en liaison avec les mécanismes d'endommagement créés au sein du matériau étudié. La **Figure4.4** qui représente une salve d'EA, permet de distinguer les paramètres suivants : **[BEAT 83, BERB 10, BENT 05]**

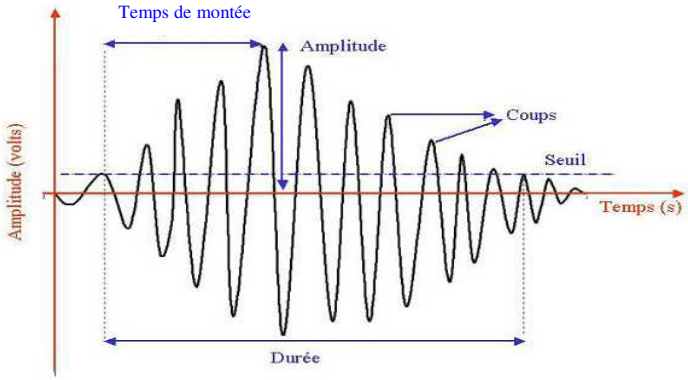


Figure 4.4 : Paramètres d'une salve d'Emission Acoustique **[BENT 05]**.

L'amplitude : valeur maximale crête atteinte par la salve, exprimée en dB.

La durée : correspond au temps écoulé entre le dernier dépassement de seuil, en général exprimé en microsecondes.

Le nombre de coups : il s'agit du nombre de pics qui dépassent le seuil pendant la durée de la salve.

Le temps de montée exprimé en microsecondes : il correspond au temps qui sépare le premier dépassement de seuil et l'amplitude maximale de la salve.

La fréquence moyenne : cette valeur donnée par la plupart des systèmes d'acquisition ne correspond pas à la transformée de Fourier du signal mais au nombre de coups d'une salve divisé par sa durée **[FITZ 89]**.

L'endommagement des matériaux composites est un point clé pour la maîtrise de la durabilité et de la fiabilité des pièces et matériaux en service. Il est nécessaire non seulement de quantifier l'endommagement mais aussi d'identifier les différents mécanismes qui en sont responsables et d'établir leur chronologie. En effet, dans les composites, il y a plusieurs modes d'endommagement (fissuration matricielle, rupture de fibres, décohésion, etc.) liés à leur structure et aux caractéristiques des constituants. L'émission acoustique (EA) permettant de détecter et de suivre en temps réel l'endommagement au sein d'un matériau composite ou d'une structure apparaît alors comme un outil complémentaire aux investigations microstructurales et à la modélisation mécanique **[GODI 11]**. En particulier, dans le cas du béton il a déjà été établi par OHTSU et al que la présence de microfissures peut être corrélée au rythme de génération des ondes acoustiques **[KRAJ 00, OHTS 01]**.

4. 5. Mécanismes d'endommagement des matériaux composites

4. 5. 1. Composite à base de fibre

Durant le processus de dégradation des matériaux composites soumis à une sollicitation mécanique, plusieurs mécanismes d'endommagement à l'´echelle microscopique sont généralement mis en jeu (**Fig4.5**). Pour les composites à fibres, quatre principaux modes d'endommagement peuvent intervenir **[BERT 99, ELGU 01]** :

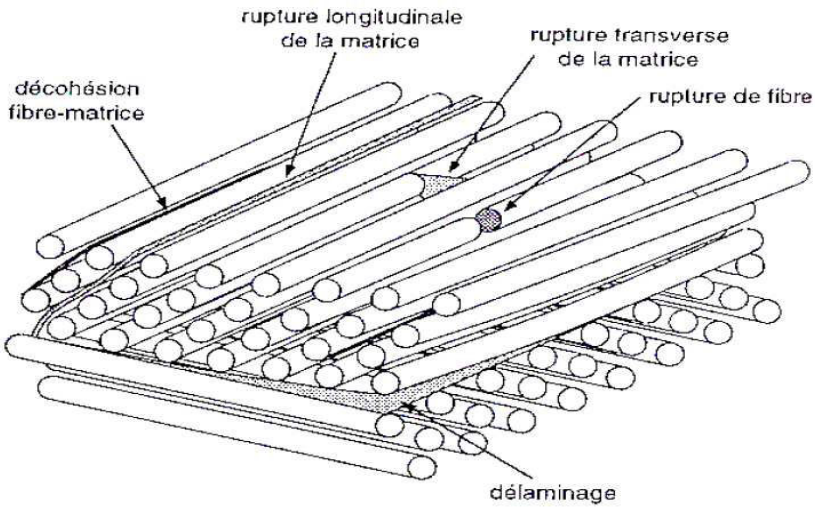


Figure 4.5 : Mécanismes d'endommagement observés dans un composite **[BERT 92].**

- **Fissuration de matrice :** Des microfissurations apparaissent dans la matrice. Ces microfissurations vont entraîner la propagation de fissures selon la direction perpendiculaire à la sollicitation. La contrainte au niveau des fissures peut provoquer une rupture de fibre ou un décollement interfacial à l'arrivée sur une interface **[ANNE 08]**

- **Rupture de fibres :** Elles s'amorcent au niveau des défauts présents dans les fibres quand la contrainte appliquée excède la contrainte à la rupture. Les interfaces autour des fibres peuvent également se rompre et ainsi permettre un déchaussement des fibres **[BERT 92]**.

- **Décohésion interfaciale :** les deux mécanismes cités précédemment s'accompagnent généralement de décohésions aux interfaces fibre/matrice. Ces décollements dépendent de la qualité de l'adhésion aux interfaces. En effet, dans le cas d'une interface très résistante, la rupture initiée, soit par rupture de fibres, soit par rupture de la matrice, induit des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice. Pour une interface de faible résistance, la rupture de la matrice traverse les fibres sans qu'il y ait rupture de fibres, mais avec décohésion de l'interface fibre-matrice **[BERT 92]**.

- **Délaminages** Le processus de délaminage est le résultat d'une chronologie de divers types d'endommagement. Les propriétés mécaniques de la matrice et de la fibre ainsi que les propriétés adhésives et cohésives de l'interface gèrent cette chronologie en révélant des types d'endommagement fréquemment rencontrés comme la micro

fissuration de la matrice, la rupture des fibres et la rupture des interfaces. Le délaminage progresse essentiellement par fissuration interlaminaire considéré comme le premier responsable du dédoublement de son épaisseur. A cela, on associe un réseau très important de fissures intralaminaires qui sont eux aussi induites par les fissures interlaminaires par différents moyens (rupture de matrice, de fibre et d'interface) allant jusqu'au décollement total des deux plis. Ce type d'endommagement contribue largement à la dégradation des propriétés mécaniques de la structure **[NECH 04]**.

4. 5. 2. Béton polymère

Les premiers endommagements intervenant lors d'une sollicitation quelconque sur un matériau granulaire base polymère commencent à se développer à l'´echelle microscopique lorsque l'effort localisé atteint la limite de rupture d'un des constituants (résine, granulats, sable) ou celle de l'interface les reliant. Les mécanismes d'endommagement potentiels d'un matériau hétérogène base polymère soumis à une sollicitation mécanique peuvent se regrouper en trois principaux types : la fissuration matricielle, la rupture de l'interface agrégat/matrice (décohésion interfaciale) et la rupture des agrégats (voire chapitre1) **[VAN 92, DIOU 05]**.

Chaque signal d'EA généré contient des informations utiles sur le mécanisme d'endommagement source. Un des principaux avantages de l'EA est de pouvoir discriminer les différents mécanismes d'endommagement à partir des signaux détectés. Dans l'analyse conventionnelle de l'´emission acoustique, la propagation et les altérations du signal ne sont pas prises en compte. Cela consiste à analyser des paramètres extraits des salves d'EA et à les relier aux sources d'EA. Ces paramètres dépendent fortement des propriétés du matériau, des géométries des éprouvettes, des capteurs utilisés et du système d'acquisition.

4. 6. Analyse temporelle des signaux d'EA

De nombreuses études ont montré que les mécanismes sources des signaux d'EA recueillis lors des essais quasi statiques effectués sur des composites peuvent être identifiés en utilisant un ou plusieurs paramètres temporels calculés sur les salves d'EA.

De Groot et al. **[DEGR 95]** se sont appuyés sur un calcul de fréquence moyenne durant des essais de traction monotone sur des composites carbone/époxy. Ils ont ainsi défini les domaines fréquentiels des principaux modes d'endommagement :

- Les signaux entre 90-180 kHz correspondent à la fissuration matricielle.
- Les signaux entre 240-310 kHz correspondent aux décohésions.
- Les signaux Supérieurs à 300 kHz correspondent aux ruptures de fibres.

