

UNIVERSITÉ DE LIMOGES
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET INGÉNIERIE EN MATÉRIAUX
MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE ET AÉRONAUTIQUE
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2016

Thèse N° X

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES

Discipline : Génie Civil

présentée et soutenue par

Frédéric LAMY

le 13 juillet 2016

**Analyse du Processus de Fissuration dans le Bois
sous Sollicitations Mécanique et Climatique :
Apports de l'Émission Acoustique**

Thèse dirigée par : Frédéric DUBOIS

Codirigée par : Nicolas ANGELLIER et Mokhfi TAKARLI

Jury composé de :

Joseph GRIL	Directeur de Recherche, CNRS/Montpellier	Président
Stéphane MOREL	Professeur, Université Bordeaux 1	Rapporteur
Nathalie GODIN	Maîtresse de Conférences, HDR, INSA Lyon	Rapporteur
Salim CHAKI	Maître de Conférences, HDR, École Nationale des Mines de Douai	Examineur
Sylvie YOTTE	Professeur, Université de Limoges	Examineur
Nicolas ANGELLIER	Maître de Conférences, Université de Limoges	Encadrant de thèse
Mokhfi TAKARLI	Maître de Conférences, Université de Limoges	Encadrant de thèse
Frédéric DUBOIS	Professeur, Université de Limoges	Directeur de thèse

A Christelle, Émilie et Clément.

Remerciements

Ce mémoire de thèse rend compte des travaux menés durant quatre ans au sein du Groupement d'Étude des Matériaux Hétérogènes (GEMH) de l'Université de Limoges sur le site d'Egletons. Je tiens à exprimer ici mes plus sincères remerciements à ceux qui m'ont permis de réaliser ces travaux et qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

Je souhaite remercier mon directeur de thèse, M. Frédéric DUBOIS, Professeur des Universités et Directeur du département de Génie Civil de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université de Limoges pour m'avoir permis de réaliser ce projet. Je lui suis également reconnaissant pour le temps qu'il m'a accordé, sa franchise et sa sympathie.

J'adresse mes remerciements à mes co-encadrants de thèse, M. Nicolas ANGELLIER et M. Mokhfi TAKARLI, Maitres de conférences au sein du GEMH, pour m'avoir suivi et soutenu dans la réalisation de ce défi, pour leur attention sur mes travaux, pour leurs conseils avisés et leur écoute qui ont, pour une bonne part, contribué à la réussite de cette thèse.

Je souhaite remercier Mme Nathalie GODIN et M. Stéphane MOREL pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à M. Joseph GRIL, M. Salim CHAKI et Mme Sylvie YOTTE pour avoir accepté de participer à ce jury.

Je souhaite adresser ma gratitude à M. Jérôme DOPEUX pour ses conseils et sa patience lorsqu'il s'agissait de m'expliquer pour une énième fois le fonctionnement, les spécificités et les limitations des appareils que j'utilisais.

Un grand merci à tous mes collègues du site universitaire de Génie Civil d'Egletons qui ont eu à supporter mes sauts d'humeur, mon humour (qui a dit douteux?), mon enthousiasme et mes doutes durant cette période et qui, par leurs remarques et suggestions, ont été, parfois sans le savoir, à l'origine de solutions dans mes travaux de thèses. Avez-vous dit sérendipité M. SARCIAT ?

Enfin, je tiens à rendre hommage à ma famille. Que Christelle, Emilie et Clément soient remerciés pour leur patience pendant ces quatre années durant lesquelles je n'ai pas toujours été disponible et attentif comme je l'aurais dû.

« Principe d'Archimède (Archimedean principle) :

Principe général s'intéressant au comportement des corps plongés dans l'eau, inventé par un savant grec amoureux de l'hygiène et qui a depuis fait l'objet d'un grand nombre de variantes :

- *tout corps plongé dans l'eau en ressort mouillé,*
- *tout corps plongé dans l'eau et qui ne reparaît pas au bout d'un certain temps peut être considéré comme perdu,*
- *tout corps plongé dans l'eau finit, tôt ou tard par avouer,*
- *tout corps qui reste trop longtemps plongé dans l'eau et refuse d'en sortir finit tôt ou tard par devenir imbuvable.*

C'est cette dernière définition qui est la plus pertinente. Il est en effet essentiel de toujours se souvenir qu'il faut mettre assez souvent la tête hors de l'eau pour ne pas trop se prendre au sérieux. »

D'après « Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement »
Coordonnateur B. CHOCAT - ISBN 2-7430-0126-7

Table des matières

Introduction générale	6
1 Microstructure du bois et comportement à la fissuration	11
1 Introduction	13
2 Caractéristiques du bois, un matériau composite naturel	13
2.1 La structure multi échelle du bois	13
2.2 Caractéristiques mécaniques et actions climatiques	20
3 Mécanique de la rupture dans le bois et outils d'investigation associés	29
3.1 Théorie et modélisation	29
3.2 Taux de restitution d'énergie lors d'un essai mécanique en mode I	31
3.3 Éprouvettes et types de chargements	35
3.4 Matériels d'investigation	39
4 Usage de l'émission acoustique : les matériaux bois et composites	46
4.1 Application au matériau bois	46
4.2 Application aux matériaux composites	50
4.3 Application aux fibres naturelles	52
5 L'émission acoustique et ses limites	54
5.1 Vitesse de propagation des ondes	54
5.2 Analyse multivariable	56
6 Conclusion	64
2 Protocole expérimental, acquisitions et corrections	65
1 Introduction	67
2 Matériau et préparation des éprouvettes pour l'essai de fissuration	68
2.1 Choix du matériau de l'étude	68
2.2 Confection des éprouvettes	70
3 Dispositif de chargement mécanique et suivi de fissuration par imagerie	74
3.1 Dispositif de chargement mécanique	74
3.2 Suivi de fissuration par imagerie	75
3.3 Synchronisation des données issues des différents systèmes	82
4 Dispositif d'émission acoustique	85
4.1 Système de détection et d'enregistrement de l'activité acoustique	85
4.2 Position et nombre de capteurs	88
4.3 Courbes de correction de la localisation et de l'amplitude	110
5 Conclusion	115

3	Analyse temporelle et spatiale	116
1	Introduction	118
2	Traitement statistique des données	118
2.1	Jeu de données et notation matricielle	119
2.2	Représentations graphiques	120
2.3	Application pour l'analyse des données géométriques	121
3	Analyse temporelle des données acoustiques	124
3.1	Précisions sur le protocole expérimental : choix des essais représentatifs ou particuliers	124
3.2	Données mécaniques et suivi de fissure par imagerie	126
3.3	Activité acoustique	133
3.4	Etude énergétique	138
4	Analyse spatiale des données acoustiques	142
4.1	Activité acoustique du point de vue des évènements	142
4.2	Correction de la position et de l'amplitude	144
4.3	Outils acoustiques de détection de la pointe de fissure	146
4.4	Calcul du taux de restitution d'énergie moyen G_c par Émission Acoustique (EA)	154
5	Détection de la pointe de fissure lors d'un essai en fluage sur une éprouvette à inertie variable	156
5.1	Conditions expérimentales	156
5.2	Courbes d'étalonnage	158
5.3	Cinétique de fissuration	160
6	Conclusion	164
4	Identification des mécanismes de fissuration	165
1	Introduction	167
2	Traitement avancé des données acoustiques	167
2.1	Principe de classification	167
2.2	Filtrage des données des essais sur DCB	170
2.3	Classification des données des essais sur DCB	176
3	Méthodes d'identifications comparées des mécanismes de fissuration	178
3.1	Observation de plans de fissuration par imagerie	178
3.2	Essais à modes de ruines choisis	181
4	Identification des mécanismes de fissuration pour les essais DCB	190
4.1	Identification de chaque famille	190
4.2	Analyse statistique	194
5	Conclusion	196
	Conclusion générale et perspectives	198
A	Emission acoustique - Rappels généraux	202
1	Définitions normalisées	202
2	Bref historique	202
3	Un outil pour le Contrôle Non Destructif	203
4	Terminologies / Nomenclature	205

5	Traitement du signal	208
B	Émission acoustique - Le matériel	209
1	Les capteurs	209
2	Le montage et le couplage des capteurs	211
3	Les préamplificateurs et les câbles coaxiaux	216
4	Calibration des capteurs	216
C	Emission acoustique - Les réglages	218
1	Paramètres d'analyse des signaux acoustiques	218
2	Détection des sources acoustiques	223
D	Résultats des éprouvettes	233
1	Eprouvette S1	234
2	Eprouvette S2	235
3	Eprouvette S3	236
4	Eprouvette S4	237
5	Eprouvette S5	238
6	Eprouvette S6	239
7	Eprouvette S7	240
8	Eprouvette S8	241
9	Eprouvette S9	242
10	Eprouvette S10	243
11	Eprouvette S11	244
12	Eprouvette S12	245
13	Eprouvette H1	246
14	Eprouvette H2	247
15	Eprouvette H3	248
16	Eprouvette H4	249
17	Eprouvette H5	250

Liste des principaux acronymes et notations

$(\vec{L}, \vec{R}, \vec{T})$	Directions principales d'orthotropie
G_C	Taux de restitution d'énergie
ω	Taux d'humidité
β	Coefficient de retrait gonflement
$X_{EA-linéaire}$	Position calculée d'un évènement entre deux capteurs
$X_{réel}$	Position réelle d'un évènement tenant compte de la déportation des capteurs par rapport à la ligne de fissuration
α	Angle entre le sens longitudinal des fibres et le sens de propagation des ondes ultra sonores
V_L, V_0	Vitesse de ondes ultrasonores dans le sens longitudinal
V_R, V_{90}	Vitesse de ondes ultrasonores dans le sens radial
V_α	Vitesse de ondes ultrasonores faisant un angle α par rapport au sens des fibres selon le plan radial
EA	Emission Acoustique
CND	Contrôle Non Destructif
AST	Auto Sensor Test
PDT	Pic Definition Time
HDT	Hit Definition Time
HLT	Hit Lock-out Time
ACP	Analyse par Composantes Principales
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
MEB	Microscope Electronique à Balayage
PSF	Point de Saturation des Fibres
CT	Compact Tension
SENB	Single Edge Notched Bending
DCB	Double Cantilever Beam
mTDCB	modified Tapered Double Cantilever Beam

Introduction générale

Dans un contexte environnemental bénéfique à l'utilisation, dans les structures du Génie Civil, des matériaux à faible consommation d'énergie grise, le matériau bois présente des avantages considérables allant jusqu'à être considéré comme un puits de carbone. Si le matériau bois a toujours fait partie de la famille des matériaux de construction, aujourd'hui il joue le plus souvent les seconds rôles. En effet, l'intérêt de ce matériau, comme acteur principal, est freiné par sa complexité à le maîtriser (orthotropie matérielle, viscoélasticité, thermo et hygro sensibilité, diffusion hydrique, etc.), par les problématiques liées à la durabilité dans des environnements humides (humidité interne au-delà de 20%) et par sa fissurabilité dans des ambiances sèches (bâtiments industriels en période de chauffage) et variables. Pourtant, dans le passé, avant l'invention du béton et la maîtrise de l'acier de construction, le bois et les maçonneries en pierres et en briques étaient les systèmes constructifs les plus répandus.

Si des traces de l'utilisation du bois remontent à plus de 20 000 ans, les plus vieux vestiges que l'on puisse dater, en tant que matériau de structure, permettent de remonter à 5 000 ans avant JC. Il s'agit des restes de quatre puits, situés dans la région de Leipzig en Allemagne. La plus vieille maison connue à ce jour (et encore en état) est située en Suisse - à Schwyz très exactement. Elle aurait été construite en 1287. Les plus anciennes constructions recensées à ce jour se trouvent au Japon. Il s'agit de constructions Bouddhistes dont la construction aurait débuté au début du VI^{ème} siècle après JC (法隆寺 « Temple de la Loi Florissante » près de Nara), figure 1.



(a) 4 puits dans la région de Leipzig, Allemagne



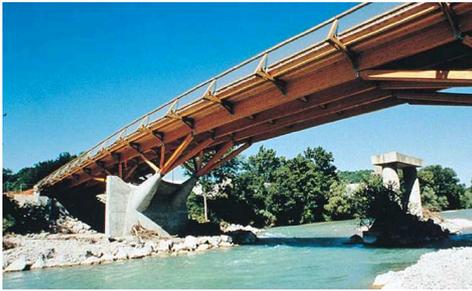
(b) Maison de plus de 7 siècles à Schwyz, Suisse



(c) Temple bouddhiste de la Loi florissante, près de Nara, Japon

FIGURE 1: Le bois, un matériau de construction ancestral

L'histoire récente a cependant connu des conceptions hors norme utilisant le bois comme matériau principal de structure. Dans le domaine des ouvrages d'art, des maîtres d'ouvrages visionnaires ont choisi le bois comme matériau structurant, figure 2.



(a) Pont routier sur la Drôme à Crest (26)



(b) Pont routier des Fayettees à Valbonnais (38)



(c) Pont routier de Merle (19)



(d) Passage supérieur du Chavanon (19)

FIGURE 2: Ouvrages d'art en bois en France

Dans le domaine des bâtiments de grande hauteur, le bois fait partie des solutions constructives, figure 3.



(a) Wenlock road, Londres, Grande Bretagne



(b) Centre commercial, Villesse, Italie



(c) Centre équestre, linsengericht, Allemagne

FIGURE 3: Buildings et bâtiments en bois

Dans des rapports techniques portant sur l'emploi du bois comme matériau de construction (Fleury and Chiche, 2006) et (Aubagnac et al., 2008), il apparaît que celui-ci peut présenter plusieurs types de pathologies. Si certaines pathologies sont d'ordre esthétique (tags, grisaillement du bois, etc.), d'autres touchent (figure 4) à l'intégrité mécanique de la structure et peuvent nécessiter une action de remplacement, de traitement ou de renforcement.



(a) Rupture d'assemblage



(b) Perte de section résistante

FIGURE 4: Quelques exemples de ruptures d'après (Aubagnac et al., 2008)

Ces actions doivent être intégrées dans une politique de maintenance associée à des stratégies d'inspection et de monitoring adaptées aux risques liés à l'utilisation du matériau bois dans son environnement climatique. Dans ce contexte, les risques de fissuration et/ou d'attaques biologiques ou les déformées à long termes sont plus ou moins corrélées au chargement mécanique mais également au chargement hydrique. Les inspections détaillées de ces ouvrages se focalisent aujourd'hui sur deux points critiques, à savoir, l'état hydrique des éléments structuraux et la détection de fissures critiques.

Dans ce dernier cas, suite à des expériences enrichissantes passées, le Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes et son département Génie Civil et Durabilité met en place des stratégies non destructives afin d'accroître le nombre d'outils de diagnostic et de monitoring d'ouvrage. Sur le plan de la fissuration des éléments structuraux, la figure 5 met en évidence deux cas de fissuration que le gestionnaire d'ouvrage doit suivre et maîtriser durant la vie des ouvrages, à savoir une fissuration de surface et massive dans les parties courantes ou au droit des assemblages.



(a) Fissuration en partie courante

(b) Fissuration au droit d'un assemblages

FIGURE 5: Fissuration des éléments structuraux

Ce challenge demande d'organiser la surveillance des ouvrages selon deux étapes. La première consiste à mettre en place un outil de surveillance intégrant des seuils critiques (longueurs critiques de fissures par exemple) pour programmer des inspections. La seconde consiste à réaliser l'inspection et à évaluer les risques liés à l'état de fissuration suivie d'une phase de réparation, de renforcement ou de remplacement de l'élément fissuré.

Pour répondre à cet enjeu, la détection de fissure, la prédiction et le suivi de son évolution ainsi que la mise en place d'alertes critiques font l'objet de toutes les attentions. Cette approche par seuil d'alerte n'est pas nouvelle. Dans la surveillance des ouvrages d'art en béton précontraint, des stratégies employant l'émission acoustique permettent de détecter la rupture de torons dans les gaines de précontrainte et d'émettre des signaux d'alerte lorsque qu'un nombre critique de ruptures est atteint. Ce principe de surveillance a été à l'origine de ce travail de thèse en ajoutant à l'émission acoustique les aspects climatiques qui sont généralement les moteurs d'amorçage et de propagation de fissures.

Pour mettre en place cette stratégie de surveillance, l'ensemble de ce travail de thèse a été consacré à l'étude de détection de la fissuration dans le bois avec pour objectif de trouver un ou plusieurs indicateurs de propagation ou d'évolution. Nos échantillons ont été soumis à des sollicitations mécanique et climatique. Le bois, matériau hétérogène par nature, présente des similitudes avec les matériaux composites. Nous nous proposons d'étudier ce matériau naturel en profitant des divers progrès qui ont été réalisés sur les matériaux industriels. Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé des éprouvettes en Douglas que nous avons conditionnées dans deux ambiances différentes ($T 20 [^{\circ}\text{C}] - \text{Hr } 40 [\%]$ et $T 30 [^{\circ}\text{C}] - \text{Hr } 90 [\%]$). Grâce à ces conditions nous allons amener nos échantillons à des teneurs en eau proches de celles que l'on peut rencontrer dans la construction. Ces échantillons ont été sollicités en traction (mode I). Les essais ont été suivis par un système d'imagerie qui nous a fourni l'évolution de la pointe de fissure sur les faces et un système d'EA qui a enregistré toute l'activité acoustique durant les essais. Les

données récupérées ont été analysées grâce à des méthodes statistiques non supervisées. Les résultats obtenus ont été confrontés à une analyse des faciès de rupture au Microscope Électronique à Balayage (MEB).

Dans la première partie de ce manuscrit, nous présentons le matériau bois en abordant ses similitudes ainsi que ses différences avec les matériaux composites. De cette façon nous verrons de quelle façon nous pouvons profiter de l'EA pour l'étudier. Sont aussi abordés les avancées déjà réalisées sur le bois ainsi que les verrous scientifiques et techniques.

Nous détaillons, dans une deuxième partie, le protocole expérimental mis en œuvre dans le cadre de cette thèse. Y sont présentés tous les choix techniques qui ont été faits pour recueillir un maximum d'informations, les choix technologiques qui ont dû tenir compte de l'orthotropie du matériau, de son caractère dispersif ainsi que des limitations induites par les matériels disponibles au laboratoire.

Dans une troisième partie, sont présentés les résultats expérimentaux obtenus à l'aide du système d'EA. Principalement, nous mettons en évidence la présence d'une corrélation entre l'activité acoustique, l'énergie acoustique enregistrée et l'énergie mécanique dissipée. Grâce à la localisation des événements acoustiques, nous parvenons à déterminer l'évolution d'un pic d'activité acoustique qui est comparable à celle de la pointe de fissure obtenue par analyse d'images. Enfin, ces méthodes sont appliquées à un essai de fluage pour étudier leur mise en œuvre dans le cas d'un essai de longue durée.

Suite aux conclusions de la partie précédente et de la nécessité de filtrer les données, nous présentons les moyens mis en œuvre pour identifier différents mécanismes ayant eu lieu durant les essais. Après un travail de filtration des données obtenues sur des essais à mode de ruine choisi (traction, flexion et cisaillement) et grâce à une utilisation conjointe des outils statistiques, de l'imagerie électronique (MEB) et de l'analyse des formes d'ondes, nous parvenons à identifier quatre familles d'événements présents lors des essais. Une étude de clichés pris au MEB a confirmé une multitude de mécanismes présents sur les plans de fissuration des éprouvettes.

Enfin, dans les conclusions finales, nous revenons sur les résultats obtenus, sur leurs limitations d'emploi pour passer du laboratoire à de la surveillance in situ et sur les perspectives de développements possibles.

Chapitre 1

Microstructure du bois et comportement à la fissuration

Sommaire

1	Introduction	13
2	Caractéristiques du bois, un matériau composite naturel	13
2.1	La structure multi échelle du bois	13
2.2	Caractéristiques mécaniques et actions climatiques	20
3	Mécanique de la rupture dans le bois et outils d'investigation associés	29
3.1	Théorie et modélisation	29
3.2	Taux de restitution d'énergie lors d'un essai mécanique en mode I	31
3.3	Éprouvettes et types de chargements	35
3.4	Matériels d'investigation	39
4	Usage de l'émission acoustique : les matériaux bois et composites	46
4.1	Application au matériau bois	46
4.2	Application aux matériaux composites	50
4.3	Application aux fibres naturelles	52
5	L'émission acoustique et ses limites	54
5.1	Vitesse de propagation des ondes	54
5.2	Analyse multivariable	56
6	Conclusion	64

1 Introduction

Ce chapitre rassemble les éléments bibliographiques nécessaires à ce travail de thèse. La première partie de ce chapitre porte tout d'abord sur une présentation du bois à différentes échelles et sur les effets de la température et de l'humidité sur les caractéristiques mécaniques des constituants du bois.

La deuxième partie est consacrée à une présentation rapide de la mécanique linéaire de la rupture et à son application au bois. Y sont relatés les différents types d'éprouvettes et types d'essais de fissuration réalisés en laboratoire ainsi que les matériels d'investigation couramment utilisés.

La troisième partie de ce chapitre est consacrée à une technique d'investigation : l'Émission Acoustique (EA). Un tour d'horizon est fait en présentant ses principales applications au sein du bois, des matériaux composites et des matériaux composites à base de fibres naturelles.

Enfin, l'emploi de l'Émission Acoustique est abordé. Cela passe par la détermination d'une vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans un milieu orthotrope et par la nécessité d'extraire des données en vue d'une analyse statistique. Les jeux de données étant volumineux et complets, les paramètres qui aideront à la classification des données et donc à l'identification de la signature acoustique des différentes sources d'endommagement doivent être sélectionnés avec soin.