Par ailleurs, il faut également signaler d'autres études basées sur l'amplitude des signaux d'EA. S. Huguet **[HUGU 02]**, Benzeggagh et Barre **[BARR 74, BENZ 92]** se sont intéressés à l'évolution de l'amplitude des signaux d'EA recueillis lors d'essais quasi-statiques de flexion et de traction uniaxiale sur des échantillons en composites à fibres de verre et de carbone. Ils ont réussi à identifier que les fissurations matricielles ont une amplitude comprise entre 40 et 55dB, les décohésions fibre/matrice entre 60 et 65dB, les déchaussements (pull-out) de 65 à 85dB et les ruptures de fibres entre 85 et 95dB. Par ailleurs, Chen et al. **[CHEN 92**] ont étudié l'évolution de l'amplitude des signaux d'EA lors d'essais de flexion et de traction sur des composites à fibres courtes de carbone. Les résultats obtenus, comparés à des observations micrographiques à différents stades des essais leur ont permis d'identifier deux zones d'amplitudes correspondant à des mécanismes différents : de 60 à 80dB pour les fissurations de la matrice et de 70 à 90dB pour les ruptures de fibres et les déchaussements (pull-out). Kim et al. **[KIM 97]** ont quant à eux réalisé des essais de mise sous charges successives des composites à fibres de carbone et à matrice polymère à plis croisés [0°/90°]. Les fissurations matricielles ont été reliées aux signaux de faibles amplitudes (40 à 70dB) et les ruptures de fibres à ceux ayant de fortes amplitudes (60 à 100dB).
Kotsikos et al. **[KOTS 99]** ont étudié des composites stratifiés [0°/90°] à fibres de verre et à matrice polyester soumis à des tests de fatigue. Ils ont associé les fissurations matricielles aux signaux d'amplitude comprise entre 40 et 55dB, les délaminages de 55 à 70dB et les ruptures de fibres aux signaux de plus de 80dB.

Ceysson et al. **[CEYS 96]** ont effectué différents types d'essais de flexion sur des stratifiés composés de fibres de carbone et d'une matrice époxy. Les distributions en amplitude obtenues sont centrées autour de 50dB pour les fissurations matricielles et près de 62dB pour les délaminages.

Ces études montrent que les mécanismes d'endommagement rencontrés dans les composites peuvent être classés par amplitude croissante : fissurations matricielles,

décohésions et/ou délaminages et les ruptures de fibres. Cependant ces distributions d'amplitude varient selon le type d'essai et le matériau.

Pour les matériaux composites se rapprochant le plus des matériaux que nous étudions, Berbaoui et al, ANNE et al **[BERB 10, ANNE 08]** ont montré que l'analyse conventionnelle des données d'EA a permis d'identifier la signature acoustique de l'endommagement matriciel, de la décohésion interfaciale et de la rupture des agrégats au sein des matériaux granulaires à base polymère. Trois domaines d'amplitude ont été identifiés:

- De 35 à 60 dB pour la fissuration matricielle.
- De 50 à 90 dB pour la décohésion interfaciale.
- De 95 à 100 dB pour la rupture de granulat.

L'objectif de ce chapitre n'est pas de créer une bibliothèque de signaux pour fusionner les données relatives aux signaux d'EA. Nous nous intéresserons plutôt à l'étude du comportement d'un défaut mésoscopique créé dans un béton base polymère et ce à l'aide des données de l'EA récoltés au cours d'essais acoustiques en résonance non linéaire. Mais avant d'étudier ce lien, rappelons d'abord les mécanismes acoustiques non linéaires pouvant être l'origine des signaux d'EA.

4. 7. Mécanismes acoustiques non linéaires

Depuis plusieurs années, il a été montré qu'une fissure dans un matériau tel que le béton pouvait être considérée comme une inclusion produisant une réponse non linéaire importante suite à une sollicitation dynamique importante **[LHEM 01]**. Ce type de non linéarité caractérisé par l'existence d'une boucle d'hystérésis dans la relation contrainte-déformation décrite à l'échelle mésoscopique rend l'utilisation de la théorie classique (la théorie classique de Landau) inadéquate et impose le développement de nouvelles approches pour traiter au mieux les phénomènes non linéaires non classiques **[HAMI 98**, **ROYE 00**, **TRUE 69**]. En effet, ces derniers présentent des singularités (microfissures, joins de grains, dislocations, etc.) distribuées de manière hétérogène à l'échelle mésoscopique. Par conséquent, différents mécanismes physiques associés au comportement peuvent être à l'origine des non linéarités observées **[IDJI 14]** tel que le clapping, stick/slip et l'adhésion.

4. 7. 1. Clapping

Le « clapping » suppose l'ouverture et la fermeture de la fissure lors de la sollicitation acoustique, comme cela peut être le cas dans certains milieux fissurés comme les roches. Toutefois, lorsque l'onde incidente atteint une interface de contact imparfaite, la partie en compression est transmise alors que la partie en traction ouvre la fissure et est de ce fait réfléchie. Le principe mécanique est donné par la **Figure4.6**. Une fissure peut être présentée comme une inclusion dont la rigidité est plus importante en compression qu'en traction. Lorsque la fissure est fermée, la rigidité du solide est égale à celle du matériau sain, alors qu'elle est plus faible lorsque la fissure est ouverte.

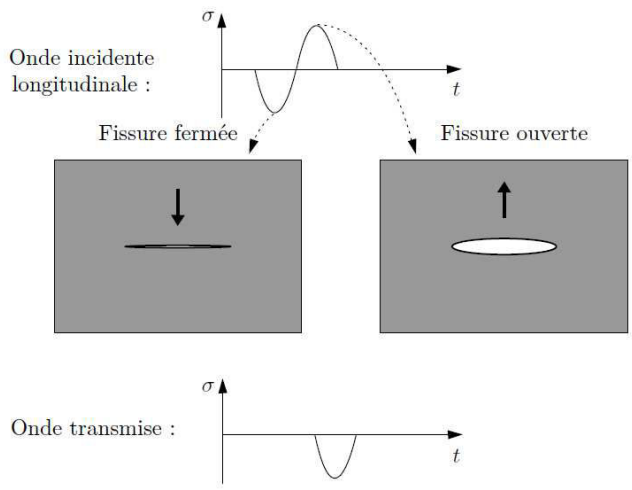


Figure 4.6: Principe du contact acoustique non linéaire pour une fissure abordée par une onde longitudinale sous incidence normale : seules les compressions sont transmises à travers l'interface de contact **[IDJI 14].**

4. 7. 2. stick-Slip

Le stick-slip caractérise un mouvement observé lors du glissement relatif de deux objets (**Fig4.7**). Le mouvement de l'objet n'est en général pas uniforme mais saccadé: avec des périodes où l'objet résiste et ne bouge pas appelées *stick* ; puis des périodes plus courtes où le seuil de résistance est dépassé et l'objet glisse sur une distance importante appelées *slip* **[BOCQ 05]**. Le comportement en stick-slip a été beaucoup étudié dans les matériaux granulaires durant la rupture en cisaillement **[ALBE 07]**. Il a été trouvé que la vitesse de déformation mise en jeu au voisinage des défauts mésoscopiques joue un rôle important dans l'ampleur du phénomène en question. Quand la vitesse de déformation est suffisamment importante le phénomène du « stick-slip » n'a pas le temps de s'établir de façon claire

[ROUS 05]. Par ailleurs, il a été également démontré qu'en plus de l'influence de la vitesse de déformation, la taille de l'échantillon peut elle aussi influer sur le phénomène du stick-slip **[ADJE 04]**.

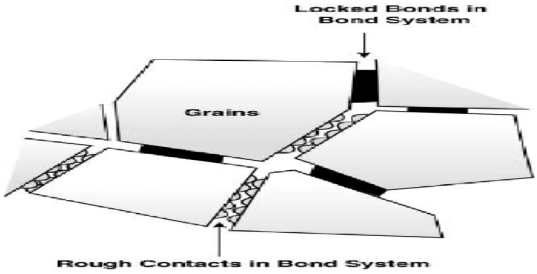


Figure 4.7 : Contacts entre grain, générateurs de non linéarité **[OSTR 01]**.

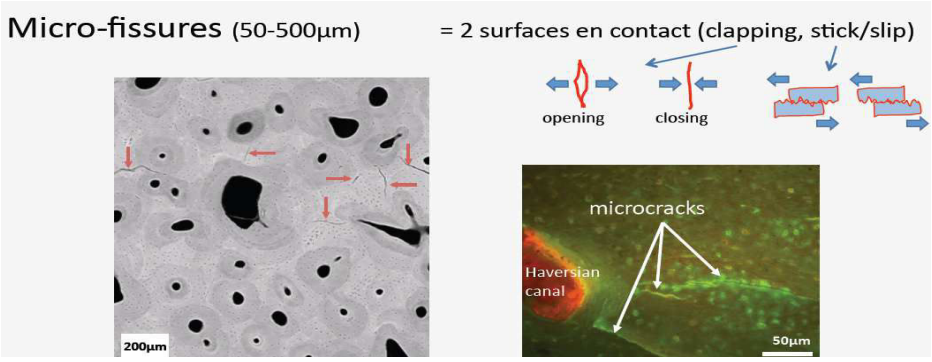


Figure 4.8 : Deux surfaces en contact : clapping et stick/Slip **[HAUP 12]**.

4. 8. Etude expérimentale de l'endommagement à l'aide de l'EA et la résonance non linéaire

4. 8.1. Présentation du dispositif expérimental

Avant d'effectuer les mesures en émission acoustique, nous avons déterminé les deux premiers modes de résonance en flexion dans les deux configurations précédemment citées où l'échantillon est disposé dans le plans XY (verticalement) et le plan XZ (horizontalement) (**Fig4.9**). Pour se faire, nous avons utilisé un pot vibrant de type BK 4809 excité par un analyseur de spectre associé à un amplificateur (14dB). L'analyseur de spectre, qui joue le rôle d'un générateur de signaux (sinus glissant) et de carte d'acquisition (après mise en forme des signaux grâce à un conditionneur), permet de couvrir une gamme fréquentielle qui s'étend jusqu'à ~ 102 kHz. Pour enregistrer les signaux des modes souhaités, nous avons utilisés un accéléromètre transversal large bande, allant de 1 Hz à 10 KHz, relié à un conditionneur.

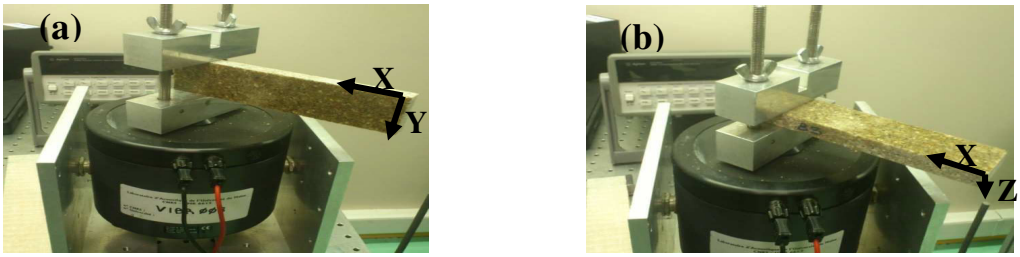


Figure 4.9: Les deux configuration permettant d'exciter le béton base polymère en résonance. (a) : Le plans XY (vertical). (b): Le plans XZ (horizontal).

L'étude du comportement de défaut est réalisée à l'aide de l'EA effectuée simultanément aux mesures en résonance, (**Fig4.10**). La détection des signaux est faite à l'aide de deux transducteurs l'un collé sur la surface et l'autre sur l'épaisseur de l'échantillon (**Fig4.10**). Chaque transducteur est relié à une carte d'acquisition (USB-AE Node) (**Fig4.11**). Les signaux détectés sont pré-amplifiés à 40 dB, échantillonnés à 1MHz, convertis et numérisés pour extraire les paramètres temporels et fréquentiels les plus probants. Les données extraites sont transmises au micro-portable, permettant l'affichage en temps-réel, le stockage et le post-traitement des données. Par ailleurs, nous avons choisi de travailler avec les deux premiers modes de résonance en flexion pour les deux configurations XZ (H) et XY(V) du béton excité à des amplitudes de 50 ,100 et 200mv amplifiées de 14 dB.

Les transducteurs utilisés pour capter les signaux acoustiques à la surface de l'échantillon sont de nature piézoélectrique d'une bande passante allant de 100KHz à 1MHz, de diamètre 18.88*mm,* collés sur l'épaisseur et la surface du béton base polymère. La colle utilisée dans notre cas pour assurer le couplage entre le transducteur et le béton est la Salolsalicylate de phényle ou Salol caractérisée par un contact rigide et facile à décoller.

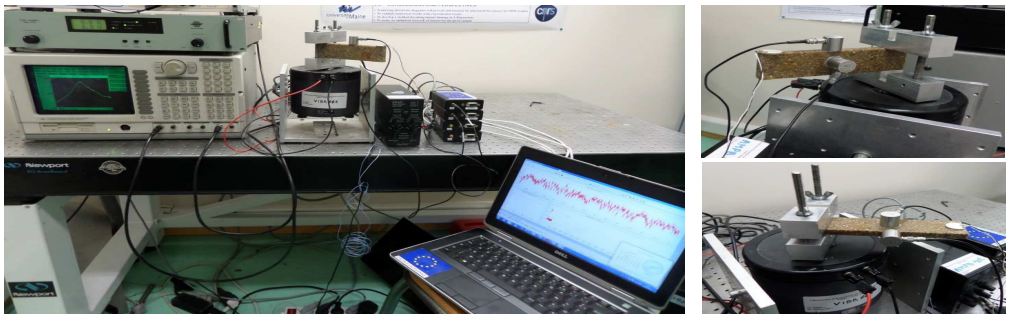


Figure 4.10 : EA effectuée simultanément aux mesures en résonance, les deux capteurs d'EA sont collés parallèlement aux (XY) et (XZ) de l'échantillon.

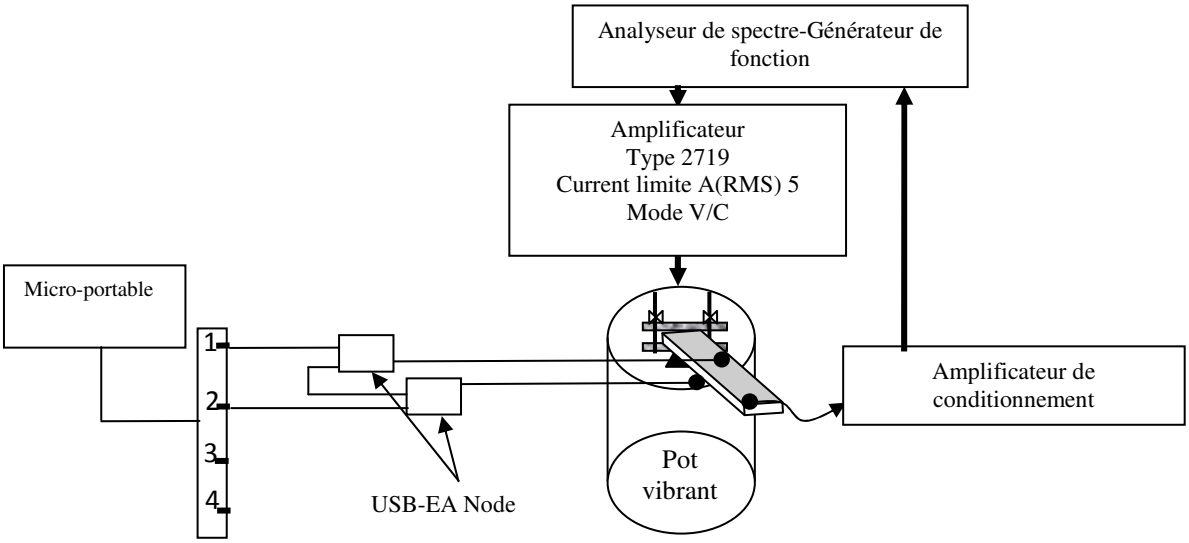


Figure 4.11 : Dispositif expérimental permettant d'étudier le comportement d'un défaut à l'aide de l'EA récoltés au cours d'essais acoustiques en résonance non linéaire. Chaque capteur est relié à une carte d'acquisition (USB-AE Node).