2 Caractéristiques du bois, un matériau composite naturel

2.1 La structure multi échelle du bois

Le bois de l'arbre

Les arbres sont des végétaux qui, dans la compétition pour capter un maximum de lumière afin de réaliser la photosynthèse, se sont développés en hauteur. Une structure anatomique particulière a été mise en œuvre pour leur permettre de résister au vent et à la pesanteur.

La vitesse de croissance des arbres est dépendante des conditions climatiques. Hormis dans les régions à climat tropical où les conditions de croissance des végétaux sont optimales toute l'année, la croissance des arbres est totalement arrêtée pendant l'hiver.

Dans chaque cerne de croissance, on peut distinguer une zone de bois de printemps, et une zone de bois d'été (figure 1.1).

Les « fibres » de bois sont des sortes de tubes dont les parois sont plus fines et les vides intérieurs plus grands au printemps qu'en été. Ceci s'explique par le fait qu'au printemps il y a une très forte demande en eau pour la régénération des feuilles ou des aiguilles. Le bois de printemps assure essentiellement une fonction de conduction de la sève, alors que le bois d'été remplit le rôle de soutien mécanique.

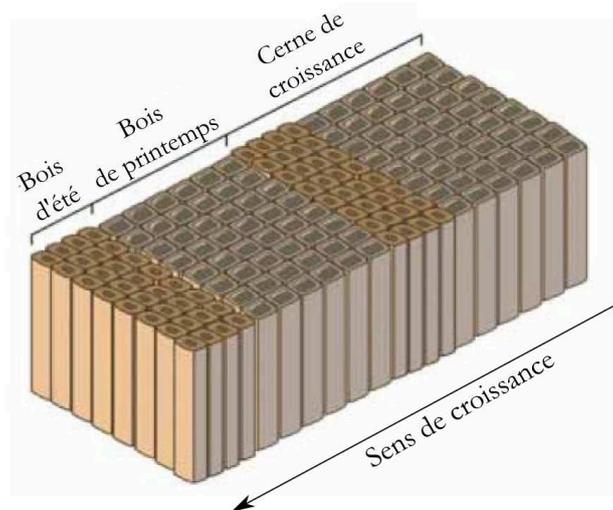


FIGURE 1.1: Différenciation anatomique entre le bois de printemps et le bois d'été

La croissance d'un arbre se fait par son extrémité supérieure et non par sa base (Charcosset, 2012). On distingue deux sortes de croissance :

- . La croissance en hauteur, ou croissance axiale.
- . La croissance diamétrale du tronc (qui est une combinaison d'une croissance radiale et tangentielle).

Ces croissances sont toutes réalisées par des tissus différents. Les cellules qui forment le bois assurent une fonction mécanique et de conduction des fluides :

- . Ascension de l'eau chargée en minéraux des racines jusqu'aux « usines à photosynthèse », feuilles ou aiguilles.
- . Descente de la sève élaborée jusqu'aux zones de formation du bois.

La zone de formation du bois, où se créent les nouvelles cellules, est appelée le cambium (figure 1.2). C'est une couche très fine située entre le liber, zone de descente de la sève, et l'aubier qui assure l'ascension de l'eau. Les cellules vivantes du bois sont principalement dans le cambium. Quelques unes se trouvent aussi dans le liber et l'aubier.

L'aubier, au bout de quelques années, se transforme chimiquement et n'assure plus qu'une fonction mécanique de soutien de l'arbre. Cette partie, plus centrale, est appelée duramen. Suivant les essences, l'aubier ne se distingue pas toujours du duramen. L'écorce a une fonction protectrice du cambium.

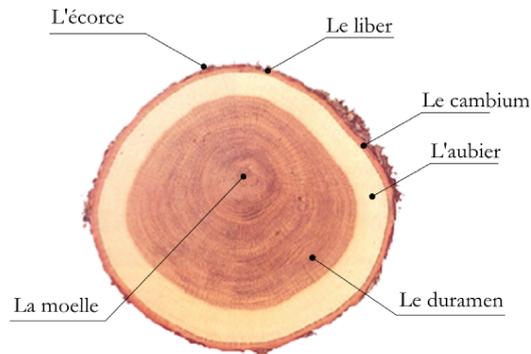


FIGURE 1.2: Coupe transversale d'un chêne (source : CNDB)

Une structure multi échelle

Le bois, comme beaucoup d'autres matériaux naturels, possède une structure multi-échelle. Une des particularités du bois est de posséder une anisotropie (orthotropie) qui est visible à différents niveaux (figure 1.3).

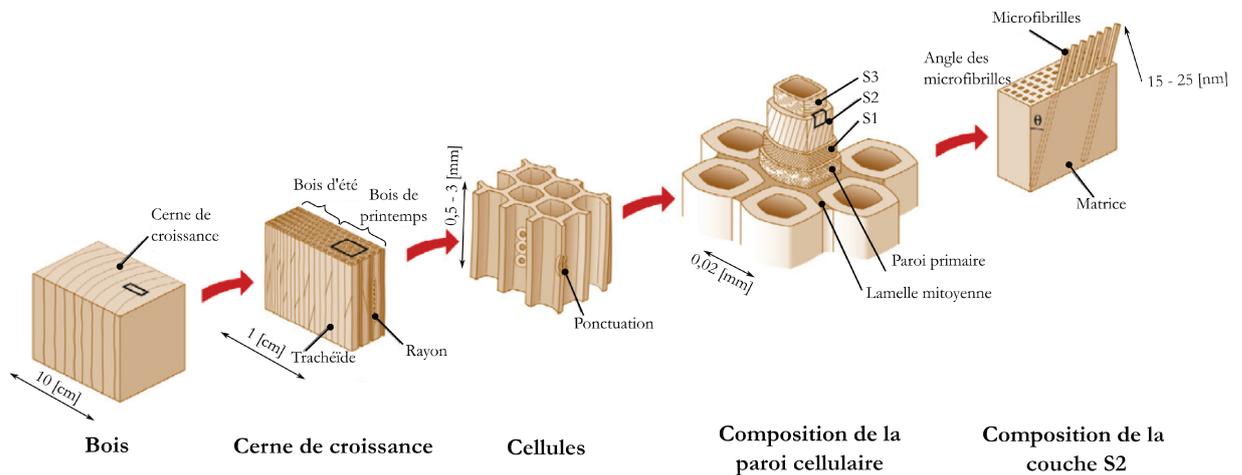


FIGURE 1.3: Le bois - une structure multi échelle d'après Rafsanjani (Rafsanjani et al., 2012)

Une structure, qui, à l'échelle macroscopique, révèle des différences (les cernes) liées à une croissance dépendante des saisons.

Une structure en nid d'abeille, qui, à l'échelle mésoscopique, participe à la résistance de l'ensemble tout en garantissant une certaine légèreté.

Une structure qui, à l'échelle microscopique, fait ressembler le bois à un matériau composite. Des microfibrilles, que l'on peut assimiler à un renfort, sont liées dans une matrice.

Toutes ces particularités, à différentes échelles (configuration en nid d'abeilles, *matériau composite*), permettent d'expliquer (pour partie) des propriétés comme :

- . Les différences de variations dimensionnelles (retrait, gonflement, tuilage, etc...) selon les direction principales du bois.
- . Un comportement élastique (Moutou Pitti, 2008).
- . Des variabilités dans le comportement acoustique dans la direction longitudinale tels que l'amortissement et la vitesse de propagation des ondes (Gril, 1988; Norimoto and Gril, 1989; Brancheriau, 2013).

Feuillus et résineux

Par son origine végétale, le bois est un matériau hétérogène dont les caractéristiques dépendent des essences voire de l'arbre dont il est issu. On distingue deux grandes familles.

Les conifères, appelés aussi résineux, sont les plus anciens dans l'évolution. Leur structure est plus simple, voire primitive (Triboulot and Trouy-Triboulot, 2012).

Les feuillus sont plus récents et de structure plus complexe.

Les résineux ont une structure cellulaire simple qui n'est composée que de deux types de cellules.

Les trachéides : il s'agit de cellules longues, terminant en fuseau, qui ne sont remplies que d'air ou d'eau. Les trachéides (représentant 90 à 100% du bois) assurent la conduction de la sève et le soutien physique. Les trachéides verticales ont une longueur qui varie de 1,5 à 10 [mm]. Leur section, sensiblement carrée, a un côté dont la dimension varie de 20 à 80 [μm]. Elles possèdent des ponctuations alvéolées qui permettent à la sève brute de circuler verticalement et horizontalement (figure 1.4).

Les parenchymes : dans le plan transversal, ce sont des cellules en forme de briques qui assurent la circulation des éléments nutritifs et des substances de croissance, ainsi que le stockage de l'amidon et des lipides. Sur le plan radial, elles forment la partie principale des rayons ligneux. Les cellules sécrétrices, à aspect parenchymateux, bordent les canaux résinifères. Leur fonction est la production de résine qu'elles sécrètent dans les canaux résineux.

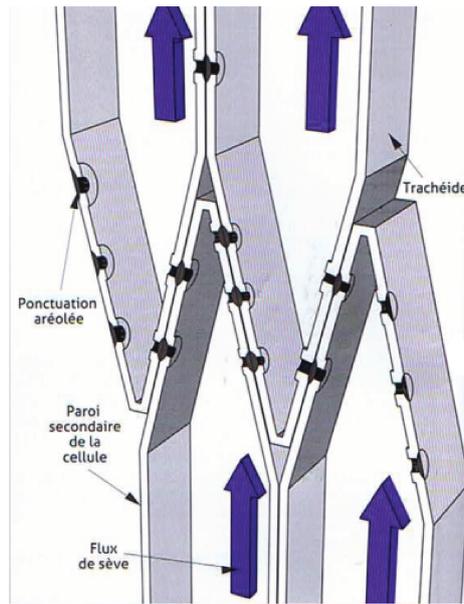


FIGURE 1.4: Organisation des trachéides de résineux d'après Charcosset (Charcosset, 2012)

Chez les conifères, la régulation de la croissance est indépendante de celle de l'épaisseur de la paroi. Au printemps, l'activité de l'arbre est principalement tournée vers la production de feuillage. L'épaisseur des cellules est faible mais la croissance radiale est forte pour permettre à la sève de monter. Avec l'été et la diminution de la quantité d'eau disponible, la croissance radiale diminue alors que la croissance tangentielle nécessite des cellules plus épaisses, ce qui se traduit par une densité plus importante.

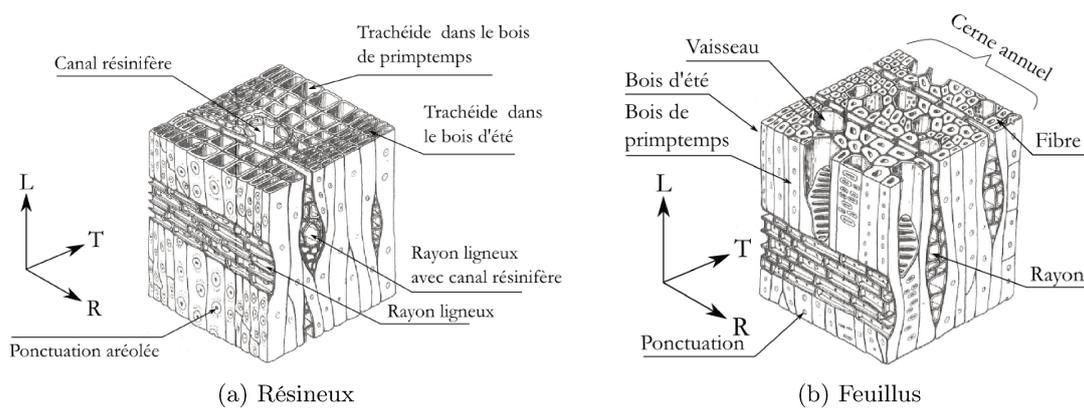


FIGURE 1.5: Détails de la structure des deux familles d'arbres d'après Guitard (Guitard, 1987)

La particularité des feuillus réside dans leurs vaisseaux, inexistant chez les résineux

(figure 1.5). En coupe transversale, ils sont visibles à l'œil nu, sous forme de petits pores, et sous forme de rainures en coupe tangentielle. La répartition des trachées permet de distinguer le bois hétérogène (Chêne, Châtaignier, Frêne, Robinier, Orme) du bois semi-hétérogène (Noyer, Cerisier) et du bois homogène (Bouleau, Aulne, Tilleul, Peuplier, Hêtre, Saule). Les zones de croissance (cernes annuels) ainsi que la répartition typique des pores et des parenchymes donnent la veinure caractéristique de chaque essence.

Les tissus des feuillus, sont plus nuancés que ceux des résineux. On peut les classer en trois catégories :

Les tissus conducteurs : les vaisseaux (trachées), les trachéides, les trachéides vasculaires. Ces dernières sont une étape intermédiaire de l'évolution d'une trachéide vers un vaisseau.

Les tissus de soutien : les sclérenchymes, les collenchymes.

Les tissus de réserves : les parenchymes, les rayons médullaires.

Les arbres n'ayant pas de squelette, leur structure s'est développée de manière à pouvoir être autoportante. Cet arrangement est constitué d'une cellule entourée d'une paroi rigide collée à ses voisines, ce qui lui confère une structure en nid d'abeille. Le collage entre les fibres verticales et horizontales constitue un des points faibles du bois lors du séchage, se traduisant par un risque de fissuration.

Polymères naturels

Les végétaux sont majoritairement composés de trois macromolécules : la cellulose, la lignine et l'hémicellulose. Ces trois constituants sont des polymères naturels que l'on peut classer en deux catégories : les polyphénols pour la lignine et les polysaccharides pour la cellulose et l'hémicellulose :

La cellulose est un glucide et l'un des principaux constituants des végétaux, en particulier de la paroi cellulaire. Il s'agit d'un polymère qui représente 40 à 50 % de la masse sèche d'un arbre. Il contribue majoritairement à la résistance mécanique des végétaux ([Newman R and Melton L, 1994](#)). Sa phase amorphe possède un grand nombre de groupements hydroxyles susceptibles de former des liaisons avec l'eau ([Park et al., 2007](#)).

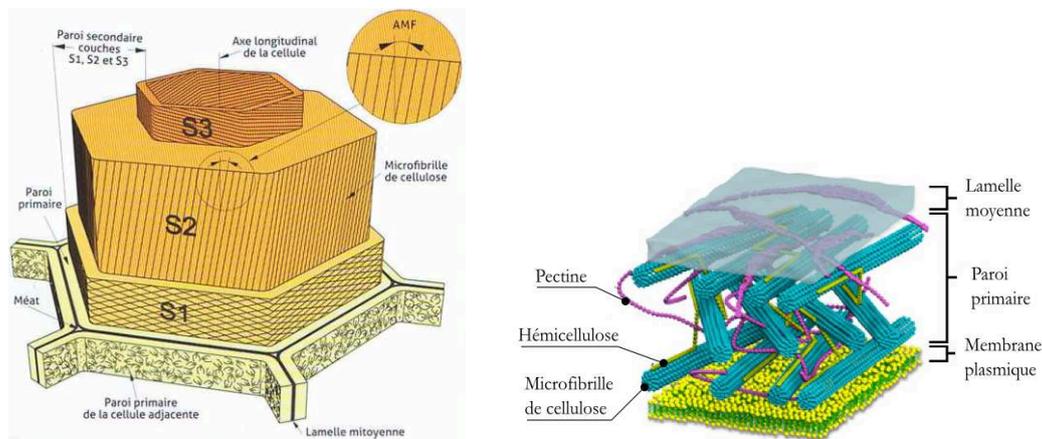
Les hémicelluloses sont des polysaccharides complexes qui se caractérisent par leur solubilité dans les solutions alcalines et leur insolubilité dans l'eau. Elles sont contenues dans la paroi des cellules des plantes et assurent la jonction et le positionnement des fibrilles cellulosiques entre elles.

La lignine vient juste après la cellulose par ordre décroissant de prépondérance dans les plantes. Ce polymère amorphe chasse l'eau contenue dans la paroi de la cellule pendant sa formation. Il rend les parois cellulaires hydrophobes et augmente leur rigidité. La lignine

influence les propriétés rhéologiques des tissus végétaux, permettant à ceux-ci de mesurer plusieurs mètres de haut et de ne pas s'effondrer sur leur propre poids.

Constitution de la paroi végétale

La cellule végétale est constituée d'une paroi. Sur la figure 1.6a, en allant de l'intérieur vers l'extérieur de la cellule, on peut voir que la paroi secondaire est directement en contact avec la paroi primaire puis la lamelle mitoyenne. Comme vu à la figure 1.4, cette paroi possède des ponctuations (orifices) qui permettent la circulation des fluides entre les cellules.



(a) Paroi d'une cellule de bois d'après Charcosset (Charcosset, 2012) (b) Structure de la paroi primaire d'après Roig (Roig, 2011)

FIGURE 1.6: Paroi végétale

La paroi primaire est située entre la lamelle mitoyenne et la paroi secondaire. D'épaisseur très fine (de 0,03 à 1 μm), elle est constituée de 25 à 30% de cellulose, de 30 à 65% d'hémicellulose, 5 à 35% de pectines et de 0,5 à 5 % de protéines. Les hémicelluloses sont liées par des liaisons hydrogènes aux fibrilles de cellulose (figure 1.6b). Les pectines augmentent la complexité de la matrice et, en raison des liaisons ioniques qui peuvent se créer entre deux chaînes de pectines avec certains minéraux comme le calcium, influencent considérablement les propriétés structurales de la paroi. La paroi secondaire est située entre la paroi primaire et la cellule. Elle est de composition similaire à celle de la paroi primaire mais dans des proportions différentes (il y a notamment plus de cellulose). Sa structure est plus rigide et son épaisseur est de l'ordre de 10 μm .

La paroi secondaire est composée de trois couches qui contiennent une forte proportion de cellulose.

La couche S1, (de 0,1 à 0,4 μm) joue un rôle important dans la résistance mécanique transversale en raison de l'orientation de ses microfibrilles (Angle Moyen des Fibres : AMF) qui varie de 60 à 80°.

La couche S2, qui représente de 75 à 85% de l'épaisseur de la paroi secondaire a une orientation des microfibrilles qui varie de 2 à 30°. Elle joue un rôle important dans la rigidité du matériau et le comportement au retrait du bois. Cette couche conditionne la différence d'épaisseur entre le bois de printemps et le bois d'été chez les résineux.

La couche S3, (de 0,5 à 1 [μm]) a un angle des microfibrilles qui va de 50 à 90°. Cette orientation lui confère un rôle important dans la résistance au flambement et à la compression de la paroi de la cellule.

La composition des différentes couches est récapitulée dans le tableau 1.1.

Parois	Celluloses	Hémicelluloses	Lignines
Lamelle mitoyenne	5%	10%	85%
Paroi primaire	10%	15%	75%
Parois secondaires			
S1	30%	30%	40%
S2	50%	30%	20%
S3	50%	35%	15%
Bois feuillus	50%	30%	20%
Bois résineux	50%	25%	25%

Tableau 1.1: Ordre de grandeur des pourcentages de constituants dans les différentes parois d'après Guitard ([Guitard, 1987](#))

2.2 Caractéristiques mécaniques et actions climatiques

Caractéristiques mécaniques des polymères constitutifs du bois

Les différents polymères constitutifs du bois ont des propriétés mécaniques qui peuvent varier avec les conditions climatiques (tableau 1.2). Dans le cas de l'hémicellulose, les modules d'élasticité (E_x , E_y) ainsi que le module de cisaillement (G) voient leurs valeurs respectives divisées d'un facteur 100 lors d'un passage d'un état sec à un état humide.

Polymère	Conditions sèches 12 % HR, 20 [°C]	Point de saturation des fibres (PSF)
Cellulose		
E_x	134 [GPa]	134 [GPa]
E_y	27,2 [GPa]	27,2 [GPa]
G	4,4 [GPa]	4,4 [GPa]
ν	0,1	0,1
Hémicellulose		
E_x	2 [GPa]	20 [MPa]
E_y	0,8 [GPa]	8 [MPa]
G	1,0 [GPa]	10 [MPa]
ν	0,2	0,2
Lignine		
E_x	2 [GPa]	2 [GPa]
E_y	1,0 [GPa]	1,0 [GPa]
G	0,6 [GPa]	0,6 [GPa]
ν	0,3	0,3

Tableau 1.2: Propriétés élastiques des composants du bois d'après Borch (Borch et al., 2001)

Selon les espèces, la proportion de chacun des polymères varie (tableau 1.3) et influe directement sur les propriétés mécaniques du bois (tableau 1.4). Les feuillus étant, en général, plus denses que les résineux et parce que leur composition massique en cellulose est plus importante, leur rigidité est plus importante que celle des résineux.

Polymère	Composition massique (%)		Rôle
	Feuillus	Résineux	
Cellulose	38 - 50	40 - 45	Renfort
Hémicellulose	19 - 26	7 - 15	Matrice
Lignine	23 - 30	26 - 34	Matrice

Tableau 1.3: Composition typique de bois résineux et feuillus (source cours Kaj Henricson)

Caractéristiques	Feuillus (densité moyenne = 0,65)	Résineux (densité moyenne = 0,45)
Modules d'élasticité [MPa]		
E_L	14 400	13 100
E_R	1 810	1 000
E_T	1 030	636
E_L/E_R	8	13
E_L/E_T	14	21
E_R/E_T	1,8	1,6
Modules de cisaillement [MPa]		
G_{TL}	971	745
G_{LR}	1 260	861
G_{RT}	366	84
G_{LR}/G_{RT}	3,5	8,9
G_{TL}/G_{RT}	2,6	10,3
Coefficients de Poisson		
ν_{RT}	0,67	0,51
ν_{LT}	0,46	0,51
ν_{LR}	0,39	0,39
ν_{TR}	0,38	0,31
ν_{RL}	0,048	0,030
ν_{TL}	0,033	0,020
L : longitudinal, R : radial, T : tangentiel		

Tableau 1.4: Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques du bois, mesurées sur des petits échantillons sans défaut, d'après Triboulot ([Triboulot and Trouy-Triboulot, 2012](#))

Les effets de la température et de l'humidité sur les propriétés mécaniques des polymères du bois

Le module élastique d'un polymère évolue en fonction de la température. Un polymère est caractérisé par une température de transition vitreuse qui délimite deux comportements distincts : un état caoutchouteux proche d'un fluide visqueux et un état vitreux proche d'un solide.