4. 8. 2. Paramétrage du logiciel d'acquisition

Le paramétrage du logiciel d'acquisition des signaux d'EA est essentiel pour une prise en compte optimale des salves d'émission acoustique. Il s'agit de régler des filtres temporels appelés PDT (Peak Definition Time), HDT (Hit Definition Time) et HLT (Hit Lockout Time). Ces paramètres de configuration permettent de bien acquérir les caractéristiques temporelles des signaux acoustiques (**Fig4. 12**). Les fenêtres temporelles utilisées permettent de définir respectivement, lors de l'acquisition d'un signal, le pic de plus forte amplitude, la durée totale de la salve enregistrées et le temps d'aveuglement du système visant à ne pas confondre deux salves successives. Elles sont définies comme suit **[ANNE 08, BENT 05]** :

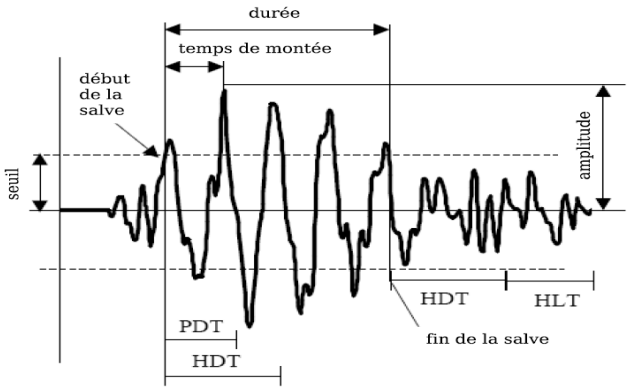


Figure 4.12 : Fenêtres temporelles pour l'acquisition des salves d'EA : PDT, HDT et HLT.

- PDT (Peak Definition Time) permet de déterminer le pic de la plus forte amplitude et le temps de montée de la salve d'EA. Cette fenêtre débute au premier dépassement du seuil et est reconduite si un nouveau maximum est mesuré dans le PDT.
- HDT (Hit Definition Time) permet de déterminer la fin d'une salve et donc sa durée. Cette fenêtre est reconduite à chaque dépassement de seuil. Si aucun dépassement de seuil n'est présent dans le HDT, alors la fin de la salve est définie par le dernier dépassement du seuil. Le HDT doit être aussi court que possible pour éviter d'avoir deux salves considérées comme une seule.
- HLT (Hit Lockout Time) permet d'exclure d'éventuelles réflexions tardives dans les signaux d'EA. Le HLT débute à la fin du dernier HDT. Ces valeurs vont définir la manière dont seront calculés les paramètres sur les signaux d'EA.

Dans notre cas, les valeurs des filtres temporels ont été évaluées moyennant la méthode de rupture de mines qui génère des ondes de surface et de volume dans le béton base polymère. Après plusieurs essais, nous avons retenu les valeurs suivantes : PDT : 50 µs, HDT : 100 µs et HLT : 300 µs. Ces valeurs seront utilisées dans la suite pour détecter les signaux d'émission acoustique une fois le béton base polymère mis en vibration. Par ailleurs, la faiblesse des amplitudes des salves générées par des vibrations de faibles amplitudes nous a obligé à baisser le seuil de détection de 30dB à 25 dB et ce pour détecter les mécanismes non linéaire soupçonnés d'être faiblement émissifs.

4. 9. Résultats et discussions

4. 9.1. Activité acoustique

Les modes de résonance concernés dans cette partie sont les modes en flexion lorsque le béton base polymère est disposé dans le plans XZ (H) et le plans XY (V) en condition encastré/libre. L'activité d'EA a été enregistrée en résonance pour quatre modes de vibration en flexion (**Fig4.13**). Il s'agit des modes M1H, M2H, M1V et M2V, en particulier, nous nous sommes intéressés à l'activité acoustique en termes de volume ou nombre de signaux lorsque le béton est mis en résonance. A cela s'ajoute un intérêt pour les amplitudes des signaux d'EA ainsi qu'à leurs composantes fréquentielles.

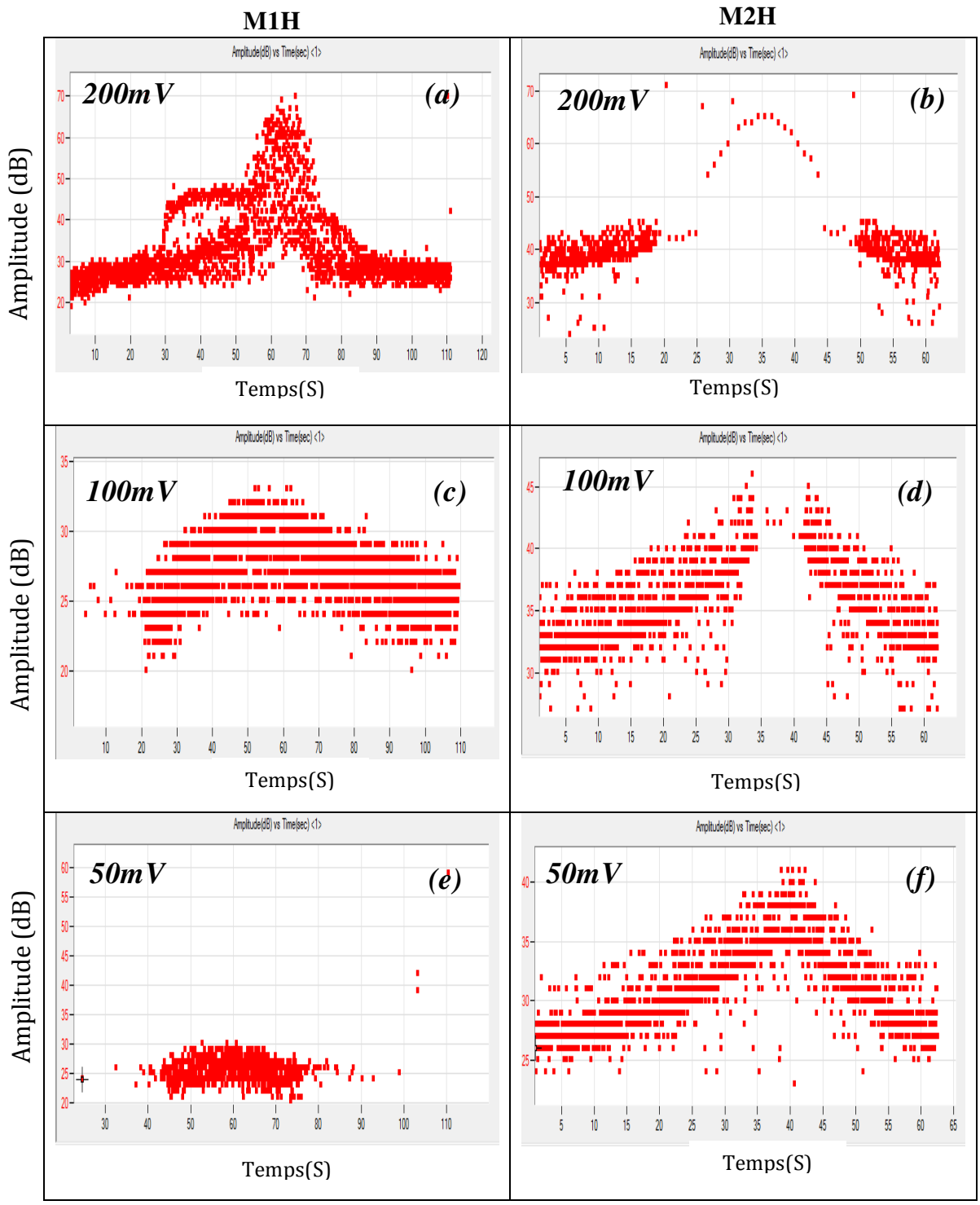


Figure 4.13 : Evolution de l'activité acoustique (amplitude des salves) au cours de la résonance du béton polymère pour une disposition horizontale (plan XZ). Les résonances sont générées à : **(a)** :200mV, M1 ; **(b)** : 200mV,M2 ; **(c)** : 100mV,M1 ; **(d)** : 100mV, M2 ; **(e)** : 50mV, M1 ; **(f)** : 50 mV, M2.