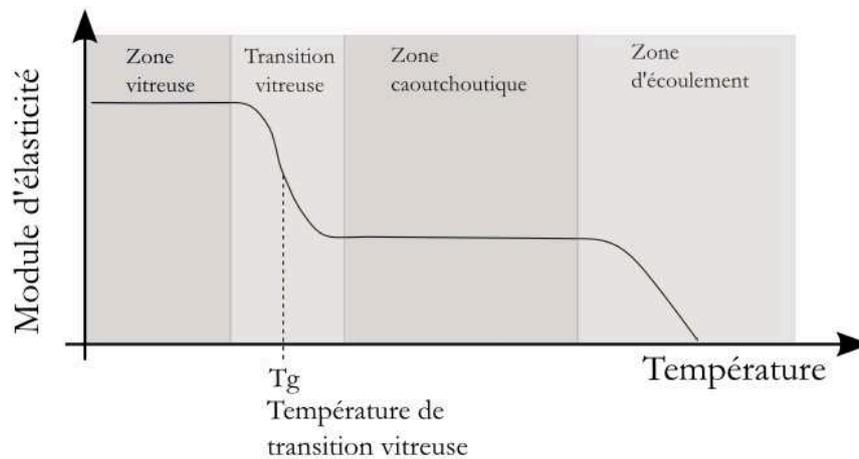


FIGURE 1.7: Evolution du module d'élasticité en fonction de la température d'après Bernard (Bernard, 1990)

Comme nous pouvons le voir sur la figure 1.7, l'évolution du module d'élasticité en fonction de la température se décompose en 4 phases :

- . Pour des températures inférieures à T_g , le module d'élasticité est élevé et varie peu en fonction de la température. Nous sommes dans la zone vitreuse.
- . Pour des températures voisines de T_g (température de transition), le module d'élasticité diminue fortement. La cellulose se comporte comme un solide viscoélastique. Nous sommes dans la zone de transition vitreuse.
- . Pour des hautes températures, le module élastique est plus faible que pour la zone vitreuse mais il reste stable. Nous sommes dans la zone caoutchoutique.
- . Pour les très hautes températures, le matériau s'écoule comme un liquide.

A l'état anhydre, les polymères du bois ont des températures de transition nettement supérieures aux températures usuelles (tableau 1.5).

Polymère	Température de transition [°C]
Cellulose	220 – 255
Hémicellulose	150 – 230
Lignine	130 - 175

Tableau 1.5: Température de transition pour différents polymères d'après Bernard (Bernard, 1990)

D'une manière générale (Triboulot and Trouy-Triboulot, 2012), nous pouvons considérer qu'en dessous de 100 [°C], le bois ne subit pas de modification irréversible de sa

composition chimique. Cette propriété est d'ailleurs utilisée lors du cintrage de pièce de bois par exemple. Au delà d'une teneur en eau de 20%, la température de transition de la cellulose et de l'hémicellulose passe en dessous de 50 [°C] (figure 1.8). La conséquence est que, selon le taux d'humidité dans le bois, celui-ci perd son caractère élastique pour avoir un comportement viscoélastique.

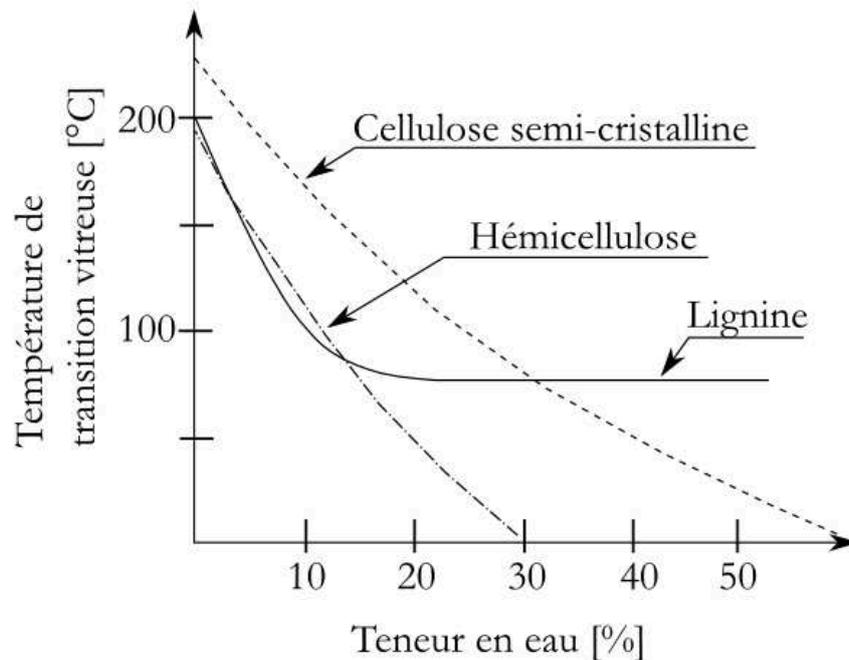


FIGURE 1.8: Variation de la température de transition vitreuse en fonction de la teneur en eau d'après Bernard (Bernard, 1990)

Expressions de l'influence de l'humidité et de la température sur l'ensemble des caractéristiques du matériau bois

On appelle *humidité, teneur en eau degré ou taux d'humidité* w d'un bois, la masse d'eau (m_w) qu'il renferme rapportée à la masse du même matériau à l'état anhydre (m_d). Il s'exprime en pour cent et est défini par la relation suivante :

$$\omega = \frac{m_w}{m_d} \quad (1.1)$$

Une variation de la teneur en eau ω peut entraîner des variations dimensionnelles du bois. Nous assisterons à un gonflement en cas d'humidification ou à un retrait en cas d'un séchage. Les variations dimensionnelles sont observables pour des variations en deçà du PSF. Sans rentrer dans les détails, on peut estimer que le PSF se situe au voisinage de 30%. Au delà de cette valeur, toute variation de la teneur en eau aura un

effet négligeable sur les variations dimensionnelles. Le PSF correspond à la venue ou au départ d'eau chimiquement liée (figure 1.9).

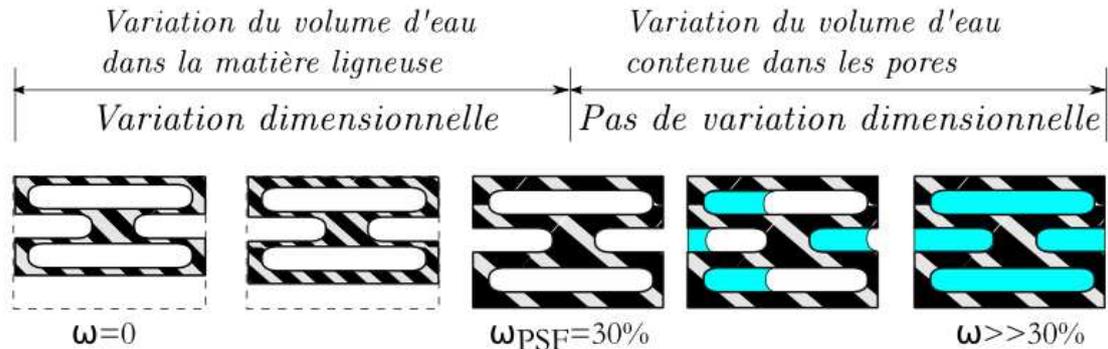


FIGURE 1.9: Représentation schématique de l'évolution de la teneur en eau dans le bois d'après (Natterer et al., 2004)

En dessous du PSF, les variations dimensionnelles sont proportionnelles à la teneur en eau, et ce, tout en conservant le caractère orthotrope du matériau. On définit un coefficient de retrait-gonflement β pour chacune des directions principales (L, R, T) (1.2).

$$\beta = \frac{\Delta l}{l} \cdot \Delta \omega \quad (1.2)$$

Chaque essence possède ses propres coefficients de retrait-gonflement. De plus, chaque coefficient est lui-même dépendant de la teneur en eau dans lequel se trouve le matériau (Almeida, 2006; Wang, 2008).

La masse volumique se définit comme le rapport de la masse au volume de bois correspondant. Cette grandeur est très dépendante de l'humidité interne du bois. En général, elle est fournie pour une teneur en eau de référence de 12%. Des auteurs ont tenté de mettre en évidence des corrélations entre la masse volumique et certaines caractéristiques physiques et mécaniques (figure 1.10).

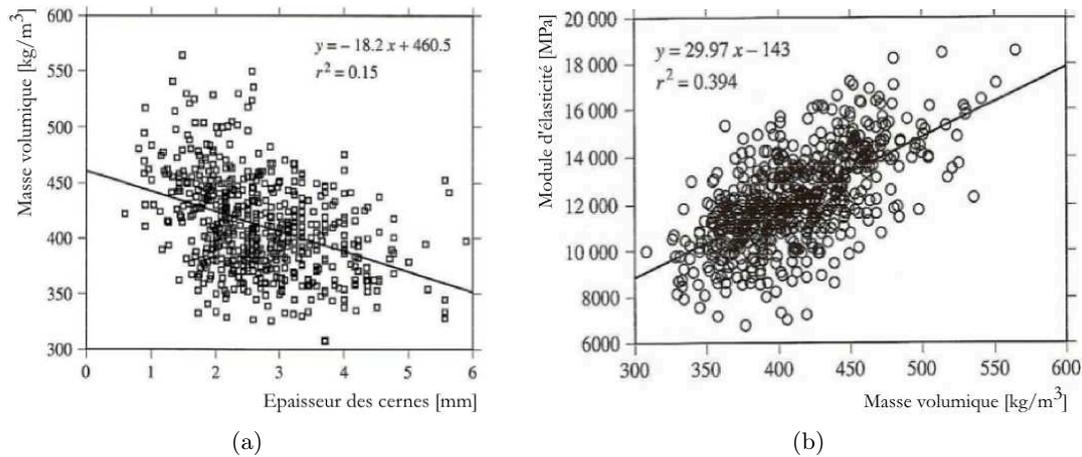


FIGURE 1.10: Relation entre masse volumique, épaisseur des cernes et module d'élasticité (Natterer et al., 1987)

D'après Bernard (Bernard, 1990), nous pouvons exprimer les variations du module d'élasticité et du module de cisaillement en fonction de la température et de l'humidité à l'aide des formules suivantes.

$$E = E_{20} \cdot \left[1 - \frac{a_{EH} \cdot (t - 100)}{100} \right] \quad (1.3)$$

$$G = G_{20} \cdot \left[1 - \frac{a_{GH} \cdot (t - 100)}{100} \right] \quad (1.4)$$

Les équations (1.3) et (1.4) traduisent l'évolution du module d'élasticité et du module de cisaillement en fonction de la température (pour des températures variant dans une plage de -20 à 60 [°C]) pour une humidité de référence de 12% dans le bois.

$$E = E_{20} \cdot \left[1 - \frac{a_{Et} \cdot (H - 12)}{100} \right] \quad (1.5)$$

$$G = G_{20} \cdot \left[1 - \frac{a_{Gt} \cdot (H - 12)}{100} \right] \quad (1.6)$$

Les équations (1.5) et (1.6) traduisent l'évolution du module d'élasticité et du module de cisaillement en fonction de l'humidité (pour une humidité variant dans une plage de 0 à 30%) pour une température de référence de 20 [°C]. Au delà, nous atteignons le point de saturation des fibres. L'eau n'est plus liée et ne change en rien les paramètres élastiques du bois.

Ces équations, d'une formulation relativement simple et d'un domaine d'emploi bien défini, ne trouvent réellement leur application que dans le cas de projet de dimensionnement

de structures. Si l'on s'intéresse à ce qui se passe au sein du matériau, on constate que la variation du module d'élasticité varie sur toute la plage de la teneur en eau (Wang, 2008) (figure 1.11).

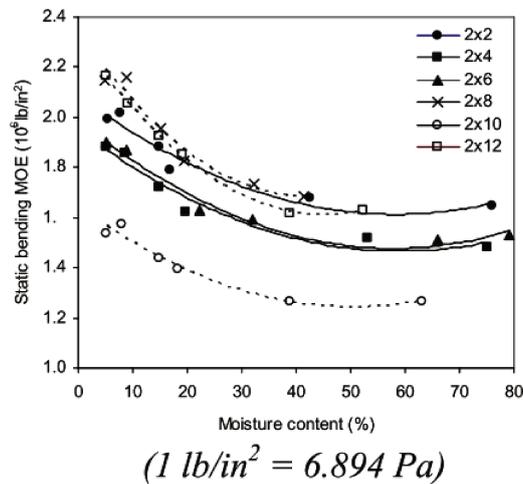


FIGURE 1.11: Variation du module d'élasticité pour du Douglas d'après Wang (Wang, 2008)

Dans le cadre de la mécanique de la rupture, il a été montré que cette même teneur en eau avait une influence sur le comportement du matériau. Dans les travaux de Reiterer et Tschegg (Reiterer and Stanzl-Tschegg, 2002), les effets de l'humidité ont été évalués sur la valeur du taux de restitution d'énergie (G_c) et du facteur d'intensité de contrainte (K_I) sur des éprouvettes en Epicéa testées en Mode I. Si une influence est bien constatée, elle n'intervient principalement que pour de faibles valeurs de la teneur en eau (entre 7 et 18%).

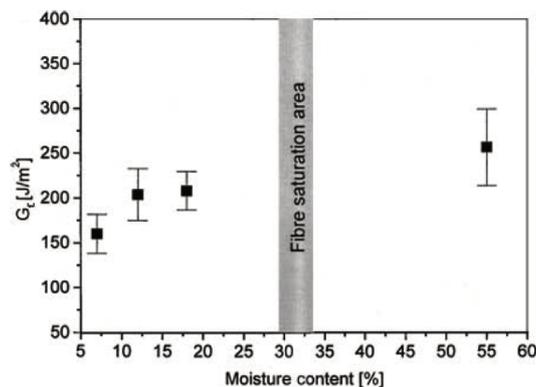


FIGURE 1.12: Variation du taux de restitution d'énergie en fonction de la teneur en eau d'après (Reiterer and Stanzl-Tschegg, 2002)

Ces résultats sont à considérer avec précaution compte tenu de l'incertitude sur les résultats et des différentes teneurs en eau envisagées. Elles étaient de 7, 12, 18 et 55% (figure 1.12).

Dans un passage en revue des différents résultats obtenus sur le bois soumis à différents modes de sollicitation (Conrad et al., 2003), il apparaît que la résistance mécanique à la rupture dépend de la vitesse de chargement, de la teneur en eau du matériau, de sa densité, de la présence d'éventuels défauts et de son épaisseur. Sur la base de cette revue, plusieurs points intéressants sont à retenir :

- . En ce qui concerne la teneur en eau, il y apparaît à plusieurs reprises que dans le cas d'un mode de chargement de type I cette résistance mécanique croît jusqu'à une teneur en eau avoisinant les 8% et que selon les cas, au delà de cette valeur où elle atteint son maximum, elle décroît légèrement ou reste constante.
- . Cette même résistance mécanique croît avec la densité du matériau.

Dans une explication des effets de la vitesse et du temps de chargement sur les propriétés mécaniques du bois, Nadeau (Nadeau et al., 1982) met en évidence que la vitesse de chargement a une influence. A de faibles vitesses de chargement, nous pouvons nous trouver dans une situation d'une propagation sous-critique de la fissure. A contrario, pour des vitesses de chargement élevées, la propagation de fissure se fera pour des valeurs de contraintes plus importantes que dans le cas précédent. Ce phénomène est connu sous le principe de l'effet du temps d'application des charges.

3 Mécanique de la rupture dans le bois et outils d'investigation associés

3.1 Théorie et modélisation

Il existe trois façons d'appliquer une force et de faire propager une fissure (figure 1.13) :

- . Le mode I permet de générer une contrainte de traction normale au plan de fissure.
- . Le mode II permet de générer une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de fissure et perpendiculairement au plan de fissure.
- . Le mode III permet de générer une contrainte de cisaillement parallèlement au plan de fissure et au front de fissure.

En général, une fissure se propage selon une combinaison de ces trois modes et rarement selon un seul mode.

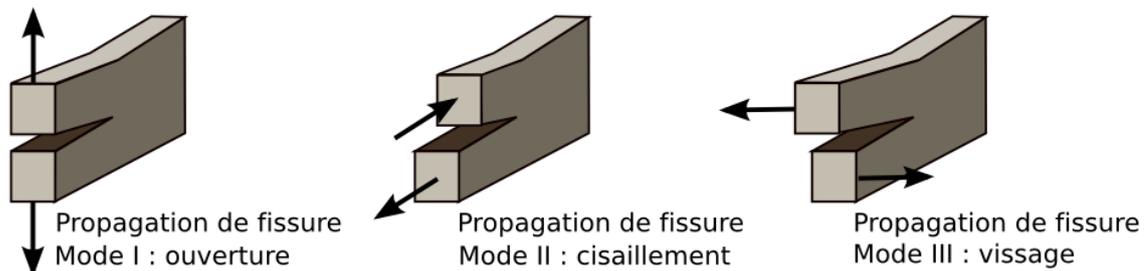


FIGURE 1.13: Modes de propagation de fissure

Malgré cela, c'est l'étude de ces modes seuls, puis de modes combinés, qui doit nous permettre de comprendre les mécanismes et les lois qui régissent la propagation des fissures.

Suite aux travaux de Griffith (1920) ([Gregoire, 2008](#)) sur les matériaux fragiles et ductiles, il apparaît qu'une zone plastique se développe en front de fissure. L'augmentation de la taille de cette zone plastique est fonction de l'augmentation de la charge jusqu'à ce que la fissure se propage – provoquant ainsi une libération de contrainte en arrière du front de fissure. Cette notion d'énergie, reprise par Irwin (dès 1950) a permis de développer le modèle qui consiste à séparer (par le calcul) l'énergie en deux composantes : une énergie élastique et une énergie plastique et de surface (1.7).

$$G = 2 \cdot \gamma + G_p \quad (1.7)$$

Où :

- . γ représente l'énergie de surface.
- . G_p représente la dissipation plastique par unité de surface de la fissure.

Un des objectifs de la mécanique de la rupture est de remonter jusqu'à la valeur de G , l'énergie dissipée. Le critère énergétique de Griffith peut s'écrire de la façon suivante (1.8) :

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{E \cdot G}{\pi \cdot a}} \quad (1.8)$$

Pour atteindre la valeur de cette quantité d'énergie disponible, une méthode a été développée pour une fracture au niveau de la contrainte asymptotique et des champs de déplacement autour du front de fissure dans un solide idéalement élastique. Le champ de contrainte singulier est dépendant des caractéristiques matérielles (Dubois, 1997) :

$$\sigma_{11} = \frac{K_1^{(\sigma)}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \text{Re} \left[\frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 - S_2} \left(\frac{S_2}{\rho_2^{0,5}} - \frac{S_1}{\rho_1^{0,5}} \right) \right] + \frac{K_2^{(\sigma)}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \text{Re} \left[\frac{1}{S_1 - S_2} \left(\frac{S_2^2}{\rho_2^{0,5}} - \frac{S_1^2}{\rho_1^{0,5}} \right) \right] \quad (1.9)$$

$$\sigma_{22} = \frac{K_1^{(\sigma)}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \text{Re} \left[\frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 - S_2} \left(\frac{S_2}{\rho_2^{0,5}} - \frac{S_1}{\rho_1^{0,5}} \right) \right] + \frac{K_2^{(\sigma)}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \text{Re} \left[\frac{1}{S_1 - S_2} \left(\frac{1}{\rho_2^{0,5}} - \frac{1}{\rho_1^{0,5}} \right) \right] \quad (1.10)$$

$$\sigma_{12} = \frac{K_1^{(\sigma)}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \text{Re} \left[\frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 - S_2} \left(\frac{1}{\rho_1^{0,5}} - \frac{1}{\rho_2^{0,5}} \right) \right] + \frac{K_2^{(\sigma)}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \text{Re} \left[\frac{1}{S_1 - S_2} \left(\frac{S_2}{\rho_2^{0,5}} - \frac{S_1}{\rho_1^{0,5}} \right) \right] \quad (1.11)$$

Dans le cas d'un comportement élastique, le champ de déplacement prend la forme suivante :

$$u_1 = 2 \cdot K_1^{(\sigma)} \cdot \sqrt{\frac{r}{2 \cdot \pi}} \cdot \text{Re} \left[\frac{1}{S_1 - S_2} \cdot \left(p_2 \cdot S_1 \cdot \rho_2^{0,5} - p_1 \cdot S_2 \cdot \rho_1^{0,5} \right) \right] + 2 \cdot K_2^{(\sigma)} \cdot \sqrt{\frac{r}{2 \cdot \pi}} \cdot \text{Re} \left[\frac{1}{S_1 - S_2} \cdot \left(p_2 \cdot \rho_2^{0,5} - p_1 \cdot \rho_1^{0,5} \right) \right] \quad (1.12)$$

$$u_1 = 2 \cdot K_1^{(\sigma)} \cdot \sqrt{\frac{r}{2 \cdot \pi}} \cdot \text{Re} \left[\frac{1}{S_1 - S_2} \cdot \left(q_2 \cdot S_1 \cdot \rho_2^{0,5} - q_1 \cdot S_2 \cdot \rho_1^{0,5} \right) \right] + 2 \cdot K_2^{(\sigma)} \cdot \sqrt{\frac{r}{2 \cdot \pi}} \cdot \text{Re} \left[\frac{1}{S_1 - S_2} \cdot \left(q_2 \cdot \rho_2^{0,5} - q_1 \cdot \rho_1^{0,5} \right) \right] \quad (1.13)$$

Les différentes constantes introduites dans ces relations sont directement liées aux caractéristiques J_{ij} élastiques du matériau. Elles sont définies ainsi :

$$\rho_\alpha = \cos(\theta) + i \cdot S_\alpha \cdot \sin(\theta)$$

s_α désigne les racines doubles complexes de : $J_{11} \cdot s_\beta^4 + (2 \cdot J_{12} + J_{33} \cdot s_\beta^2) + J_{22} = 0$.
avec

$$p_\alpha = J_{11} \cdot s_\alpha^2 + J_{12} \quad q_\alpha = \frac{J_{22}}{s_\alpha} + J_{12} \cdot s_\alpha$$

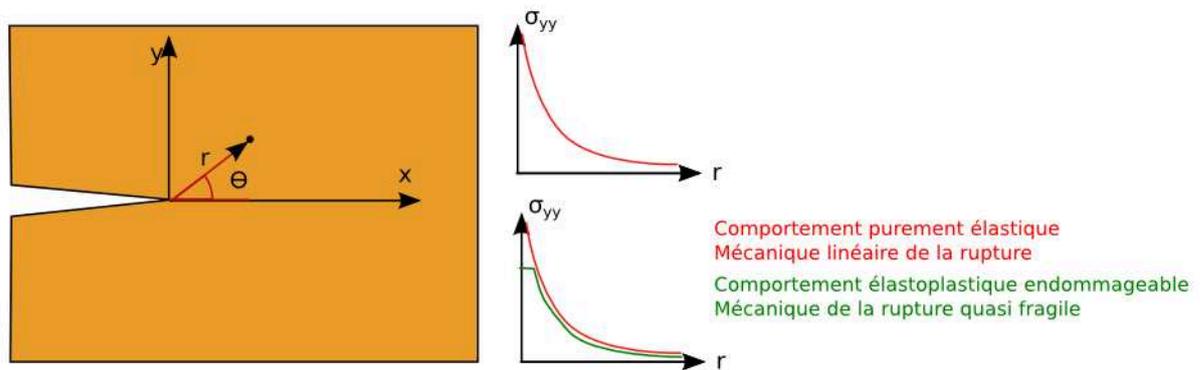


FIGURE 1.14: Contrainte au voisinage de la pointe de fissure

3.2 Taux de restitution d'énergie lors d'un essai mécanique en mode I

D'après le principe de la conservation de l'énergie (approche thermodynamique) appliquée à un système, nous avons la relation :

$$Q + W_{ext} = U + K \quad (1.14)$$

Où :

- . Q représente la chaleur.
- . W_{ext} représente le travail des actions extérieures.
- . U représente l'énergie interne.
- . K représente l'énergie cinétique (vibratoire, dynamique).

Dans le cas d'un chargement monotone, la chaleur Q (échangée avec le milieu extérieur) sera négligée ainsi que l'énergie due aux phénomènes dynamiques. La formule (1.14) devient :

$$W_{ext} = U = E + \phi \quad (1.15)$$

Où :

- . E représente l'énergie restituable.
- . ϕ représente l'énergie dissipée, perdue par la structure (endommagement ou déformation).

Si nous pouvons remonter assez aisément (expérimentalement) à W_{ext} , il faut faire la part des choses entre E, l'énergie restituable et ϕ l'énergie dissipée. Dans les travaux de (Dubois, 1997) et (Moutou Pitti, 2008), nous pouvons exprimer le deuxième principe de la thermodynamique (inégalité de Clausius Duhem) de la manière suivante :

$$\sigma : \dot{\varepsilon} - \rho \cdot \left(\dot{\psi} + S \cdot T \right) - \vec{q} \cdot \frac{\overrightarrow{grad}(T)}{T} \geq 0 \quad (1.16)$$

Dans cette équation, ρ représente la masse volumique du milieu, \vec{q} le vecteur courant de chaleur, T la température, ψ l'énergie libre et S l'entropie. Dans le cas d'un chargement monotone, sans variation de température, l'équation (1.16) peut être simplifiée de la manière suivante :

$$F \cdot \dot{d} - \dot{\psi} \geq 0 \quad (1.17)$$

Les variables d'état observables lors d'un essai de chargement sont le déplacement d, la température T, l'humidité ω et la longueur de la fissure a. En exprimant l'énergie libre en fonction de ces variables d'état nous obtenons la différenciation suivante : $\psi = \psi(d, a, D, \dots)$ où D est une variable d'endommagement.

$$\dot{\psi} = \frac{\partial \psi}{\partial d} \cdot \dot{d} + \frac{\partial \psi}{\partial a} \cdot \dot{a} + \frac{\partial \psi}{\partial D} \cdot \dot{D} \quad (1.18)$$

$$\left(F - \frac{\partial \psi}{\partial d} \right) \cdot \dot{d} + \frac{\partial \psi}{\partial a} \cdot \dot{a} + \frac{\partial \psi}{\partial D} \cdot \dot{D} \geq 0 \quad (1.19)$$

Dans le cas d'un chargement monotone en déplacement, nous obtenons la courbe sur la figure 1.15. La force s'exprimera selon l'équation (1.20) et l'énergie libre selon (1.21).

$$F = \tilde{k}(a, D) \cdot d \quad (1.20)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \cdot \tilde{k}(a, D) \cdot d^2 \quad (1.21)$$

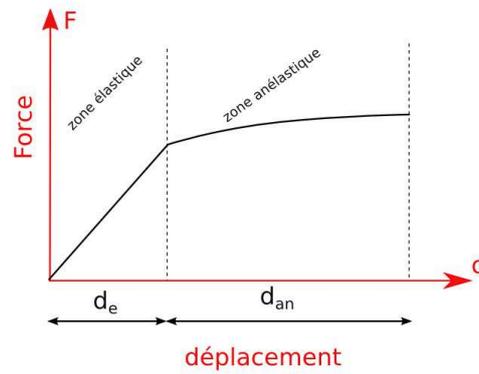


FIGURE 1.15: Courbe force déplacement

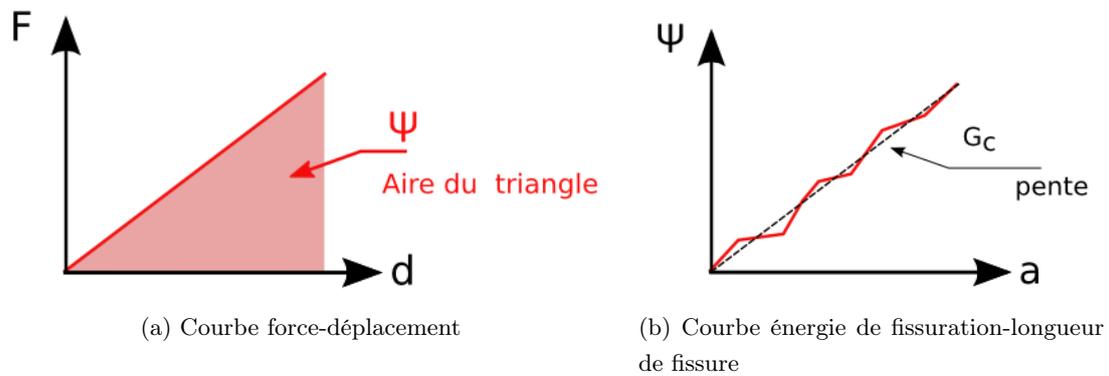


FIGURE 1.16: Estimation du taux de restitution d'énergie

Le taux de restitution de l'énergie de rupture (1.22) se déduit de la courbe force-déplacement en déterminant l'aire du triangle sous la courbe (figure 1.16).

$$G_f = -\frac{\partial \psi}{\partial a} \quad (1.22)$$

Tandis que le taux de restitution de l'énergie d'endommagement devient :

$$Y_D = -\frac{\partial \psi}{\partial D} \quad (1.23)$$

Ce qui donne les expressions suivantes :

$$G_f = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \tilde{k}(a, D)}{\partial a} \cdot d^2 \quad (1.24)$$

$$G_f = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \tilde{k}(a, D)}{\partial D} \cdot d^2 \quad (1.25)$$

$$\psi_f = G_f \cdot \dot{a} \quad (1.26)$$

$$\psi_D = Y_D \cdot \dot{D} \quad (1.27)$$

L'équation (1.26) représente la dissipation d'énergie par fissuration. L'équation (1.27) représente la dissipation d'énergie par endommagement. L'estimation du taux de restitution d'énergie à partir des courbes expérimentales pourra se faire en considérant qu'entre deux phases de propagation de fissure, nous avons un matériau qui se comporte de manière élastique (figure 1.17).

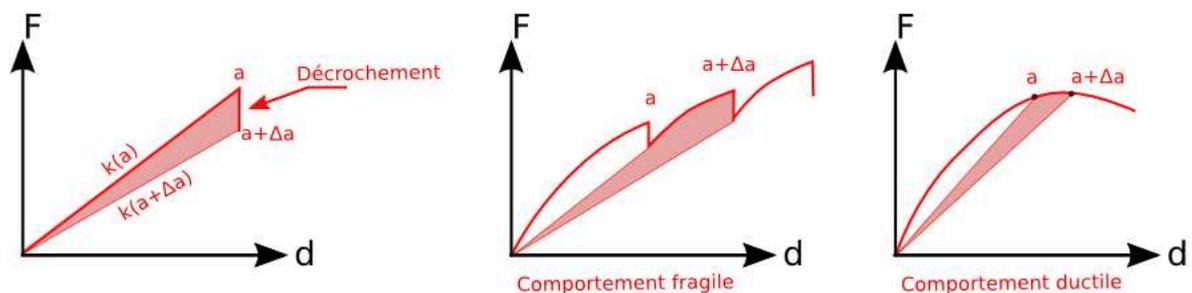


FIGURE 1.17: Variation de la complaisance

Entre chaque phase de propagation de fissure, nous pourrions écrire les relations suivantes (en utilisant la méthode de la variation de complaisance) (Equations (1.28) à (1.31)).

$$\left. \begin{aligned} F &= k(a) \cdot d \\ \psi &= \frac{1}{2} \cdot k(a) \cdot d^2 \end{aligned} \right\} \text{ et } -\frac{\partial \psi}{\partial a} \cdot \dot{a} \geq 0 \quad (1.28)$$

$$G_f = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \tilde{k}(a, D)}{\partial a} \cdot d^2 \quad (1.29)$$

$$\frac{\partial \tilde{k}(a, D)}{\partial a} = \frac{k(a + \delta a) - k(a)}{\delta a} = \frac{\delta k}{\delta a} \quad (1.30)$$

$$G_f = -\frac{1}{2} \cdot d^2 \cdot \frac{\delta k}{\delta a} \quad (1.31)$$

Notons que dans la pratique, le bois a un comportement de nature quasi fragile. Il est alors nécessaire d'utiliser des outils spécifiques (Morel et al., 2005; Coureau et al., 2006) qui tiennent compte d'un comportement non linéaire du matériau au voisinage de la pointe de fissure. Cela permet de tenir compte des phénomènes de pontage (qui ont lieu en arrière) et du phénomène de zone d'élaboration (process zone, qui a lieu en avant de la pointe de fissure).

3.3 Éprouvettes et types de chargements

Le bois étant un matériau orthotrope, différentes configurations de chargement sont possibles. Hormis les modes I, II III, il est possible de solliciter le bois selon différents plans correspondant aux plans d'orthotropie (figure 1.18).

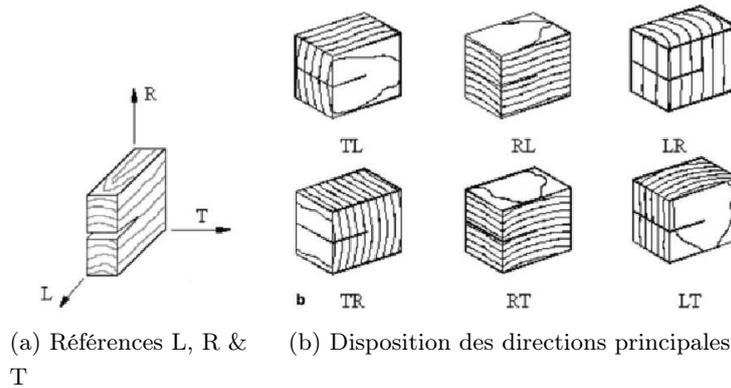


FIGURE 1.18: Principales configurations de propagation de fissure d'après Silva (Silva et al., 2006)

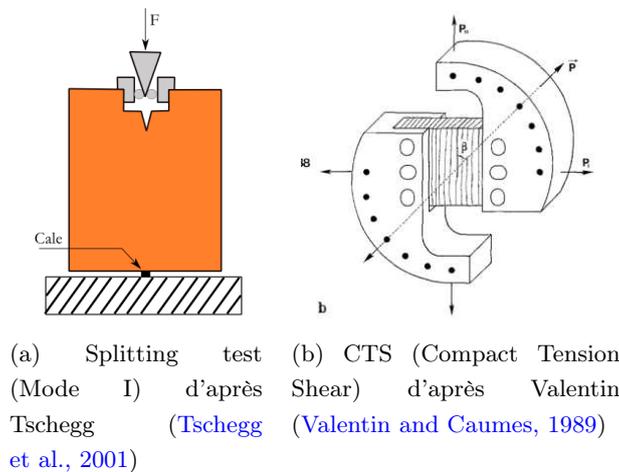


FIGURE 1.19: Différents types de chargement

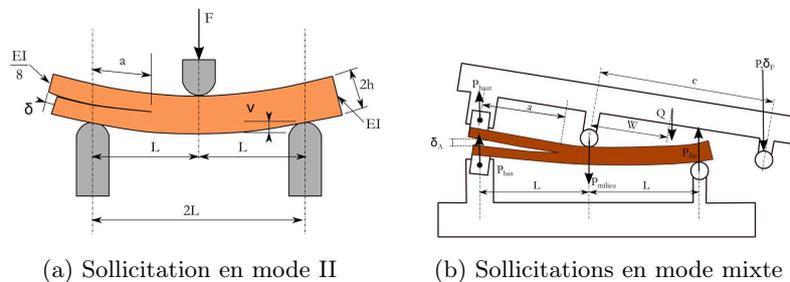


FIGURE 1.20: Sollicitations d'après Yoshihara (Yoshihara and Ohta, 2000) (a) et (Yoshihara, 2013)(b)

Dans le but de tester les éprouvettes selon différents modes de chargement, il est possible de passer par divers dispositifs expérimentaux. Il existe des dispositifs ne permettant qu'un mode de chargement (figure 1.19a et figure 1.20a) d'autres permettant de chargements combinés (figure 1.19b et figure 1.20b). Le choix d'un système de chargement se fera en fonction des phénomènes étudiés, du matériel disponible et de la complexité du chargement (ou de la modélisation) désirés.

Dans le cadre de la mécanique de la rupture appliquée au bois, plusieurs processus expérimentaux sont proposés. Ainsi nous pourrions trouver des variantes dans la forme des éprouvettes (Mindess and Bentur, 1986; Ando and Ohta, 1999; Landis and Whittaker, 2000; Oliveira et al., 2007; Moutou Pitti et al., 2011; Meite, 2012). Nous trouvons aussi des variantes dans les méthodes analytiques ou numériques utilisées (Yoshihara and Ohta, 2000; Guo and Weitsman, 2001; Dubois et al., 2002; Silva et al., 2006; Tenchev and Falzon, 2007; Oliveira et al., 2007; Xu and Yuan, 2009).

Les éprouvettes utilisées sont pré-fissurées et permettent de déterminer le taux de restitution d'énergie et les ténacités en mode I, II ou mixte.

Eprouvette Compact Tension (CT)

Cette éprouvette (figure 1.21) est utilisée pour réaliser des essais en fatigue ou pour l'étude de la propagation stable des fissures (Kobayashi et al., 1980; Beguelin et al., 1998; Nishimura, 2005). Lors d'un chargement contrôlé en déplacement, cette forme d'éprouvette permet de déterminer la ténacité du matériau.

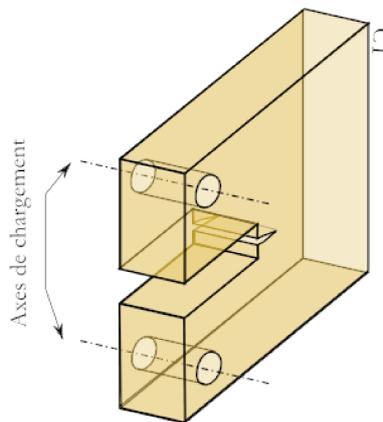


FIGURE 1.21: Eprouvette CT

Eprouvette Single Edge Notched Bending (SENB)

Ce type d'éprouvette (figure 1.22) est utilisée pour étudier l'amorçage de fissuration (Akourri et al., 2000; Avril et al., 2004) et pour déterminer le taux de restitution d'énergie. Pour une adaptation au matériau bois, cette éprouvette a été modifiée par Gustafsson (Gustafsson and Larsen, 1987), de sorte à avoir une propagation de fissure dans le sens des fibres.

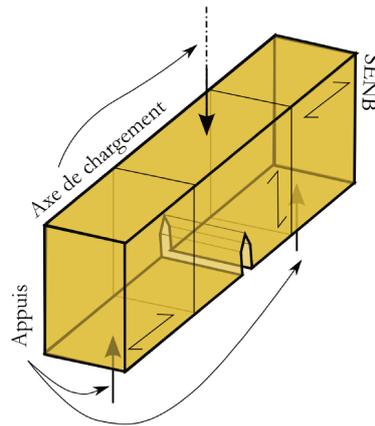


FIGURE 1.22: Eprouvette SENB modifiée par Gustafsson

Eprouvette à entaille

L'éprouvette à entaille centrale (figure 1.23a) est intéressante d'un point de vue théorique. Malheureusement, la symétrie est difficile à conserver lorsque la fissure apparaît. En général, il apparaît un mode de chargement mixte.

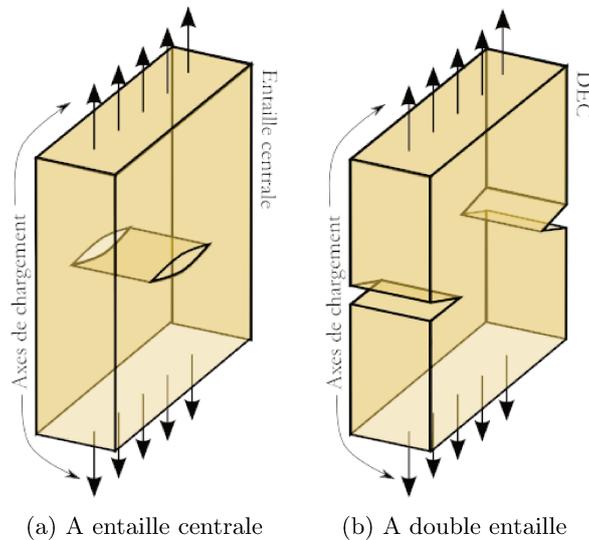


FIGURE 1.23: Eprouvettes à entailles

Pour examiner les effets générés par des discontinuités et étudier les phénomènes liés aux concentrations de contrainte, il est possible d'utiliser une éprouvette DEC (Double Edge Crack) (figure 1.23b). Une des particularités de cet essai est de présenter une interaction des zones singulières lorsque les deux fissures se rapprochent.

Eprouvette Double Cantilever Beam (DCB)

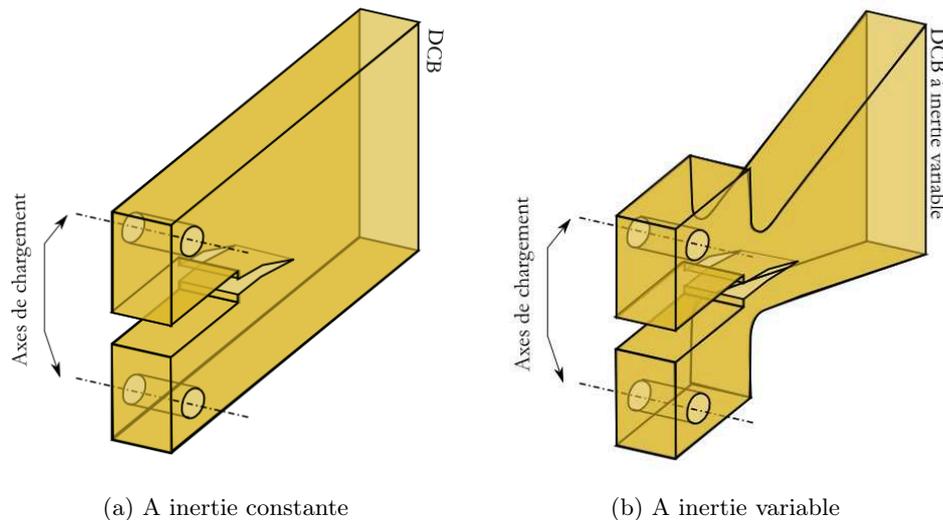


FIGURE 1.24: Eprouvettes en bois pour un chargement en mode I

Ce type d'éprouvette (figure 1.24a) permet la détermination de la ténacité et du taux de restitution d'énergie critique en mode de chargement I. Elle fut initialement utilisée par CHOW and WOO en 1979 (Moutou Pitti et al., 2011).