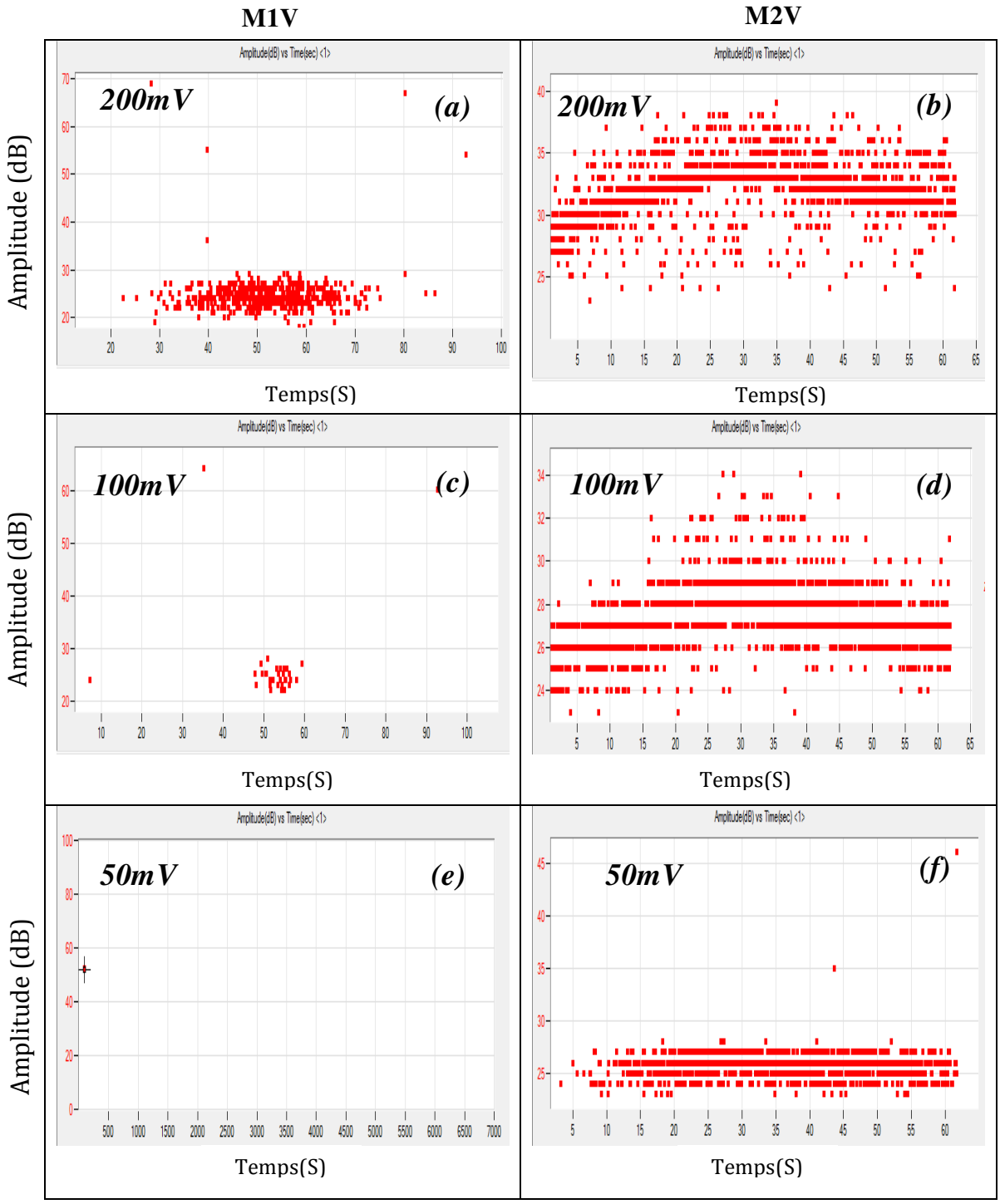


Figure 4.14 : Evolution de l'activité acoustique (amplitude des salves) au cours de la résonance du béton polymère pour une disposition verticale (plan XY). Les résonances sont générées à : **(a)** :200mV, M1 ; **(b)** : 200mV,M2 ; **(c)** : 100mV,M1 ; **(d)** : 100mV, M2 ; **(e)** : 50mV, M1 ; **(f)** : 50 mV, M2

Les **Figures4.13** et **Figures4.14** représentent l'évolution de l'activité acoustique pour les deux configurations de vibration en résonance du béton. Il est facile de constater que

l'amplitude et le nombre de salves enregistre dans les deux positions du matériau sont très différents.

De façon générale, nous pouvons dire que la configuration horizontale est plus émissive que la verticale. L'augmentation du niveau d'excitation n'as pas pour effet d'inverser la balance. En effet, nous remarquons que le mode vertical est très peu émissif à 50 mV et que par les modes M1V et M2V contrairement aux modes M1H et M2H. Cette tendance est confirmée pour les mêmes modes générés à des amplitudes plus élevées. Par ailleurs, l'augmentation du niveau d'excitation pour les modes M1V et M2V ne crée pas de changement au niveau des salves d'EA où les niveaux d'amplitudes des salves enregistrées restent inferieurs à 40 dB et ce même à 200mV d'excitation avant amplification. Cela suggère que les mécanismes non linéaires mis en jeu dans cette configuration restent les mêmes et qui aucun amorçage de nouveaux mécanismes n'à lier en fonction de l'excitation.

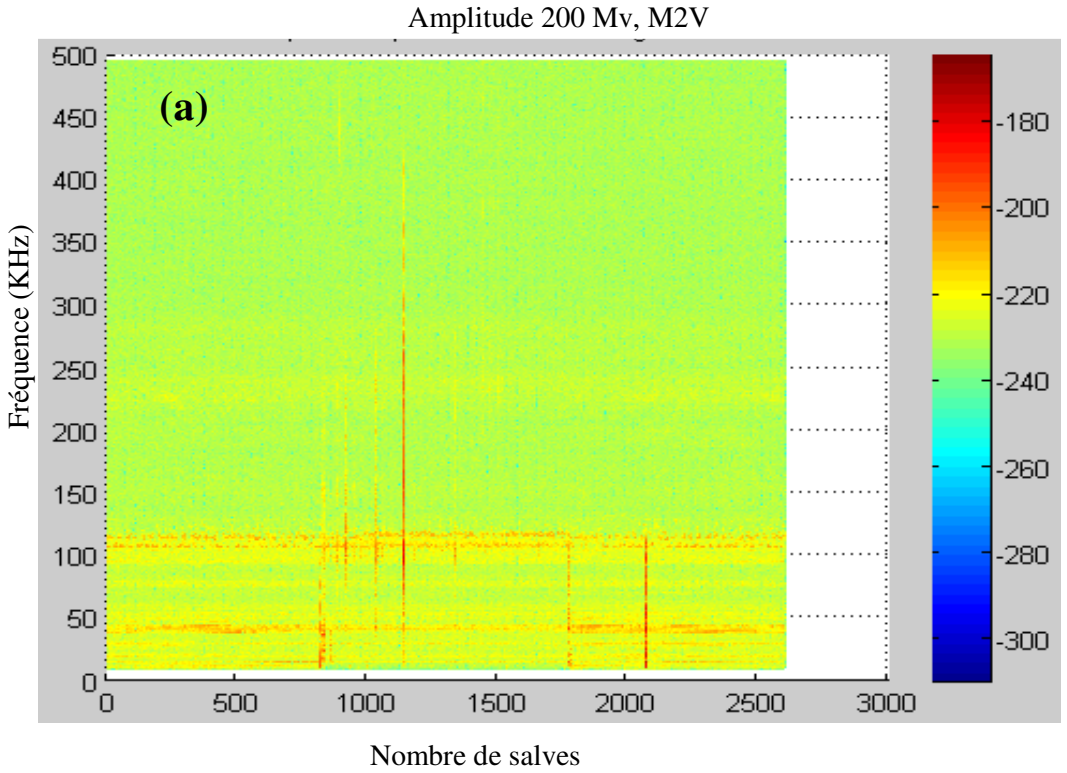
En revanche, lorsqu'on augmente le niveau d'excitation des modes M1H et M2H, nous pouvons clairement voir le changement d'amplitude des salves d'EA. En effet, les amplitudes des slaves augmentent de façon considérable pour passer de 25 dB à presque 70dB lorsque l'excitation est de 200 mV avant amplification. Cela suggère que les mécanismes non linéaires mis en jeu dans cette configuration ne sont pas les mêmes et semblent même dépendre du niveau de déformation dynamique pour être activés. Cependant cette première constatation basée sur l'amplitude n'aura de sens que lorsqu'elle est coordonnée par d'autres paramètres pouvant caractériser les salves enregistrées.

Pour compléter cette étude, nous nous sommes intéressés aux composantes fréquentielles des signaux d'EA et ce à travers l'étude de leurs transformées de Fourrier

La **Figure4.15** présente l'évolution des composantes fréquentielles des salves d'EA enregistrées dans les configurations M2V et M2H à 200 mV avant amplification. Les signaux sont représentés selon l'ordre de leur apparition. D'après les résultats obtenus, nous pouvons observer qu'en plus des faibles amplitudes obtenues dans les deux essais (M2V et M2H), les comopsantes fréquentielles ne présentant aucune diffrénce notable et ce que nous soyons à la résonance pour les deux configurations.