Les géométries précédemment présentées sont caractérisées par une instabilité de la propagation de la fissure lors d'une force imposée (force croissante ou essai de fluage) (Kanninen, 1974; Fineberg et al., 1991; Uenishi and Rossmannith, 2002). Si dans le cas d'un matériau isotrope, il y a un risque de bifurcation dans la propagation de fissure, il disparaît avec le bois : la fissure est guidée par l'orientation des fibres.

En 2002, Dubois (Dubois et al., 2002) a proposé de transformer cette éprouvette afin de lui donner une section variable (figure 1.24b), sa géométrie lui permettant d'avoir une stabilité de propagation de fissure lors d'un essai piloté en force. Ainsi il est plus aisé de mettre en évidence les aspects viscoélastiques ayant lieu dans la zone d'élaboration de la fissure durant les phases de fluage. L'éprouvette à inertie variable (figure 1.24b) permet d'obtenir un facteur d'intensité de contrainte qui décroît lors de la propagation de fissure.

Eprouvette modified Tapered Double Cantilever Beam (mTDCB)

Ce type d'éprouvette (figure 1.25) est une adaptation de l'éprouvette TDCB pour le bois par Morel (Morel, 1998). Son avantage est de permettre une propagation stable de la fissure lors d'un chargement contrôlé en déplacement. Composée d'une partie à inertie variable et d'une partie à inertie constante, elle permet, d'une part, de garantir une stabilité de fissure tout en limitant les effets de bord liés au développement de la zone d'élaboration.

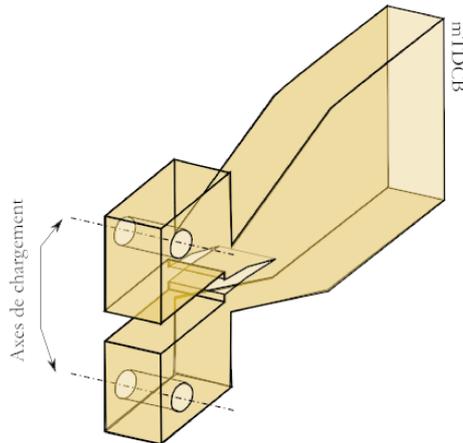


FIGURE 1.25: Eprouvette mTDCB

3.4 Matériels d'investigation

Lorsqu'une modélisation est effectuée, elle est généralement couplée à des mesures et des essais réalisés en laboratoire. Les techniques qui sont employées sont choisies en fonction de leur facilité de mise œuvre, de la nature de l'information qu'elles fournissent ainsi que de leur caractère plus ou moins invasif pour le matériau étudié.

Imagerie par caméra optique

L'utilisation de l'imagerie permet d'accéder à une information présente en surface d'une éprouvette étudiée. Ces essais sont là pour permettre de caler le modèle sur des essais. Ces essais vont, selon la technologie choisie, fournir la longueur de fissuration, le champ de déplacement (en deux ou trois dimensions).

Dans ce contexte, plusieurs techniques sont utilisées de manière courante. Cela va de l'évaluation de la longueur de fissuration par traitement d'image (figure 1.26), par corrélation d'image (Meite et al., 2009; Jin et al., 2011; Dubois et al., 2012; Méité et al., 2013) (figure 1.27) par photogrammétrie (Franke et al., 2006) ou par photolithographie (Read et al., 1993; Moulart et al., 2007; Hedan et al., 2011) (figure 1.28).

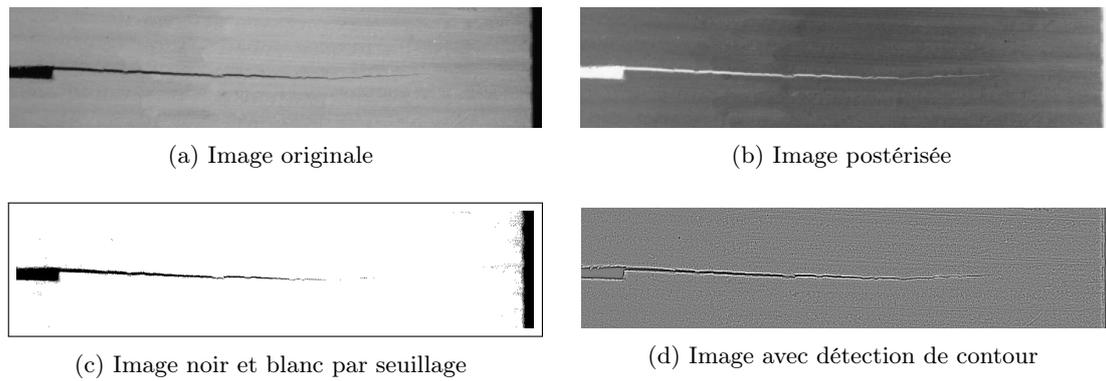


FIGURE 1.26: Détection de pointe de fissure par simple traitement d'image

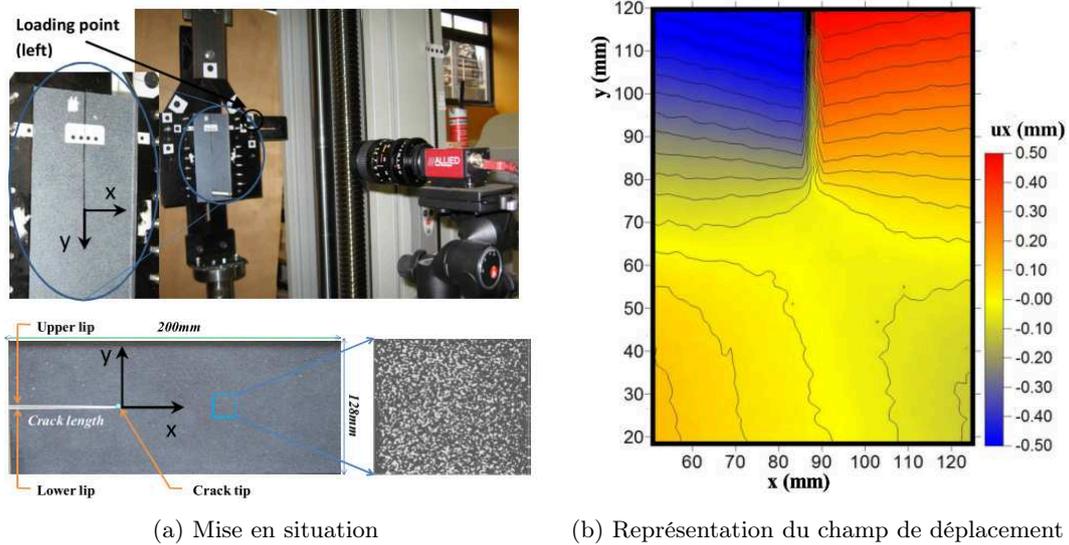


FIGURE 1.27: Corrélation d'image d'après Meite (Meite et al., 2009)

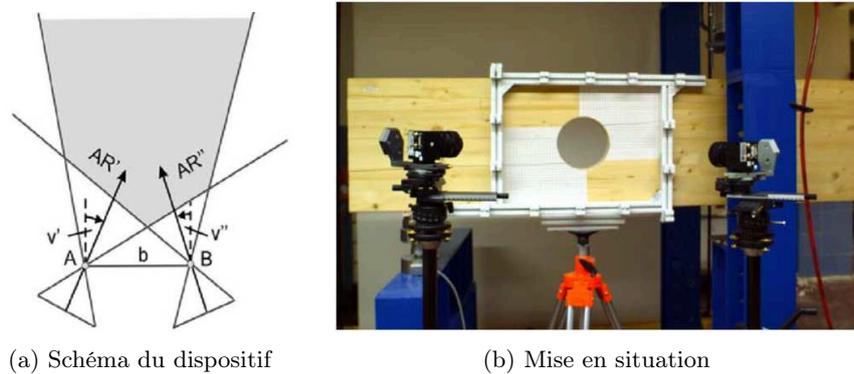


FIGURE 1.28: Photogrammétrie d'après Franke (Franke et al., 2006)

Ces techniques présentent l'avantage de ne pas interférer directement avec le matériau pendant les essais. Elles n'ont pas de caractère invasif. Par contre, elles ne permettent pas d'accéder à ce qui se passe à l'intérieur du matériau.

Thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une façon indirecte d'accéder à des dissipations internes. Il existe la thermographie passive et la thermographie active (Meinlschmidt, 2005). La différence entre les deux méthodes réside dans le fait qu'une source de chaleur (radiations IR) est nécessaire pour irradier le matériau testé (thermographie active). Les différences éventuellement (figure 1.29) présentes (défauts structuraux, variation d'humidité) seront mises en valeur par une différence de diffusivité thermique. Dans le cas de la thermographie passive, ce sont les variations de température (et d'émissivité) du matériau qui mettront en évidence des phénomènes dissipatifs comme, par exemple, la viscoélasticité, l'endommagement ou la fissuration (figure 1.30).

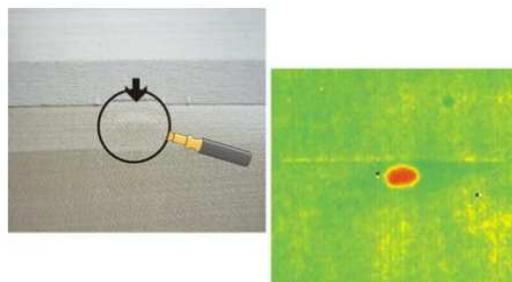


FIGURE 1.29: Cliché et thermographie d'un nœud dans du contreplaqué d'après Meinlschmidt (Meinlschmidt, 2005)

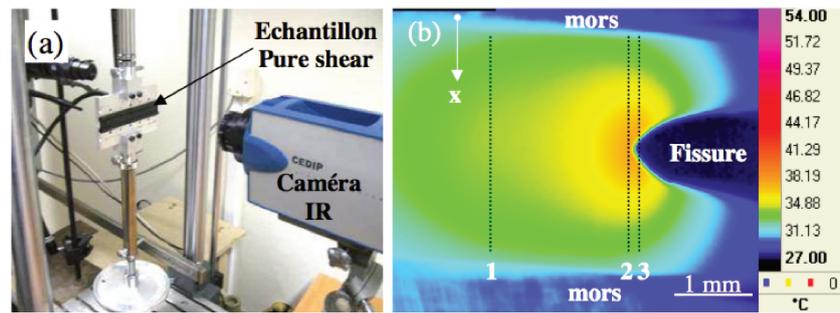


FIGURE 1.30: Utilisation de la thermographie dans la détermination des facteurs d'intensité de contrainte et de la process zone sur un élastomère d'après Mzabi (Mzabi, 2010)

Cette technique permet de détecter la présence de nœuds (sains ou non), de défauts (délaminage), de déterminer l'angle des fibres, les variations de densité, d'humidité interne dans le matériau ainsi que l'apparition de phénomènes de rupture (Bucur et al., 2002). Actuellement, cette technique est très utilisée dans l'industrie pour le contrôle non destructif des produits dans une chaîne de fabrication ainsi qu'in situ pour la détection des défauts internes des arbres sur pied.

MEB

Les essais terminés, il reste toujours la possibilité d'examiner les faciès de rupture et d'en déduire ce qui s'est réellement passé. Nous retrouvons ce type d'approche dans différents travaux (Ando et al., 2006; Navi and Sedighi-Gilani, 2006; Benabou, 2007). Bien entendu, cela nécessite de disposer d'un microscope suffisamment performant (MEB) pour accéder à des informations microscopiques (figure 4.12d).

Cette technique permet d'avoir une *photographie* de l'état de surface du matériau (figure 1.31).

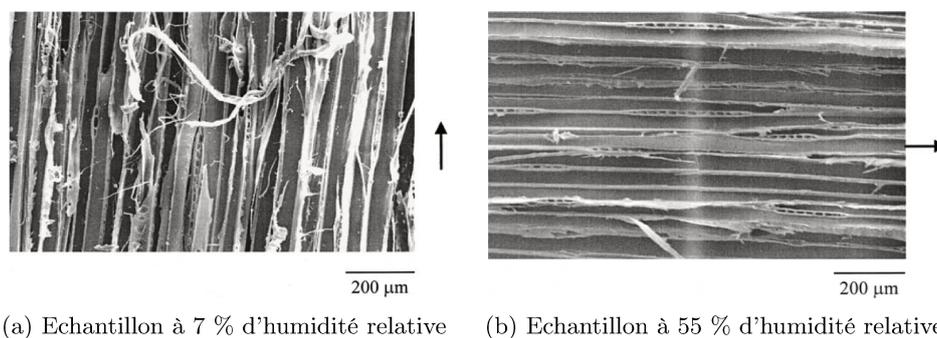


FIGURE 1.31: Faciès de rupture pour des échantillons à différents niveaux d'humidité d'après (Reiterer and Stanzl-Tschegg, 2002). Les flèches indiquent la direction principale des fibres.

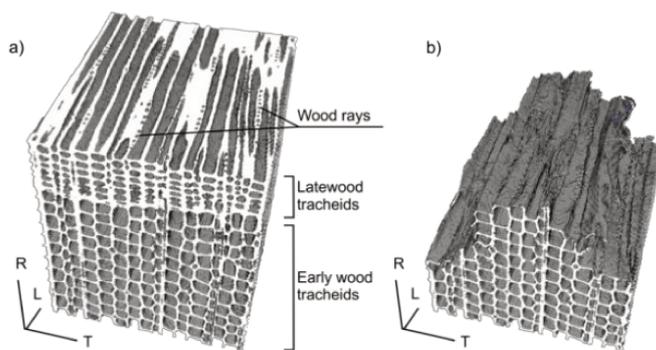
Tomographie

Si nous souhaitons connaître ce qui se passe à l'intérieur du matériau, nous pouvons utiliser d'autres techniques telle que la tomographie utilisée par Sambuelli (Sambuelli et al., 2003) ou par Baensch (Baensch, 2015).

La tomographie est une technique d'imagerie (figure 1.32) qui permet de reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures effectuées par tranche depuis l'extérieur de l'objet. Surtout dédiée à des applications en laboratoire, il reste possible d'utiliser cette technique en extérieur (figure 1.33). Son emploi est adapté à l'étude de phénomènes relativement lents ou que l'on peut stopper (ou figer) à tout moment.

Essentiellement utilisée pour l'inspection et l'étude des arbres sur pied, plusieurs techniques sont disponibles (Nicolotti et al., 2003) :

- . La tomographie par rayons x qui permet d'obtenir une bonne résolution d'image (jusqu'à $5 \mu m$).
- . La tomographie par résonance magnétique.
- . La tomographie ultrasons (technique qui nécessite un contact direct avec l'objet étudié).



(a) Tomographie d'un échantillon de bois d'après Baensch (Baensch, 2015)



(b) Tomographe

FIGURE 1.32: Tomographe (Crédit photo ENSTIB)

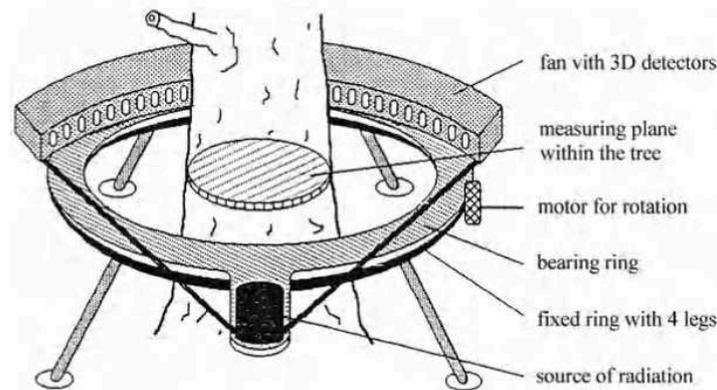
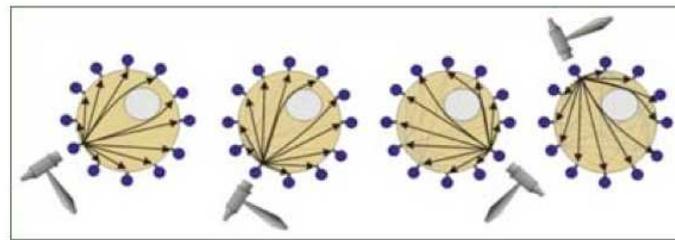


FIGURE 1.33: Tomographie in situ pour des arbres sur pied d'après (Bucur et al., 2002)

L'emploi de la tomographie à rayons X reste délicat dans la mesure où il est nécessaire d'utiliser une source radioactive. Ces matériels, très performants, ne sont décentement utilisables qu'en laboratoire. Coûteux et d'un maniement délicat, il est possible d'utiliser d'autres techniques qui permettent d'accéder aux informations à l'intérieur des matériaux. Pour cela, nous pouvons utiliser les ondes ultra sonores (Bucur et al., 2002; Baensch, 2015).

L'imagerie par ondes ultrasonores est une technique largement répandue pour déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux lors d'une inspection. La tomographie acoustique est un outil non intrusif qui permet d'ausculter aisément des supports hétérogènes (Bucur et al., 2002). De la même manière que la tomographie par rayons X, c'est l'utilisation d'ondes émises (et des ondes réfléchies) selon plusieurs directions autour d'un objet qui permet d'en reconstruire une coupe (figure 1.34).

La reconstruction de l'image est faite par l'étude des vitesses de propagation des impulsions ultrasonores qui traversent l'objet. Cette technique est aussi employée en géophysique pour reconstituer les profils géologiques d'un sol pour détecter d'éventuelles cavités sous un ouvrage (Nicolotti et al., 2003; Ross et al., 1998).



(a) principe de la tomographie ultrasonore



(b) reconstruction de l'intérieur d'un arbre par tomographie ultrasonore

FIGURE 1.34: Emploi de la tomographie ultrasonore dans l'inspection des arbres sur pieds (Crédit photo PICPUS)

Émission acoustique

Parmi les méthodes d'essai non destructives, il existe une technique globale et rapide : l'EA. Cette méthode est basée sur l'étude de la libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant de petits déplacements à l'intérieur d'un matériau (fissure, corrosion, délaminage, etc.). Une description détaillée de la technique de l'EA est disponible en annexe (annexe A, page 202). Il s'agit d'une méthode passive qui permet de suivre la progression de l'endommagement, ou d'une fissure, en temps réel. Elle est adaptée à l'inspection des grandes structures tout en minimisant les temps d'intervention et les arrêts de production couteux.

L'EA est très largement utilisée dans l'étude des matériaux composites et des alliages. Son emploi est maintenant courant dans des structures où la moindre défaillance (rupture) peut avoir des conséquences humaines et financières dramatiques. Le bois étant lui-même, par nature, un matériau composite, il est normal que son emploi commence à se développer.

4 Usage de l'émission acoustique : les matériaux bois et composites

Le but de ce travail de thèse est d'étudier de quelle manière les résultats obtenus avec l'EA sur des matériaux composites peuvent être transposés au bois en tant qu'outil de diagnostic. Le défi est de taille : passer d'un matériau industriel dont les caractéristiques physiques sont connues et maîtrisées à un matériau naturel hétérogène.

4.1 Application au matériau bois

L'utilisation de l'émission acoustique n'est pas nouvelle mais son développement et son utilisation dans le bois n'ont pas connu le même engouement que pour les matériaux composites, du moins au début. Plusieurs champs d'investigation ont été explorés ([Bucur, 2006](#)).

L'inspection des arbres sur pieds. Grâce à l'EA, il est possible de déterminer si un arbre présente des défauts internes (cavités, pourriture, humidité importante), sans endommager celui-ci. Selon la nature et l'importance de ces défauts, une action d'abattage peut être envisagée.

Le contrôle du séchage du bois ([Kowalski and Smoczkiwicz, 2004](#)). Le séchage d'une pièce de bois modifie l'équilibre des contraintes internes. Une variation trop importante de l'activité acoustique peut être le signe de l'apparition d'un endommagement. Il est ainsi possible de réduire la durée de séchage sans dégrader la qualité du matériau en jouant sur sa cinétique.

Le contrôle de l'usure des outils de coupe du bois. Dans une démarche de qualité, il est intéressant de déterminer assez tôt si les fers d'une machine outils sont usés. L'EA devient alors un élément de contrôle dans une chaîne de production, et ce, dans le cadre de l'usinage traditionnel mais également de l'usinage à grande vitesse.

Le facteur d'instrument use de son expérience pour utiliser diverses essences de bois afin d'obtenir une sonorité spécifique tout en faisant de l'instrument un objet agréable à l'emploi et au regard. Depuis, des recherches ont été menées pour identifier les caractéristiques mécaniques du matériau qui peuvent aider à la compréhension de ces choix.

L'enregistrement de l'activité acoustique pendant des essais ([Svobodova and Svoboda, 2012](#); [Varner et al., 2012](#)) et son analyse a posteriori. L'émission acoustique étant une technique CND très prometteuse, il est donc logique de la retrouver lors d'essai mécaniques.

Dans ce domaine, plusieurs avancées ont été faites. Berg et Gradin (Berg and Gradin, 2000) ont utilisé l'EA pour étudier le phénomène de fissuration sur des éprouvettes d'Épicéa testées en compression. Une attention particulière a été portée sur l'influence de la température, la teneur en eau et le mode de chargement. Ces résultats montrent que le module d'élasticité, la résistance à la compression et le cumul du nombre d'événements acoustiques diminuent lorsque la température augmente (figure 1.35).

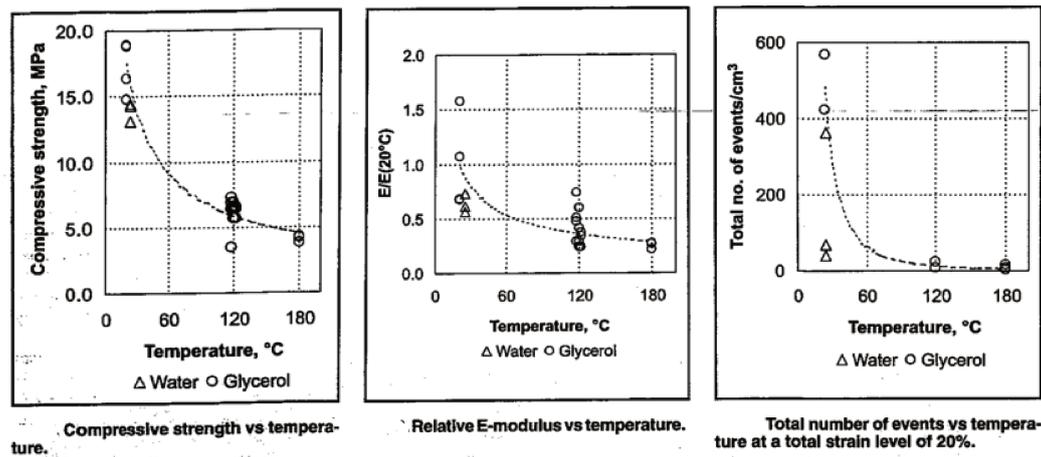


FIGURE 1.35: Effets de la température sur le module d'élasticité, la résistance à la compression et le cumul du nombre d'événements acoustiques avec la température d'après (Berg and Gradin, 2000) pour des éprouvettes d'Épicéa imprégnées d'eau ou de glycérol

Landis et Whittaker (Landis and Whittaker, 2000) ont comparé l'énergie de fissuration mise en jeu lors d'un chargement en mode I lors de la propagation des fissures avec l'énergie acoustique et mis en évidence une bonne corrélation entre elles (figure 1.36). Une étude comparative faite sur des résineux et des feuillus soumis au même mode de chargement a été réalisée par Reiterer (Reiterer et al., 2000) (figure 1.37). Les paramètres acoustiques qui ont été retenus sont les coups cumulés, l'amplitude et des spectres de fréquence. Il apparaît que le nombre de coups acoustiques enregistrés jusqu'à ce que la force soit maximale était plus important pour les résineux que pour les feuillus.

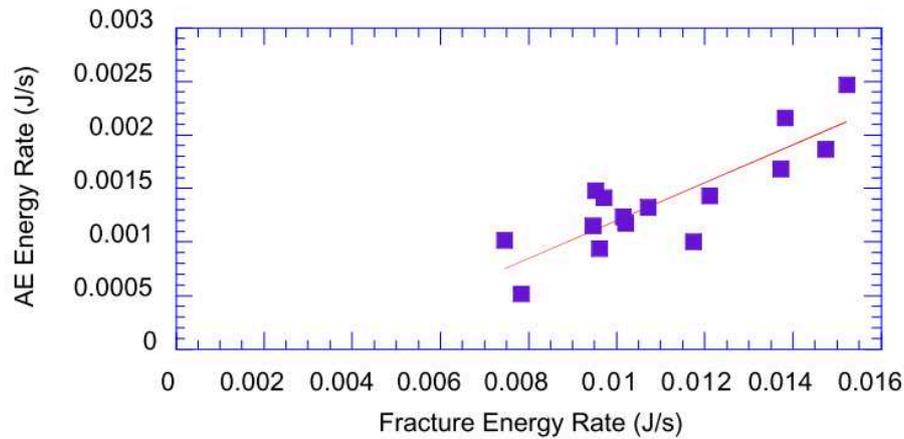


FIGURE 1.36: Comparaison du taux de restitution d'énergie et du taux d'énergie acoustique d'après (Landis and Whittaker, 2000)

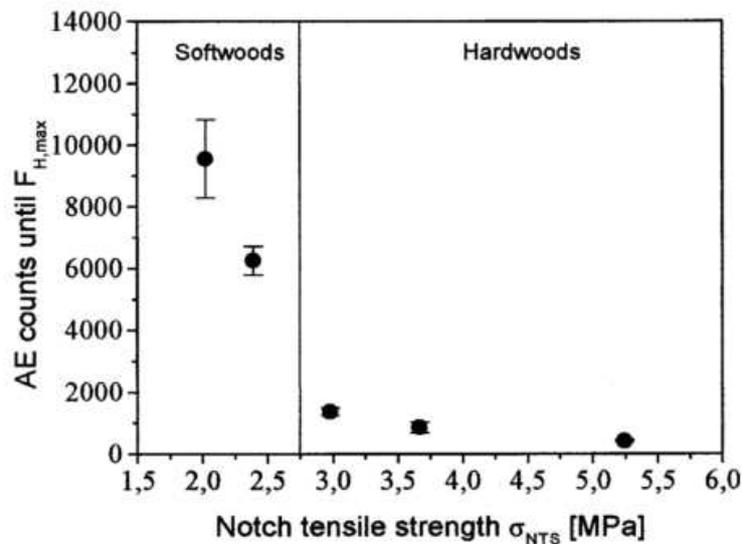


FIGURE 1.37: Nombre de coups jusqu'à la force maximale, pour des résineux et des feuillus d'après (Reiterer et al., 2000)

Ceci s'explique par le fait que les résineux ont un comportement plus ductile. Une zone d'élaboration plus importante est présente en amont de la pointe de fissure et présente un grand nombre de micro-fissures. Il a également été mis en évidence que la différenciation entre la formation de microfissures et de propagation de fissure pouvait être réalisée sur la base des coups cumulés et des amplitudes acoustiques.

Aicher ([Aicher et al., 2001](#)) a proposé une représentation de l'évolution des dommages dans des éprouvettes d'Épicéa, soumises à de la traction perpendiculairement au sens des fibres, grâce à l'EA. Une localisation 2D a été réalisée grâce à six capteurs disposés sur des surfaces planes opposées. Durant l'essai, un phénomène acoustique bien distinct a été localisé à un endroit qui coïncide à une zone, théoriquement, fortement sollicitée.

Ando ([Ando et al., 2006](#)) a examiné le processus de micro-rupture par cisaillement dans du vieux bois en comparant les caractéristiques des données acoustiques avec la faciès de rupture observé à l'aide d'un MEB. Le but de cette étude est de comprendre les phénomènes de déformation et de rupture ayant lieu. Les résultats obtenus indiquent que le nombre d'évènements acoustiques apparaissant à de faible niveau de charge est plus important dans du bois ancien que dans du bois jeune.

Chen ([Chen et al., 2006](#)) a utilisé l'EA pour suivre la rupture d'éprouvettes réalisées en feuillus et en résineux lors d'essais de fluage et de fatigue en torsion. Lors des essais de fluage, une activité acoustique a été détectée avant qu'une fissure ne soit visible à l'œil nu. Cela suggère que des micro-fissures ont été à l'initiation de la fissure visible. Cette constatation est corroborée par des observations microscopiques. Les feuillus ont produit plus d'évènements acoustiques que les résineux. Cette même activité est influencée par l'angle des fibres des éprouvettes. Lors des essais de torsion en fatigue, une augmentation de l'activité acoustique a été le signe de la l'apparition de micro-fissures.

Brunner ([Brunner et al., 2006](#)) a effectué des essais de traction sur deux types d'échantillons en stratifié. Les représentations cumulées de plusieurs paramètres acoustiques, en fonction du temps ou du chargement, ont une allure exponentielle. La constante de temps de ces courbes (exponentielles) est dépendante du matériau. Nous retrouvons le même type de conclusion pour les matériaux composites.

Svobodova ([Svobodova and Svoboda, 2012](#)) a expérimenté l'EA comme outil d'évaluation de l'endommagement dans le bois. Différents types de chargements mécaniques (flexion à trois points, éprouvettes CT, etc.) ont été proposés pour trois espèces de résineux. Les essences de bois étudiées (Sapin, Épicéa et Pin) avaient des caractéristiques mécaniques différentes, en concordance avec le niveau d'activité d'EA. En outre, la détection de la position de la fissure dans les échantillons a pu être réalisée à l'aide de deux capteurs.

Dans une étude destinée à identifier les mécanismes à l'origine des sources d'EA, Varner ([Varner et al., 2012](#)) a utilisé une méthode aux éléments finis (FEM) pour générer une simulation d'essai de flexion trois points et ainsi estimer l'amplitude des sources ultrasonores. D'après la simulation, des signaux de forte amplitude sont supposés apparaître dans l'échantillon à deux endroits : sous le point de chargement (pendant toute la durée de l'essai de flexion), et dans la partie en traction, au milieu de l'échantillon sur sa face inférieure (au moment de la rupture).

L'EA permet d'enregistrer beaucoup d'informations (annexe A, page 205). L'usage de ces informations se fera en fonction du but recherché. L'EA sert-elle à surveiller et prévenir une éventuelle chute de performance mécanique ou sert elle à caractériser un état d'endommagement ? Les avancées réalisées en EA dans le bois suivent celles qui ont été réalisées dans les matériaux composites.

On peut considérer que le bois est un matériau composite (Ritschel et al., 2013), et que nous y retrouverons les mêmes types d'endommagements que l'on peut rencontrer dans ces matériaux.

4.2 Application aux matériaux composites

Les premiers travaux de recherche effectués sur les matériaux composites ont mis en évidence des corrélations entre des grandeurs mécaniques et des données acoustiques. Les premières corrélations intéressantes ont été faites entre le taux de restitution d'énergie (G_c) et des paramètres issus des enregistrements acoustiques : les coups (cumulés ou sous forme de ratio) (Dunegan et al., 1968; Dunegan and Harris, 1969; Jinen, 1985; Jinen, 1990).

Ce n'est qu'à partir du milieu des années 90 et surtout avec la montée en puissance des performances de l'outil informatique que les classifications sont apparues. Elles furent d'abord manuelles (Jinen, 1985; Groot et al., 1995; Wevers, 1997) puis automatisées.

Depuis, les différents travaux n'ont eu de cesse de chercher à classer les différents signaux acoustiques enregistrés et de les relier à des phénomènes d'endommagement que l'on pouvait constater au sein de la structure (au niveau des fibres, de la matrice). Dans certains cas, cette identification a été associée à différentes techniques :

- . Etudes fréquentielles (Etude des fréquences, FFT, Ondelettes) (Qi, 2000; Dzenis and Qian, 2001; Ni and Iwamoto, 2002; Pappas et al., 2004; Ramirez-Jimenez et al., 2004; Bussiba et al., 2007; Marec et al., 2008; Kumar et al., 2013).
- . Analyse des formes d'onde et reconnaissance de forme (Marec et al., 2008).
- . Analyse par Composantes Principales, et utilisation d'algorithmes de segmentation (Philippidis et al., 1998; Godin et al., 2004; Moevius et al., 2008; Godin et al., 2011; Godin et al., 2013).
- . Localisation des évènements (Huguet, 2002).

L'identification des phénomènes acoustiques permet de faire des familles au sein des données acoustiques, mais gardons à l'esprit que ces familles ne sont que des résultats statistiques. Si nous souhaitons les relier à des phénomènes physiques, il faut trouver des caractéristiques dans chacune d'elles qui permettront de les identifier à coup sûr.

Selon les études (et surtout selon les moyens d'investigation et de traitement des données disponibles au moment de leur réalisation) plusieurs types de classifications sont

possibles. Dans la plupart des cas, cette classification a été corrélée à des observations réalisées au microscope sur le front de fissuration des éprouvettes testées.

Ces classifications tentent, selon le mode de chargement, d'identifier ou de caractériser les différents modes de ruine possibles (figure 1.38).

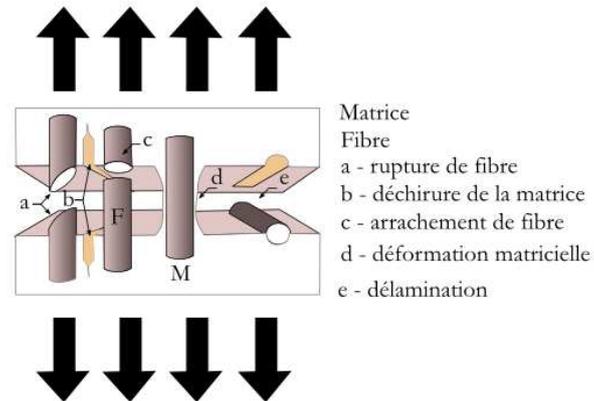


FIGURE 1.38: Modes de rupture dans les matériaux composites d'après (Dogossy and Czigány, 2006)

Les premières classifications ont été faites à l'aide de niveaux d'amplitude (Barr and Benzeggagh, 1994; Philippidis et al., 1998).

D'autres classifications (et donc identification de mécanismes) ont été proposées sur la base des fréquences enregistrées (Groot et al., 1995; Ni and Jinen, 1997; Wevers, 1997; Dzenis and Qian, 2001; Huguet, 2002; Ramirez-Jimenez et al., 2004; Kumar et al., 2013).

Grâce à l'outil informatique et le développement des méthodes de classifications statistiques, d'autres descripteurs ont été rajoutés pour permettre une identification plus fine des phénomènes : l'énergie (Qi, 2000; Ni and Iwamoto, 2002; Moevius et al., 2008), la durée des signaux (Bussiba et al., 2007).

Enfin, l'étude des formes d'ondes des signaux enregistrés a permis de mettre en évidence 4 types d'endommagements (Godin et al., 2004; Godin et al., 2005; Godin et al., 2006) (tableau 1.6). Quatre familles ont été identifiées lors des différents essais. Nous retrouvons les types suivants :

- . **Type a** : rupture de la matrice.
- . **Type b** : décollement des fibres.
- . **Type c** : rupture de fibre.
- . **Type d** : décohésion.

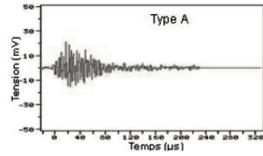
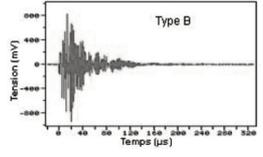
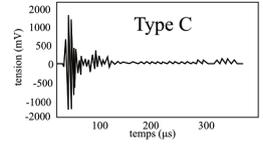
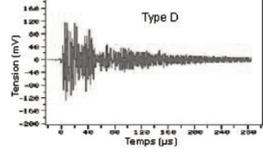
Type	Temps de montée	Durée de signal	Décroissance du signal	Type du signal	Forme du signal
a	Moyen	Moyenne	Lente	Résonnant	
b	Court	Moyenne	Courte	Impulsionnel	
c	Court	Courte	Courte	Impulsionnel	
d	Lent	Très longue	Lente	Résonnant	

Tableau 1.6: Formes d'ondes pour différents mécanismes d'endommagement

4.3 Application aux fibres naturelles

Avec la nécessité de trouver des matériaux plus respectueux de l'environnement, les spécialistes des matériaux composites se sont tournés vers les fibres naturelles. La difficulté rencontrée porte essentiellement sur la nature orthotrope, le caractère hydrophile et le côté *naturel* des fibres *naturelles*. Ce dernier point est important et en constitue une des spécificités : une grande variabilité dans leurs dimensions, leur composition et leur structure.

Les études des fibres naturelles dans les matériaux composites sont nettement moins nombreuses que pour les composites traditionnels. Nous retrouvons essentiellement :

- . Des études portant sur une approche globale. Etude de l'activité acoustique et de l'état du matériau durant le chargement (Shin et al., 1989; Aicher et al., 2001).
- . Localisation des événements (Aicher et al., 2001).
- . Classification et identification (Dogossy and Czigany, 2006; Bonnafous et al., 2009).

Les expérimentateurs se heurtent aussi à la difficulté de caractériser les mécanismes d'endommagement.

Les premières classifications qui ont été proposées se sont naturellement faites par niveaux d'amplitude (Dogossy and Czigány, 2006; Bonnafous et al., 2009; Scida et al., 2011), par bandes de fréquence (Aicher et al., 2001; Jakiela et al., 2007) et par niveaux d'énergie (Kowalski and Smoczkiwicz, 2004).

Nous retrouvons également quelques études utilisant les outils statistiques dans les travaux de (Lee et al., 1996; Schniewind et al., 1996; Baensch, 2015). Il apparaît que la localisation et la discrimination des événements acoustiques, en vue d'une caractérisation des mécanismes d'endommagement développés pour les composites, restent tout à fait possibles et transposables aux fibres naturelles. Les descripteurs fondés sur les fréquences restent de première importance (De Rosa et al., 2009).

Dans le cadre des matériaux composites à base de fibres naturelles, nous retrouvons une typologie d'endommagements similaires à ceux des matériaux composites traditionnels (De Rosa et al., 2009) (figure 1.39).

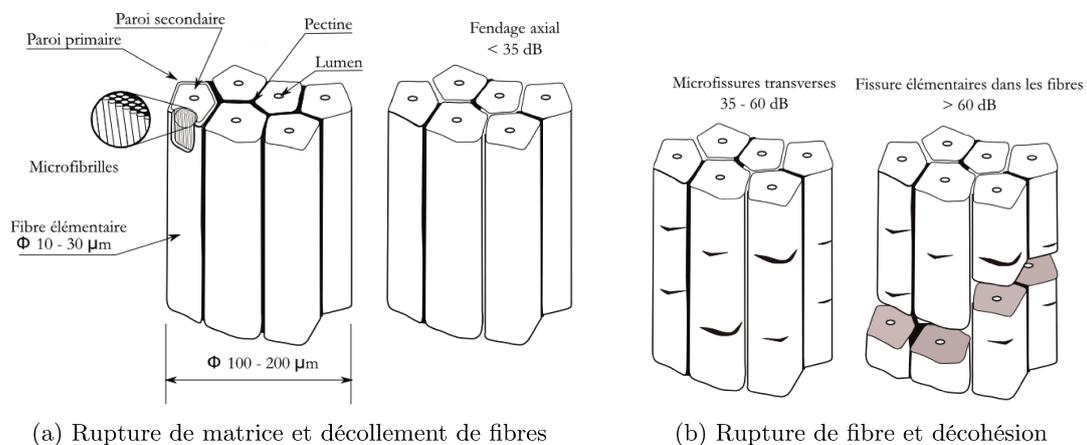


FIGURE 1.39: Structure d'une fibre de lin et modes de ruine d'après (De Rosa et al., 2009)

5 L'émission acoustique et ses limites

5.1 Vitesse de propagation des ondes

Une des particularités du bois est son orthotropie. Elle se caractérise, en autres, par une variation des vitesses de propagation des ondes sonores selon les directions principales du matériau. Des mesures de vitesse de propagation des ondes dans le bois ont déjà été réalisées (Bucur, 2006) et sont données à titre d'exemple dans le tableau 1.7.

Essences	Densité [kg/m ³]	Vitesses ultrasoniques [m/s]					
		V _{LL}	V _{RR}	V _{TT}	V _{RT} = V _{TR}	V _{LT} = V _{TL}	V _{LR} = V _{RL}
Érable	623	4 695	2 148	1 878	630	1 148	1 350
Douglas Fir	440	5 500	2 330	1 990	560	1 660	1 622
Épicéa	485	5 353	1 580	1 146	477	1 230	1 322

Tableau 1.7: Valeurs de vitesses de propagation d'onde ultrasonores pour quelques essences de bois

Une étude un peu plus approfondie, sur les différents modes de propagation des ondes, a montré que le bois restait un matériau complexe dans ce domaine. Il en ressort que les ondes de cisaillement sont peu affectées par l'anisotropie du bois alors que les ondes longitudinales y sont très sensibles.

Le bois possède une orthotropie naturelle qui rend la localisation des événements plus complexe notamment à cause d'une vitesse de propagation des ondes de compression variant en fonction de l'angle avec les fibres. Depuis 1921, Hankinson (Kabir, 2001) développa une formule pour le compte de l'US ARMY pour prédire la contrainte résistante en fonction de cet angle. Il en découla d'autres équations qu'il appliqua pour évaluer le module d'élasticité ainsi que la vitesse de propagation des ondes ((1.32) à (1.34)).

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_0 \cdot \sigma_{90}}{\sigma_0 \cdot \sin^2 \alpha + \sigma_{90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (1.32)$$

$$E_{\alpha} = \frac{E_0 \cdot E_{90}}{E_0 \cdot \sin^2 \alpha + E_{90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (1.33)$$

$$V_{\alpha} = \frac{V_0 \cdot V_{90}}{V_0 \cdot \sin^2 \alpha + V_{90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (1.34)$$

Ces formules sont efficaces pour la plupart des essences de bois. Une équation plus générale a été formulée comme suit :

$$P_{\alpha} = \frac{P_0 \cdot P_{90}}{P_0 \cdot \sin^n \alpha + P_{90} \cdot \cos^n \alpha} \quad (1.35)$$

Où : n varie de 1,5 à 2 et est à déterminer expérimentalement, P_{α} représente la grandeur évaluée pour un angle α , P_0 représente la grandeur évaluée parallèlement à l'angle des fibres, P_{90} représente la grandeur évaluée perpendiculairement à l'angle des fibres et α est l'angle fait avec l'axe des fibres.