Cela n'est pas le cas pour les configurations M1H et M1V (**Fig4.16**). en effet, la richesse spectrale des salves d'EA est facilement observable en particulier autour de la résonance pour le mode M1H. Ces composantes fréquentielles des signaux d'EA montrent qu'une fissure dans un matériau tel que le béton est capable de produire une réponse non linéaire importante suite à une sollicitation dynamique. Ces figures illustrent également que le comportement du défaut dépend de l'axe de vibration selon lequel le matériau est excité **[TOUM 17]**

En effet, les résultats obtenus montrent qu'un même défaut soumis à une force de cisaillement ou de compression peut génèrer différentes signatures acoustiques dont l'origine est liée au mécanisme de vibration généré dans la zone endommagée tel que le clapping et/ou le stick-slip. Ces mêmes resultats montrent que le mécanisme de stick-slip n'a pas besoin de beaucoup d'énérgie pour être activé. C'est la raison pour laquelle on voit sa signature non linéaire plus facilement (**Fig4.16**) que le mécanisme de clapping où l'ouverture et la fermeture d'un défaut a besoin de déformation de plus grandes amplitudes **[SOLO 11].**



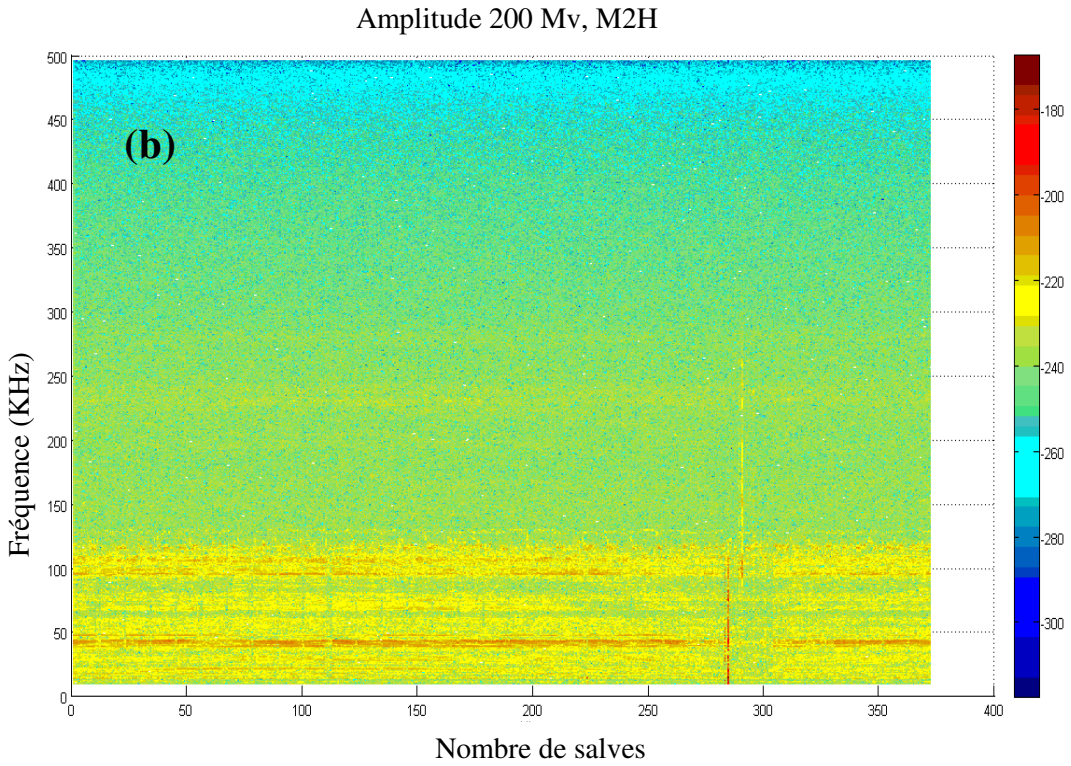
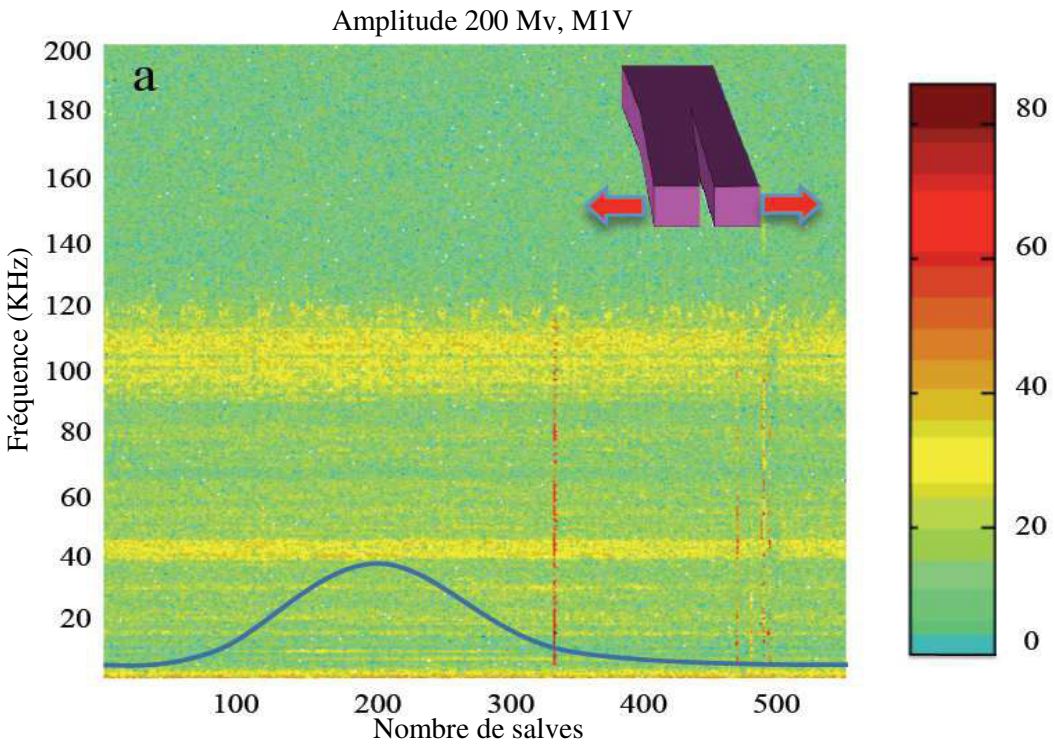


Figure 4.15 : Composantes fréquentielles des signaux de l'EA en fonction du nombre de salves pour le deuxieme modes de résonance dans les deux positions du matériau, a : M2V,b : M2H.



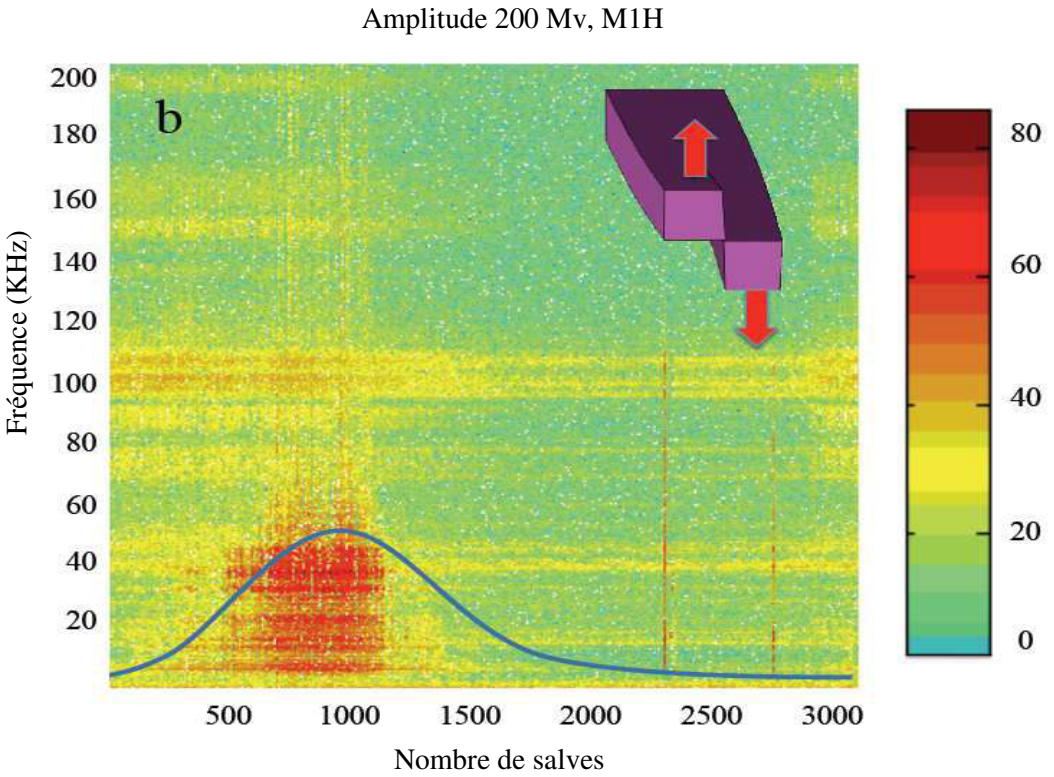


Figure 4.16 : Composantes fréquentielles du signaux de l'EA en fonction du nombre de salves pour les deux premiers modes de résonanace dans les deux positions du matériau, (a) : M1V, (b) : M1H.