Toujours selon Kabir (Kabir, 2001), d'autres équations ont été utilisées sur des éprouvettes d'Hévéa. Il en ressort que si la formule d'Hankinson donne une bonne corrélation avec les mesures expérimentales, d'autres formules comme les équations d'Osgood et de Jacoby étaient des alternatives possibles à condition d'en adapter les différents paramètres.

$$V_{\alpha} = \frac{V_0 \cdot V_{90}}{V_0 \cdot \sin^n \alpha + V_{90} \cdot \cos^n \alpha} \quad (1.36)$$

$$V_{\alpha} = \frac{V_0 \cdot V_{90}}{V_0 + (V_0 - V_{90}) (\sin^n \alpha + a \cdot \cos^n \alpha) \cdot P_{90} \cdot \sin^n \alpha} \quad (1.37)$$

$$V_{\alpha} = V_0 \cdot \cos^n \alpha + V_{90} \cdot \sin^n \alpha \quad (1.38)$$

$$V_{\alpha} = A + B \cdot \alpha + C \cdot \alpha^2 \quad (1.39)$$

$$V_{\alpha} = A + \frac{B}{\alpha} + \frac{C}{\alpha^2} \quad (1.40)$$

Dans les équations (1.39) et (1.40), A, B et C sont des constantes de régression à déterminer.

$$V_{\alpha} = \frac{V_0 + V_{90}}{2} - \frac{V_0 - V_{90}}{2} \cdot \cos(180 - 2 \cdot \alpha) \quad (1.41)$$

Dans les équations ((1.36) à (1.40)), nous retrouvons les formules de Hankinson (1.36), Osgood (1.37), Jacoby (1.38), par approche parabolique (1.39), par approche hyperbolique (1.40) et une approche sismique simplifiée (1.41). A titre d'exemple la figure 1.40 donne une représentation graphique de certaines de ces expressions.

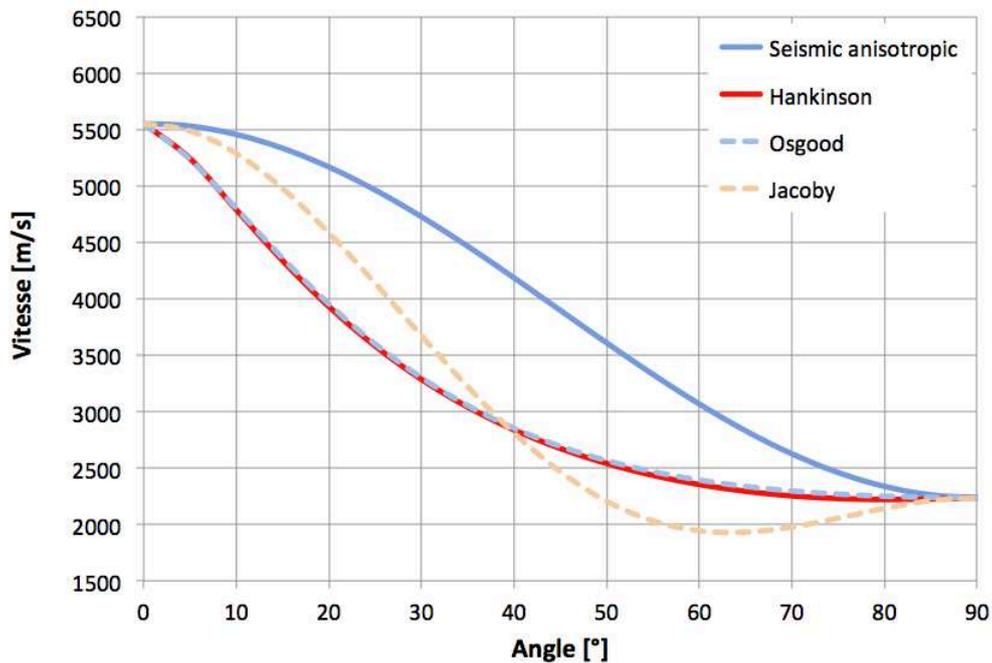


FIGURE 1.40: Variation de la vitesse selon l'angle de propagation des ondes de compression par rapport au sens des fibres

Dans les travaux de Clouston ([Clouston, 1989](#)), d'autres modélisations sont évoquées (théorie de Hankinson (1921), théorie de Hill (1948), de Norris (1950), de Tsai-Hill (1965) et de Tsai-Wu (1971)).

5.2 Analyse multivariable

Lorsque l'on utilise l'EA comme moyen d'investigation, nous nous retrouvons avec un nombre important de données à traiter. A partir de ces données et de leurs formes d'ondes, sont calculés des paramètres qui vont nous renseigner sur les phénomènes s'y rapportant (une description des descripteurs usuels est disponible en annexe A à la page 205). A titre d'exemple voici des descripteurs obtenus pour des données enregistrées (figure 1.41).

Caractéristiques

66,779 observations of 23 variables									
Item	Time	Event_X_Location	Channel	Parametric_1	Parametric_2	Risetime	Counts_to_Peak	Counts	Energy
1	0	55.86281	NA	1	0.9281331	4.818867	0	1	0
2	1	58.27425	NA	1	0.9661123	4.224067	0	1	0
3	2	58.31478	NA	1	0.9616382	4.227424	1	1	0
4	3	60.36769	NA	1	0.9949034	4.409009	1	1	0
5	4	62.05878	-4.000000e+00	1	1.0229900	4.558245	1	1	2
6	5	62.05888	-4.000000e+00	2	1.0223700	4.560381	0	1	0
7	6	63.06681	NA	1	1.0403760	4.645222	2	1	6
8	7	63.76028	NA	1	1.0507520	4.704428	2	1	4
9	8	64.17653	NA	1	1.0574660	4.742882	41	4	5
10	9	65.06529	NA	1	1.0730310	4.820093	1	1	7
11	10	66.18922	-4.000000e+00	1	1.0934780	4.917448	1	1	9
12	11	66.18926	-4.000000e+00	2	1.0925630	4.917753	0	1	0
13	12	66.27481	NA	1	1.0934780	4.925382	1	1	4
14	13	66.64845	NA	1	1.1004970	4.959258	1	1	5
15	14	66.80308	NA	1	1.1029390	4.974212	1	1	19

FIGURE 1.41: Exemple d'extraction de données acoustiques

Principe

Si on reprend les termes propres aux études statistiques (Saporta, 2006), nous sommes en présence d'individus à étudier qui vont être caractérisés par des variables qualitatives et/ou quantitatives (continues – toute valeur dans \mathbb{R} est possible), ou discrètes (seules quelques valeurs sont possibles).

On peut chercher à segmenter les données afin de les regrouper par mécanismes d'endommagement. Lorsque le nombre des données devient important, il n'est plus possible, ni souhaitable, de faire un *tri à la main*. Nous devons passer par l'analyse statistique multivariable qui va nous permettre de définir des ressemblances ou des différences entre des individus (salves ou évènements).

Si l'on reprend les différents aspects d'une analyse multi variable dans la littérature (Besse, 2002; Marec et al., 2008; Marec, 2008), on se rend compte, qu'au-delà de 3 dimensions, il devient très difficile de se faire une représentation (graphique) des données à étudier.

Parmi les méthodes et outils que les statistiques offrent, il est possible d'utiliser des méthodes de classification non supervisées (aussi appelée clustering). Pour composer des groupes d'individus (évènements acoustiques) similaires (par exemple caractéristiques d'un même mécanisme d'endommagement), nous devons procéder en plusieurs étapes.

Dans un premier temps il faut effectuer une classification des variables, une Analyse par Composantes Principales (ACP). Cette classification va permettre d'obtenir des classes de variables liées et redondantes. De cette façon, on détermine les variables les

plus pertinentes et surtout, on évite toute redondance qui aurait pour conséquences un ralentissement du traitement des données et une erreur dans leur segmentation. L'ACP est une méthode d'analyse des données qui va nous permettre de transformer les variables retenues en de nouvelles variables décorréélées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont ainsi nommées « composantes principales » ou axes principaux.

Dans un second temps, l'utilisation d'un algorithme de partitionnement de données est nécessaire. A l'heure actuelle, beaucoup de travaux portent sur des méthodes basées sur les centroïdes (k-moyennes, k-medoids ou k-means en anglais) (Huguet, 2002; Marec et al., 2008; Hamdi, 2013). L'algorithme des k-moyennes va nous permettre, à partir du travail de partitionnement, de grouper les individus en minimisant la distance entre les points à l'intérieur de chaque partition. Le succès de cet algorithme est très dépendant du nombre de classes que l'on souhaite obtenir et du nombre de variables prises en compte. Cet algorithme trouve toujours une solution (un minimum local) mais rien ne dit que la solution trouvée soit celle recherchée. De plus, à chaque utilisation de cet algorithme sur un jeu de données, le résultat obtenu est toujours différent. La solution à retenir est celle qui paraît la plus *juste* (ou pertinente). Cette méthode ne peut donc pas être qualifiée de robuste.

Une autre méthode de classification automatique des données peut être utilisée : la méthode de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Il s'agit d'effectuer une classification itérative selon un principe relativement simple :

- . Commencer par calculer la dissimilarité entre N objets.
- . Regrouper deux objets dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets.
- . Calculer ensuite la dissimilarité entre cette classe et les N-2 autres objets en utilisant le critère d'agrégation. Ensuite on regroupe les deux objets ou classes d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation.
- . Continuer ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés.

Ces regroupements successifs produisent un arbre de classification (dendrogramme), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions. L'avantage de la CAH est qu'il s'agit d'une méthode de classification qui travaille à partir des dissimilarités entre les objets que l'on veut regrouper, ces dissimilarités pouvant être choisies.

Préparation des données

De nombreux travaux, notamment réalisés sur des matériaux composites, traitent de l'utilisation des techniques d'analyse statistique multivariée (Huguet, 2002; Godin et al., 2004; Moevius et al., 2008; Le Gall et al., 2013). Ces techniques permettent de différencier et de classer des signaux en tenant compte de plusieurs descripteurs.

Se pose à présent le choix de descripteurs pertinents. En effet, l'un des prérequis à toute procédure de segmentation réside dans le fait d'utiliser des descripteurs adaptés et en quantité suffisante :

- . **Trop** de descripteurs, et des signaux seront, à tort, considérés comme similaires.
- . **Pas assez** de descripteurs, et des signaux seront, à tort, considérés comme différents.

En règle générale, il convient de conserver un minimum de descripteurs parmi tous ceux calculés initialement. Ensuite, il est toujours possible d'en calculer de nouveaux, tableaux 1.8 et 1.9.

N°	Descripteur	Notation	N°	Descripteur	Notation
1	Durée [μs]	D	8	Fréquence de montée [kHz]	$FM = \frac{P}{M}$
2	Amplitude [dB]	A	9	Energie [unité arbitraire]	E
3	Nombre de coups	C	10	Energie relative [aJ/dB]	E/A
4	Temps de montée	[μs]	11	Tension efficace [V]	V
5	Fréquence moyenne [kHz]	$F = \frac{C}{D}$	12	Fréquence de pic [kHz]	Fp
6	Nombre de coups au pic	P	13	Fréquence moyenne [kHz]	Fc
7	Fréquence de réverbération [kHz]	$FR = \frac{C-D}{D-M}$	14	Energie absolue [aJ]	
			15	Force de signal [Vs/MHZ]	

Tableau 1.8: Descripteurs courants en émission acoustique issus de la norme NFA 09-350

N°	Descripteur	Notation	N°	Descripteur	Notation
1	Temps de montée relatif	M/D	3	$\log(\text{Durée})$	D_{ln}
2	Durée / Amplitude [$\mu s/dB$]	D/A	4	$\log(\text{Energy})$	E_{ln}
3	Temps de descente [μs]	D-M	5	$\log(\frac{\text{Temps de montée}}{\text{durée}})$	R/D_{ln}
4	Angle de montée [$dB/\mu s$]	A/M	6	$\log(\frac{\text{Durée}}{\text{Amplitude}})$	
5	Angle de descente [$dB/\mu s$]	A/(D-M)	7	$\log(\text{Temps de descente})$	DT_{ln}
6	Temps de montée sur descente	M/(D-M)	8	$\log(\frac{\text{Amplitude}}{\text{Temps de montée}})$	A/R_{ln}
7	Nombre de coups au pic relatif	P/C	9	$\log(\frac{\text{Amplitude}}{\text{Temps de descente}})$	A/DT_{ln}
8	Amplitude sur fréquence [dB/kHz]	A/F	10	$\log(\frac{\text{Temps de montée}}{\text{Temps de descente}})$	R/DT_{ln}
9	$\log(\text{Temps de montée})$	R_{ln}	11	$\log(\frac{\text{Energie}}{\text{Amplitude}})$	E/A_{ln}
10	$\log(\text{nombre de coups})$	C_{ln}	12	$\log(\frac{\text{Amplitude}}{\text{Fréquence moyenne}})$	E/F_{ln}

Tableau 1.9: Descripteurs supplémentaires d'après les travaux de (Moevius et al., 2008) et (Sibil, 2011)

Classification des variables - objectifs et illustrations

Dans des travaux récents, le choix des descripteurs apparaît comme un point à ne pas négliger si on souhaite effectuer une bonne segmentation des données (Godin et al., 2011). Dans le cadre de travaux de Moevius (Moevius et al., 2008), une démarche spécifique a été réalisée pour juger de la pertinence des nouveaux descripteurs. Cela passe par une Analyse par Composante Principale et/ou une classification des variables qui permettra de mettre en évidence d'éventuelles redondances ou indépendances de variables (figure 1.42).

L'objectif de la classification des variables est d'obtenir des classes liées redondantes. Ainsi, selon les données à disposition, il est possible de travailler avec des variables quantitatives et/ou qualitatives.

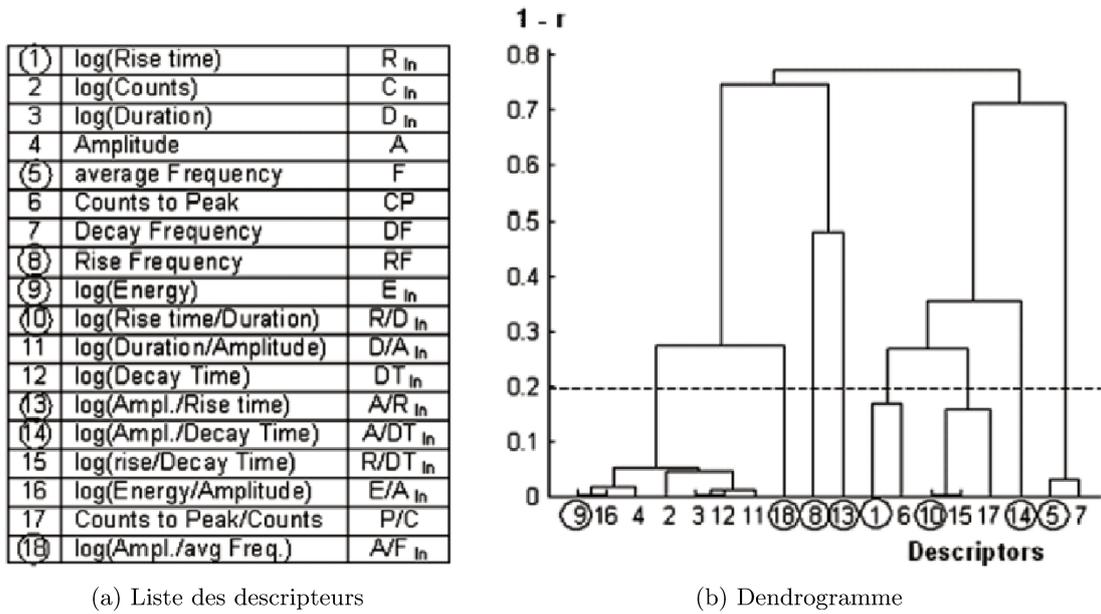


FIGURE 1.42: Dendrogramme de corrélation des descripteurs

A titre d'exemple reprenons quelques descripteurs courants utilisés en émission acoustique tels que l'amplitude, le temps de montée, l'énergie, les coups, la durée . . . et ajoutons-y d'autres variables telles que le seuil, la force et le déplacement enregistrés lors de l'essai mécanique. Le seuil est une valeur fixe d'acquisition des données qui ne varie pas durant l'essai. De la même façon, les données liées à la force et au déplacement ne sont pas propres au matériau ou à l'éprouvette testée. Il paraît donc tout à fait logique de ne pas les utiliser. C'est exactement ce que donne, comme renseignement, le cercle de corrélation (figure 1.43a) et le dendrogramme (figure 1.43b) appliqués à ces variables.

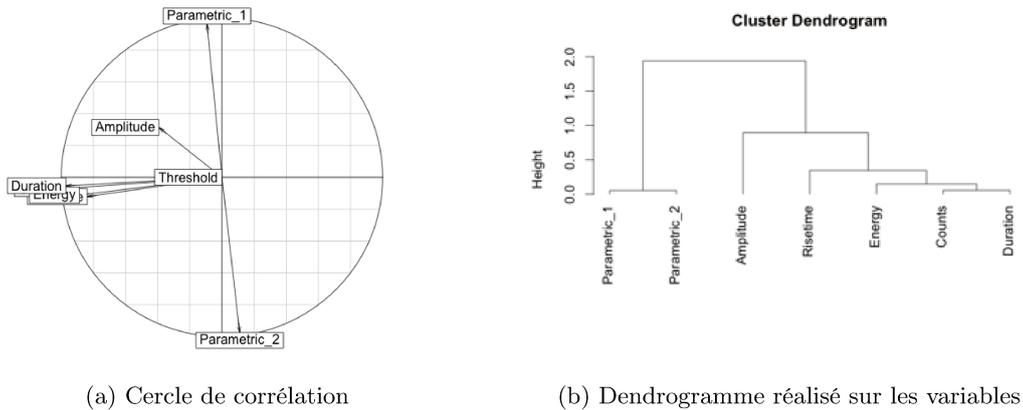


FIGURE 1.43: Dendrogramme de corrélation des descripteurs

Le seuil se trouve au centre du cercle de corrélation : il n'est donc corrélé à aucune autre variable étudiée. La force et le déplacement (Parametric_1 et Parametric_2) sont complètement décorrélés de l'énergie et de la durée (orthogonalité sur le cercle) mais corrélés négativement entre eux (en opposition). Nous retrouvons à peu près ce même type d'information sur le dendrogramme (figure 1.43b). L'information affichée est plus claire concernant le degré de corrélation entre les variables mais ne montre pas forcément les oppositions. Ce type de graphique doit permettre de choisir le nombre de variables (ou groupes de variables) à prendre en compte.

Choix du nombre de classes à retenir

Afin de déterminer le nombre de classes optimales, plusieurs méthodes existent (Saitta et al., 2007; Žalik and Žalik, 2011; Saha and Bandyopadhyay, 2012). Selon la technique de segmentation utilisée, c-fuzzy means dans les travaux de Marec (Marec et al., 2008) ou K-means dans les travaux de Huguet (Huguet, 2002), différents critères peuvent être pris en compte pour s'assurer de la validité du choix du nombre de classes à prendre. D'une manière générale, ces critères devront prendre en compte :

- . La compacité des classes : les individus à l'intérieur d'un cluster doivent être similaires entre eux et très différents de ceux des autres clusters.
- . Les différents clusters doivent être bien séparés les uns des autres.

Quelle que soit la méthode de classification utilisée par la suite, plusieurs indices permettent de déterminer le choix optimal du nombre de classes (ou clusters) d'un point de vue statistique. Voici quelques indices (liste non exhaustive) qui peuvent être utilisées :

. **L'index de validité de Dunn** : (1.42). $d(c_i, c_j)$ représente la distance entre les classes c_i et c_j , d' la distance intra cluster et k le nombre de clusters. Lorsqu'on utilise un tel indice, on cherche à maximiser les distances inter cluster et minimiser les distances intra cluster. Le nombre optimal de clusters à prendre en compte, d'un point de vue statistique, est celui qui rend D maximal.

$$D = \min_{1 \leq i \leq k} \left[\min_{\substack{1 \leq j \leq k \\ i \neq j}} \left(\frac{d(c_i, c_j)}{\max(d'(c_l))} \right) \right] \quad (1.42)$$

. **L'index de validité de Davies et Bouldin** : (1.43). d_{ih} représente la distance euclidienne des centres des classes h et i . Elle correspond à la distance moyenne des individus d'une même classe au centre de la classe. Le nombre optimal de clusters est celui qui minimise la valeur de DB .

$$DB = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \max_{i \neq h} \left(\frac{e_h + e_i}{d_{ih}} \right) \quad (1.43)$$

. **R-Square (RSQ)** : (1.44) est la somme des carrés intra-classe. Ce critère correspond à la proportion de variance expliquée par la partition en s classes. RSQ vaut 1 lorsque toutes les observations sont dans une classe et vaut 0 lorsque chaque observation est dans une seule classe. Le nombre optimal de classes (d'un point de vue statistique) correspond à l'endroit sur la courbe où un saut important apparaît (figure 1.44a).

$$RSQ = R^2 - \left[\frac{W_S}{T} \right] \quad (1.44)$$

. **Semi-Partial R-Square (SPRSQ)** : (1.45) caractérise la perte d'homogénéité quand deux classes sont agrégées. Elle mesure la réduction du RSQ avant et après l'agrégation de deux classes figure 1.44b.

$$SPRSQ = \frac{W_{k \cup i} - W_k - W_i}{T} \quad (1.45)$$

. **L'indice de Rand (Rand, 1971)** : (1.46) correspond au pourcentage global de paires en accord dans deux partitions.

$$X = \{X_1, \dots, X_r\} \text{ et } Y = \{Y_1, \dots, Y_s\} : R = \frac{a + b}{a + b + c + d} \quad (1.46)$$

où : a représente le nombre de paires d'éléments qui ont les mêmes caractéristiques dans X et Y, b représente le nombre de paires d'éléments qui ont des caractéristiques différentes dans X et Y, c représente le nombre de paires d'éléments qui ont les mêmes caractéristiques dans X et des caractéristiques différentes dans Y et d représente le nombre de paires d'éléments qui ont les mêmes caractéristiques dans Y et des caractéristiques différentes dans X.