4. 10. Conclusion

Le travail réalisé dans ce chapitre a pour but de vérifier l'anisotropie d'un défaut mésoscopique crée dans un béton base polymère avec la technique de l'EA récoltés au cours d'essais vibratoires en résonance non linéaire. Nous avons monté un dispositif expérimental permettant de déterminer les différents modes de résonance en flexion dans deux plans (XZ et XY) et de suivre le comportement du défaut à l'aide des mesures en EA avec deux transducteurs collés sur l'épaisseur et la surface de l'échantillon.

Ainsi, ces résultats expérimentaux montrent qu'un changement d'axe ou du plan de vibration favorise un mécanisme non linéaire plutôt qu'un autre. Ceci expliquerait, par exemple, la raison pour la quelle les temps de relaxation ne sont pas les mêmes lorsque le même défaut est excité selon différentes directions. Cependant, la compréhension des observations expérimentales nécessite des études plus approfondies. En effet, la présence des effets de mémoire liés aux mécanismes non linéaire susmentionnés (clapping, slip-stick, etc.) rend toute formulation analytique de la loi contrainte/déformation impossible.

L'alternative serait de développer une description statique multi-échelle du matériau microfissure qui serait basée sur le formalisme généralisé de Preisach-Mayergoyaz (PM-space). Cette approche prometteuse des éléments mésoscopiques (à l'échelle microscopique pour décrire le comportement des microfissures) aux observations macroscopique quelles soient en termes de temps de relaxation de composantes temps-fréquence des salves d'émission acoustique ou le décalage temporel de la coda des signaux ultrasonores multi-diffusés

Références bibliographiques

[ADJE 04] ADJEMIAN, F., EVESQUE, P., « Experimental study of stick-slip behavior », International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol 28, p:501-530, 2004.

[ANNE 08] ANNE, M., « Contrôle de santé des matériaux hétérogènes par émission acoustique et acoustique non linéaire : Discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante », thèse de doctorat, université du Maine,2008.

[ALBE 07] ALBERT, I., TEGZES, P., ALBERT, R., SAMPLE, J.G., BARABÀSI, A.-L., VICSEK, T., KAHNG, B., SCHIFFER, P., « Stick-slip fluctuations in granular drag », Physical Review E, Vol 64, 2007.

[AL HA 14] AL HAJ, O., « Apports de l'émission acoustique couplée à la thermogravimétrie pour l'étude de la corrosion à haute température des métaux et alliages » ; thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2014.

[BARR 74] BARREE, S; BENZEGGAGH, M. L., « on the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforces polypropylene», Comp. Sci. Technol, 52 (3), pp: 369-376, 1994.

[BEAT 83] BEATTIE, AG., "Acoustic emission, principles and instrumentation", Journal of acoustic emission, vol 2, pp:95-128. 1983.

[BENT 09] BENTAHAR, M., El Guerjouma,R., « Monitoring progressive damage in polymer based composite using nonlinear dynamics and acoustic emission », Journal of The Acoustical Society of America, Vol 125(1), pp: 39–44, 2009.

[BENT 05] BENTAHAR, M, " Acoustique non-linéaire : application à la caractérisation ultrasonore de l'endommagement des matériaux hétérogène et à la prédiction de la durée de vie », thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.

[BENZ 92] BENZEGGAGH, M.L; BARRE, S; ECHALIER, B; JACQUEMENT., « étude de l'endommagement de matériaux à fibres courtes et à matrice thermoplastique. », In AMAC Journées Nationales composites, 1992.

[BERB 10] BERBAOUI, R., « Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires à base polymère », thèse de doctorat, université du Maine, 2010.

[BERT 05] BERTHELOT J.M., ROBERT J.L.,"Damage evaluation of concrete test specimens related to failure analysis", Journal of Engineering Mechanics, vol 116(3), pp: 587-604, 1987.

[BERT 99] BERTHELOT, J.M., « Matériaux composites-Comportement mécanique et analyse des structures », 3éme édition. Paris Editions Tech. & Doc, 1999.

[BERT 92] BERTHELOT, J. M., « Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures », Paris, Masson, p: 615, 1992.

[CARM 09] CARMONA, V., « étude de l'endommagement de matériaux composites par tomographie X et Emission Acoustique », thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2004.

[BOCQ 05] BOCQUET, L., «Approche physique du frottement », Texte de la 597éme Conférence de l'Université de tous les savoirs, Juillet 2005.

[CEYS 96] CEYSSON, O ; SALVIA, M ; VINCENT, L., « Damage mechanisms characterisation of carbon fibre/epoxy composite laminates by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis », Scripta Materialia, vol 34(8), pp:1273-1280, 1996.

[CHEN 92] CHEN, O ; KARANDIKAR, P ; TAKEDA, N ; KISHI, T., « Acoustic emission characterization of a glass-matrix composite », Nondestructive Testing and Evaluation, vol 8-9, pp:869-878, 1992.

[DEGR 95] DE GROOT, P.J ; WIJNEN, P.A.M ; JANSSEN R.B.F., « Real time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites », Composites Science and Technology, vol 55, pp:405-12, 1995.

[DIOU 05] DIOUF, B., « Analyse statistique de l'évolution de l'endommagement dans des matériaux hétérogènes », thèse de doctorat, université du Maine, 2005.

[ELGU 01] El Guerjouma, R ; Baboux, J.C ; Ducret, D ; Godin, N ; Guy, P ; Huguet, S ; Jayet, Y ; Monnier, T., « Nondestructive evaluation of damage and failure of

fiber reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission »; Advanced engineering materials, vol 3, pp:601-608, 2001.

[FITZ 89] EITZEN, D.G; WADLEY, H.N.G., "Acoustic emission: establishing the fundamentals." Journal of Research of the National Bureau of Standards, vol.89 (1), pp:75-100, 1984.

[GODI 11] GODIN, N ; R'Mili, M ; Reynaud, P ; Lamon, J ; Fantozzi, G., «Emission acoustique et endommagement des composites : Intérêts et limites des techniques de reconnaissance de Forme » ; Comptes Rendus des JNC 17 – Poitiers, 2011.

[HAMI 98] HAMILTON, M. F., BLACKSTOCK, D. T., « Nonlinear Acoustics », Academic Press, San Diego, 1998.

[HAUP 12] HAUPERT, S ; RIVIERS, J ; RENAUD, G ; LAUGIER, P., « Détection du micro-endommagement osseux et de l'ostéo-intégration d'implant par acoustique non-linéaire » ; thèse de doctorat, université Pierre et Marie Curie, ,2012.

[HUGU 02] HUGUET, S., « application de classificateurs aux données de l'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans des composites à matrice polymère », thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon 2002.

[IDJI 14] IDJIMARENE, S., « power laws behavior and nonlinearity mechanisms in mesoscopic elastic materials », thèse de doctorat en cotutelle, université du Maine et université Franco Italienne, 2014.

[KAIS 50] KAISER, J., « Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch » ; Thèse de doctorat, Technische Universität München, 1950.

[KIM 97] KIM, S.T, Lee, Y.T., « Characteristics of damage and fracture process of carbon fiber reinforced plastic under loading-unloading test by using AE method », Materials Science and Engineering, vol.A234-236, pp.322-326, 1997.

[KOTS 99] KOTSIKOS, G ; Evans, J. T ; Gibson, A. G ; Hale, J., « Use of acoustic emission to characterize corrosion fatigue damage accumulation in glass fiber

reinforced polyester laminates », Polymer Composites, vol.20(5), pp:689-696, 1999.

[KRAJ 00] KRAJCINOVIC, D., "Damage mechanics: accomplishments, trends and needs", International Journal of Solids and Structures, vol 37, pp:267–277, 2000.

[LHEM 01] LHEMERY, A., « Cours du DEA d'Acoustique Physique », université Paris VII, 2001.

[NECH 04] NECHADE, H., «Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante », thèse de doctorat, institut national des sciences appliquees de Lyon, 2004.

[NOND 05] Nondestructive Testing Handbook., « Acoustic Emission Testing» ; 3rd Edition, Vol 6, American Society for Nondestructive Testing, 2005.

[OHTS 01] OHTSU, M ; WATANABE, H., « Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission », Construction and Building Materials, vol 15, p: 217-224, 2001.

[OSTR 01] OSTOVOSKY, l. A ; JOHNSON, P., «Dynamic nonlinaer elasticity in geomaterials», la rivista del nuvo cimento, 24, pp :1-46, 2001.

[PORT 23] PORTEVIN, A ; LE CHATELIER, F., « Sur un phénomène observé lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation », Note de l'Académie des Sciences, pp: 507-510, 1923.

[ROUS 05] ROUSSEL L. E., "Experimental investigation of Stick-Slip behavior in granular materials", Thesis for the degree of Master of Science in Civil Engineering, 2005.

[ROYE 00] ROYER. D., « Acoustique, propagation dans un fluide », Techniques de l'Ingénieur, traité Sciences Fondamentales, AF 3812, pp: 1–16, 2000.

[SOLO 11] SOLODOV, I ; DÖRING, D ; BUSSE, G., « New Opportunities for NDT Using Non-Linear Interaction of Elastic Waves with Defects », Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Vol 57, N 3, pp: 169-182, 2011.

[SIBI 11] SIBIL, A., « comportement thermomécanique et endommagement nouveau réfractaires verriers à très haute teneur en zircone : investigation des mécanismes de fissuration par EBSD et Emission Acoustique », thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2011.

[THUM 04] THUMMEN, F., « Propriétés mécaniques et durée de vie de bétons réfractaires », thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2004.

[TOUM 17] TOUMI, S; MECHRI, C; BENTAHAR, M; BOUBENIDER, F; El GUERJOUMA, R., « Characterization of Microcracking in Polymer Concrete Using Multiple Scattered Waves Under Steady-State Vibration Conditions », research in nondestructive evaluation, Vol 28, N 1, pp :18–27, 2017,

[TRUE 69] TRUELL, R., Elbaum, C., Univ, B., Chick, B., « Ultrasonic Methods in Solid State Physics », Academic Press, Vol 7, London, 1969.

[VAN 92] VAN MIER, J.G.M., « Micromechanical Analysis of Fracture of Concrete », International Journal of Damage Mechanics, Vol 1(4) , pp:435-454, 1992.

Conclusion générale

Le travail effectué dans cette thèse en cotutelle avait pour objectif de développer une technique de caractérisation non linéaire ultrasonore dans le but de détecter un défaut mésoscopique dans un milieu hétérogène. Le matériau sujet de ce travail est un béton polymère pris aux états sain et microfissuré. L'intérêt d'utiliser ce matériau est lié à sa forte rigidité dont la valeur est comparable à celle du béton cimentaire associé à une très faible sensibilité aux conditions environnementales telles que l'humidité. Ainsi, le béton polymère est caractérisé dans un premier temps avec des techniques globales mettant en jeu les modes propres des différents échantillons étudiés. Cela s'est effectué dans le cadre des mesures acoustiques non linéaires où l'influence des niveaux d'excitation sur les propriétés viscoélastiques est suivie aux états sain et endommagé. Les premiers essais ont permis de mettre en lumière le comportement du matériau moyennant des mesures en résonance dites de dynamique rapide. Ces essais en dynamique rapide sont capables de révéler l'existence d'un endommagement au sein d'un matériau microfissuré. Il est aussi possible de voir que selon le mode considéré et l'amplitude d'excitation, la distorsion de la courbe de résonance peut être plus ou moins importante. En effet, la prise en compte des distorsions peut être effectuée à l'aide de la fréquence de résonance. Par ailleurs, nous avons également effectué des essais en dynamique lente. Ces derniers sont caractérisés par un temps de conditionnement où le matériau est tout d'abord excité à fort niveau d'excitation moyennant des déformations dynamiques de l'ordre de 10^{-5}. Suite à ce conditionnement, la relaxation du béton est suivie à l'aide d'un très faible niveau d'excitation avec une onde « sonde » générant des déformations dynamiques de l'ordre de 10^{-8}. Comme attendu, le matériau s'adoucit en réponse au fort niveau d'excitation, ensuite, la fréquence recouvre lentement sa valeur initiale (avant conditionnement) après l'enlèvement de cette forte perturbation. Ces mesures ont permis d'identifier les niveaux d'excitation pour lesquels les effets conditionnement/relaxation peuvent apparaître de façon à pouvoir changer de façon continue les propriétés viscoélastiques du béton polymère.

Suite à ces résultats mettant en jeu des ondes stationnaires, nous nous étions intéressés à l'étude des ondes élastiques transitoires générées dans le béton polymère. En particulier, l'intérêt s'est porté sur la diffusion multiple des ondes ultrasonores où il a été surtout en question d'étudier la coda des ondes ayant parcouru des distances bien supérieures à celle d'un trajet direct « émetteur/récepteur ». La CWI s'est révélée efficace pour étudier les effets des paramètres environnementaux (pression, température, vibrations, etc.) sur les propriétés

élastiques et viscoélastiques des matériaux complexes. En effet, l'intérêt de cette technique est de pouvoir sonder le matériau dans des endroits pas nécessairement rayonnés par l'onde directe. Les essais effectués à l'aide de la coda, seule, n'ont pas permis de détecter la présence de microfissures au sein de la structure étudiée. Par ailleurs, nous avons effectué des mesures de coda en présence d'une résonance dite linéaire (pas de changements dans le module d'élasticité du béton polymère), cela a eu pour avantage d'attribuer les changements observés sur les signaux de coda au comportement des fissures dont l'excitation locale n'a pas d'effet sur le comportement global du matériau. Ainsi, la génération d'une impulsion ultrasonore en l'absence et en la présence d'une vibration linéaire a permis de vérifier l'existence d'une variation dans les signaux coda ultrasonores et ce même pour des niveaux de vibration de très faible amplitude. En effet, l'outil que nous utilisons pour investiguer la présence du défaut est très sensible aux paramètres expérimentaux et environnementaux notamment, à la température et à la relaxation de l'échantillon. Par ailleurs, à un instant donné, la CWI détermine le coefficient de corrélation en supposant une fenêtre temporelle de courte durée $2T$ centrée à l'instant considéré t_c. A cela s'ajoute le fait que les signaux coda enregistrés se sont révélés très sensibles aux plans selon lesquels les résonances sont générées. En effet, les essais ont mis en évidence l'influence de l'anisotropie de l'endommagement sur la sensibilité de la coda. Le travail de cette thèse a montré que la sensibilité augmente (ou diminue) en fonction de la position du capteur ultrasonore le long du matériau. Ainsi, il a été possible de détecter et de localiser les endommagements crées au sein du béton polymère. Par la suite, le système de balayage manuel a été remplacé par un système automatisé basé sur la propagation d'ondes ultrasonores. Ce travail a montré qu'il est possible d'utiliser la coda issue d'une onde ultrasonore aérienne en présence d'une résonance linéaire et ce pour imager les zones endommagées dans un matériau de structure opaque qui ne présente aucun signe d'endommagement extérieur.

Dans le but d'étudier l'anisotropie de l'endommagement dans le béton polymère, nous avons utilisé les données de l'EA récoltées au cours des essais acoustiques en résonance non linéaire pour les deux plans considérés. En effet, ces essais sont motivés par la sensibilité des méthodes en résonance aux plans d'excitation qui dans le cas de fissures orientées génèrent différents mécanismes non linéaires. L'existence d'une différence entre les signaux enregistrés au cours des mesures de l'EA montre la production des différents micro-mécanismes dont la présence et/ou l'absence ont un impact important sur l'interaction entre l'onde ultrasonore et l'endommagement.

Perspectives

A l'avenir nous projetons :

- ✓ Etudier la signature de l'EA reliée aux micro-mécanismes quand le matériau endommagé est mis à la fois à la résonance linéaire et non linéaire. Ceci en étudiant l'activité de l'EA au cours du conditionnement et de la relaxation pour différents types de matériaux.
- ✓ Appliquer la même technique (CWI) sur d'autres matériaux complexes, tel que un stratifié composite à fibres.
- ✓ Envisager une série de mesures de coda dans le but d'étudier ses performances à détecter la présence de différents endommagements dans des matériaux complexes.