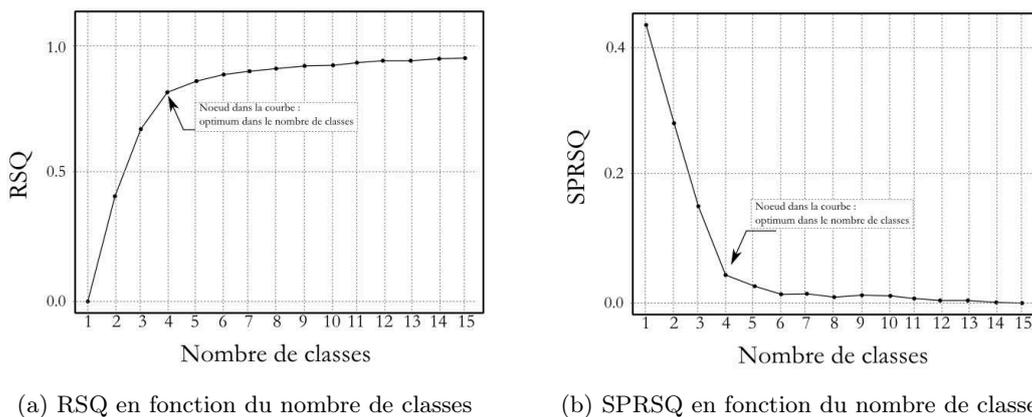


FIGURE 1.44: Définition du nombre de classes

6 Conclusion

Ce chapitre bibliographique a mis en avant les spécificités du matériau bois comme étant un composite naturel complexe avec son orthotropie, ses interactions avec son environnement et sa microstructure spécifique. Bien qu'étant un matériau de construction historique, son utilisation, comme matériau de structure dans le domaine du Génie Civil, demande de développer des stratégies de surveillance pour rendre ces structures fiables aux yeux des gestionnaires d'ouvrage, mais également économiques au regard des autres matériaux tels que l'acier ou le béton. La présence de fissures et la capacité qu'elles ont à se propager dans le temps et selon les variations climatiques, nécessitent donc de développer ou d'adapter des techniques de surveillance. Cependant, une inconnue demeure : que se passe-t-il exactement au niveau cellulaire lorsqu'une fissure apparaît puis se propage ?

Dans le domaine du bois, la technique du diagnostic par émission acoustique nous paraît être une piste intéressante à explorer pour, d'une part, faire du suivi d'évolution de fissures dans le temps, à l'échelle du laboratoire, et, d'autre part, pour effectuer une surveillance plus générale sous la forme d'un monitoring d'alerte. La première application fait l'objet de la suite de ce mémoire. Cette technique, qui consiste à enregistrer les ondes ultrasonores émises lorsque des fissures apparaissent, a déjà fait ses preuves dans l'étude des matériaux composites. A la lecture des travaux réalisés dans ce domaine, nous savons que, si les résultats obtenus sur des matériaux homogènes sont probants, dès que des hétérogénéités apparaissent (angles de fil, nodosité, gradients hydriques, etc.), cette méthode de mesure devient complexe à utiliser et nécessite des approches particulières concernant la correction des signaux enregistrés et leur signature acoustique. L'utilisation de l'émission acoustique in situ demande donc de développer une stratégie expérimentale à l'échelle du matériau.

Chapitre 2

Protocole expérimental, acquisitions et corrections

Sommaire

1	Introduction	67
2	Matériau et préparation des éprouvettes pour l'essai de fissuration	68
2.1	Choix du matériau de l'étude	68
2.2	Confection des éprouvettes	70
3	Dispositif de chargement mécanique et suivi de fissuration par imagerie	74
3.1	Dispositif de chargement mécanique	74
3.2	Suivi de fissuration par imagerie	75
3.3	Synchronisation des données issues des différents systèmes	82
4	Dispositif d'émission acoustique	85
4.1	Système de détection et d'enregistrement de l'activité acoustique	85
4.2	Position et nombre de capteurs	88
4.3	Courbes de correction de la localisation et de l'amplitude	110
5	Conclusion	115

1 Introduction

La stratégie expérimentale qui consiste à mettre en application l'émission acoustique au service de la propagation de fissure à l'échelle du matériau fait l'objet de ce deuxième chapitre. Afin d'isoler les différents phénomènes observés dans le processus de fissuration (chargement mécanique, effets différés et variations d'humidité), ce premier travail consiste à développer l'ensemble du protocole sur des essais instantanés, pour différentes conditions hydriques imposées et supposées constantes et homogènes durant les essais.

La première étape du travail a porté sur le choix du matériau d'étude. Ainsi, en se basant sur un ensemble de contextes (environnemental, économique et scientifique), celui-ci s'est orienté sur l'essence Douglas considérée comme étant la principale ressource forestière émergente des deux prochaines décennies (Bailly and de Champs, 2012). Comme nous l'avons vu en introduction ainsi que dans le rapport du LCPC (Aubagnac et al., 2008), c'est suite à des désordres observés sur des structures existantes qu'il a été nécessaire de procéder à des essais en laboratoire. Ces essais ont pour but de comprendre ce qui se passe tant au sein d'une structure que du matériau. Selon la taille du domaine d'étude, la taille des éprouvettes change, ainsi que les appareils de mesure mis en œuvre.

Dans des travaux passés (Meite et al., 2009; Jin et al., 2011; Dubois et al., 2012; Méité et al., 2013) les efforts ont porté sur la modélisation aux éléments finis des éprouvettes étudiées dans leur environnement. Les modèles ainsi obtenus sont *calés* sur des mesures expérimentales (issues de l'imagerie dans de nombreux cas). Nous nous proposons de mettre en œuvre un système de mesure déjà utilisé, mais de manière peu répandue, pour le bois : l'émission acoustique. Afin d'en étudier les apports et les limitations, ce système sera utilisé en complément d'un système d'imagerie sur des éprouvettes simples à mettre en œuvre (Double Cantilever Beam : DCB) soumises à un mode de chargement I (mode d'ouverture). Les éprouvettes DCB à inertie variable (figure 1.24b) et mTDCB (figure 1.25) n'ont pas été retenues dans nos travaux car nous ne nous sommes pas intéressés à l'étude de la zone d'élaboration (process zone).

2 Matériau et préparation des éprouvettes pour l'essai de fissuration

2.1 Choix du matériau de l'étude

Le Douglas

Dans un rapport professionnel publié en 2012 par (Bailly and de Champs, 2012) sur la base d'une étude FCBA, il apparaît que le Douglas est une ressource encore assez peu exploitée mais dont les qualités commencent à être reconnues. Importé de la côte ouest du continent Nord Américain après la seconde guerre mondiale, le Douglas a été utilisé pour participer au reboisement. Il représente maintenant plus de 420 000 [ha] (figure 2.1) et place la France au premier rang Européen parmi les producteurs de cette essence. Étant une essence encore *relativement jeune*, son exploitation ne devrait atteindre son régime de croisière que dans une vingtaine d'années.



FIGURE 2.1: Le Douglas, une ressource bien implantée au centre de la France

Un matériau aux performances mécaniques dignes d'intérêt

Comparé aux autres essences de résineux, le Douglas offre des propriétés mécaniques intéressantes. Cette essence présente un module d'élasticité globalement plus élevé que les autres espèces résineuses commercialisées en France (figure 2.2). Toutefois d'autres points sont à prendre en considération si l'on souhaite privilégier une essence par rapport à une autre :

- . **La durabilité.** Face aux attaques fongiques et aux xylophages. Au même titre que les autres essences de résineux couramment employées, l'aubier du Douglas reste un point délicat à traiter : il faut utiliser des pièces de bois purgées d'aubier lorsqu'un problème de durabilité est soulevé.
- . **Une classe d'emploi.** Selon les classes d'emploi, certaines essences peuvent être employées entièrement, purgées ou non d'aubier avec ou sans traitement.
- . **La rentabilité économique et la disponibilité.** Le Douglas offre une rentabilité ($[m^3/ha/an]$) au moins aussi importante que les autres essences (Bailly and de Champs, 2012). Il fournit des bois dont la classe de résistance est compatible avec celles constatées dans la construction.

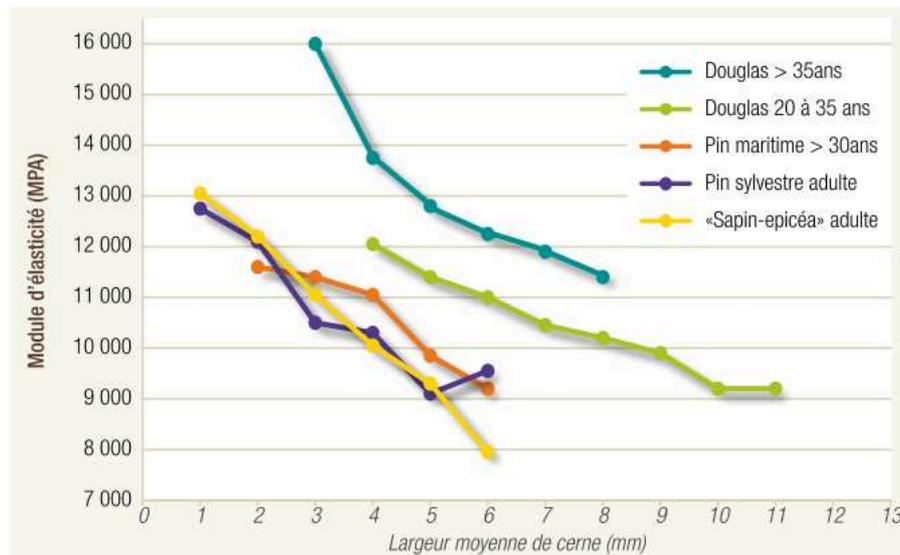


FIGURE 2.2: Module d'élasticité de quelques résineux commercialisés en France d'après (Nepveu, 1984; Nepveu and Blachon, 1989; Bailly and de Champs, 2012)

2.2 Confection des éprouvettes

S'il existe plusieurs modes d'initiation et de propagation de fissure (figure 1.18), et que plusieurs modes de chargement ont déjà été envisagés (figures 1.19), on peut remarquer que le mode I est le mode principal de fissuration (figures 4 et 5) avec une propagation de fissure dans le sens longitudinal.

Dans un but de mise en œuvre d'un dispositif de CND par EA, nous allons réaliser l'ensemble de nos essais dans des conditions analogues à celles qui se rencontrent le plus dans la réalité, c'est à dire en mode I.

Toutes les éprouvettes ont été réalisées à partir d'un seul et même plateau de Douglas. Ce plateau a été choisi de façon à provenir d'une coupe sur quartier, figure 2.3. Par la suite, les éprouvettes ont été prélevées suffisamment loin du cœur pour offrir des cernes parallèles avec un rayon de courbure le plus grand possible. La conséquence de ce choix est que les prélèvements n'ont pas forcément été réalisés que dans le duramen.

Une grande variabilité dans l'épaisseur du bois de printemps d'une éprouvette à l'autre a été constatée. De plus, la symétrie parfaite des éprouvettes n'est pas garantie. En effet, les cernes présents dans chaque échantillon ne sont pas tous identiques, figure 2.4.

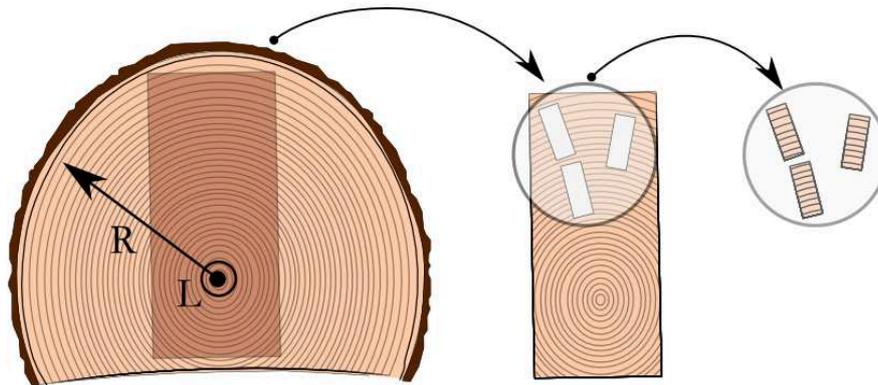


FIGURE 2.3: Prélèvement des éprouvettes sur un plateau de Douglas

Géométrie des éprouvettes

Toutes les éprouvettes réalisées ont été photographiées, pesées et mesurées. Les prises de vue (sous toutes les faces) sont un témoignage de ce que les éprouvettes ont été lors de leur fabrication (angle des cernes, présence ou non de défauts, ...). Les clichés ainsi que l'ensemble des données (géométriques et pesées) sont consignés dans un tableur et sont accessibles depuis un seul onglet, voir figure 2.5.

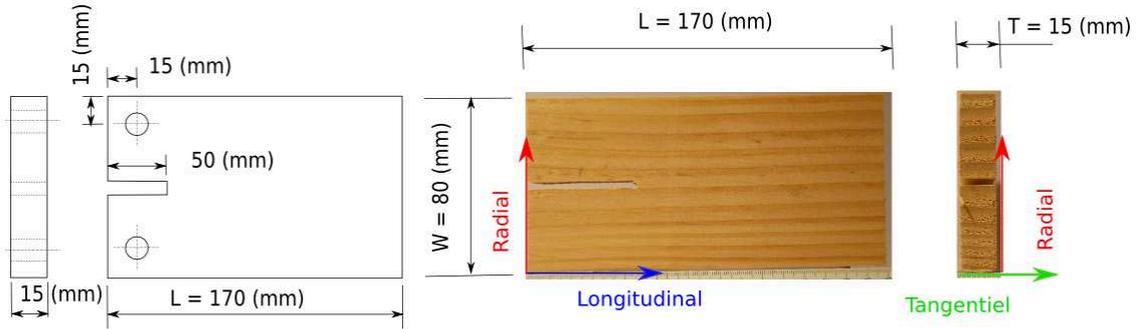


FIGURE 2.4: Dimensions des éprouvettes et orientation des cernes

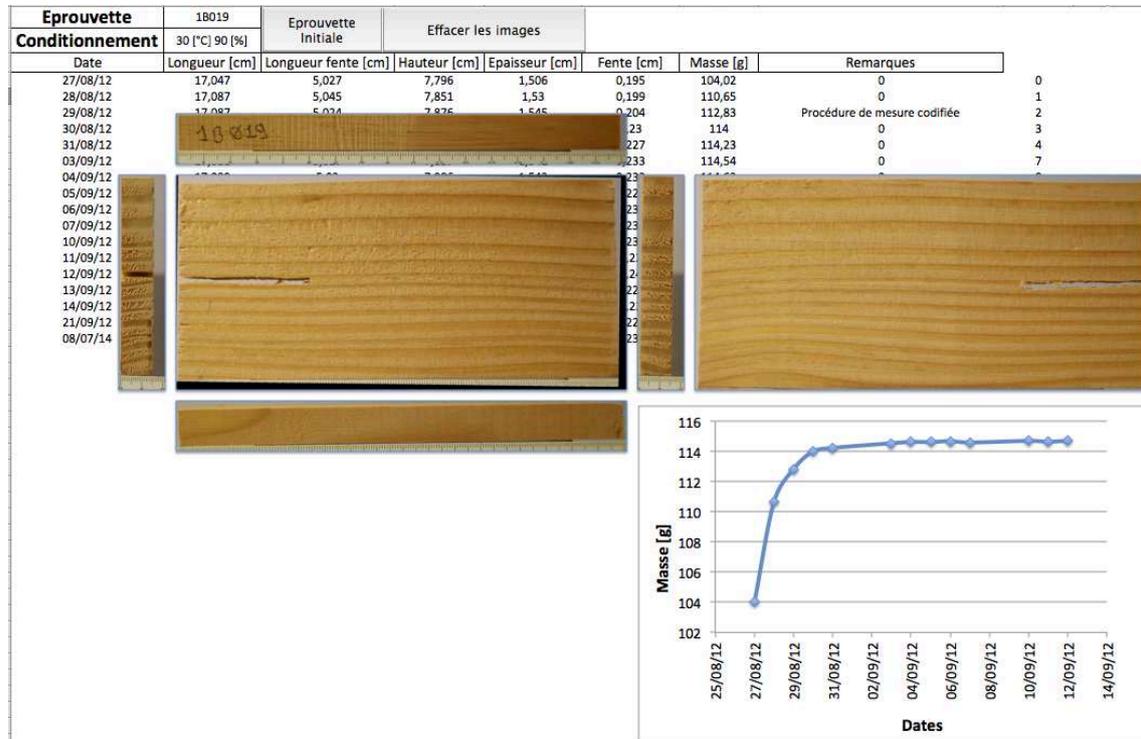


FIGURE 2.5: Les éprouvettes ... sous toutes les coutures

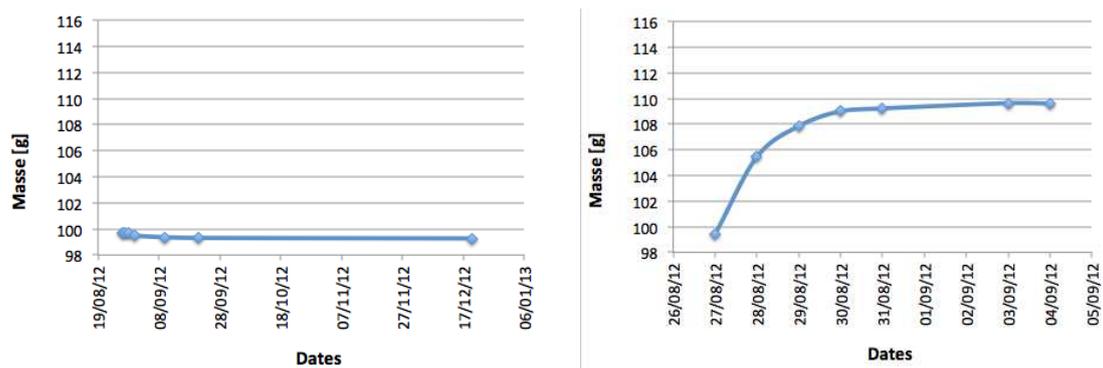
Comme cela a été abordé au premier chapitre (paragraphe 3.3), plusieurs modèles d'éprouvettes ont été utilisés par le passé. Compte tenu des différents types d'éprouvettes disponibles, nous avons choisi d'utiliser une DCB à inertie constante qui sera chargée en déplacement imposé.

Conditionnement

Les éprouvettes ont été conditionnées en deux lots d'humidité distincte (tableau 2.1) jusqu'à stabilisation de leurs masses respectives. Si certaines ont servi à la mise au point de différents réglages, 17 ont été testées (5 humides et 12 sèches). Deux exemples de courbe de stabilisation de masse sont donnés en figure 2.6. A chaque relevé de la masse des éprouvettes, leurs dimensions (figure 2.7) ont été prises pour noter toute variation en vue d'une analyse statistique future.

Eprouvettes	Température [°C]	Humidité [% Hr]	Teneur en eau estimée [%]
Sèches	20	40	7,5
Humides	30	90	20

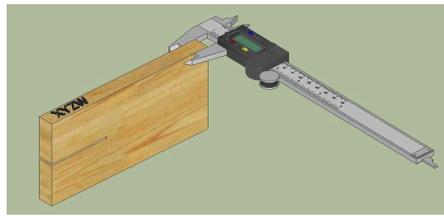
Tableau 2.1: Conditionnement des éprouvettes



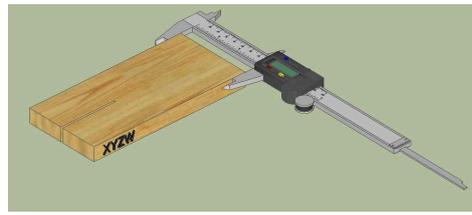
(a) Conditionnement pour une éprouvette sèche (b) Conditionnement pour une éprouvette humide

FIGURE 2.6: Évolution de la masse selon le conditionnement

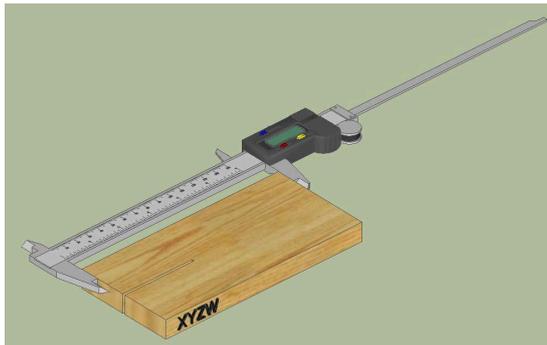
Toutes les éprouvettes ont été pré entaillées sur une longueur de 50 [mm] et mises en conditionnement par la suite.



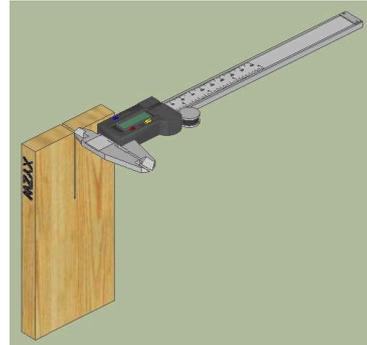
(a) Mesure de l'épaisseur



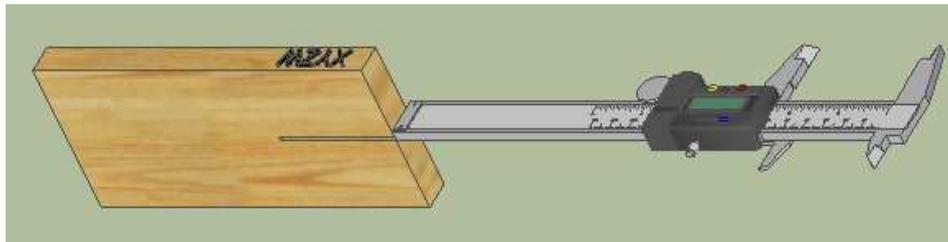
(b) Mesure de la hauteur de l'éprouvette



(c) Mesure de la longueur



(d) Mesure de largeur de la pré entaille



(e) Mesure de longueur de la pré entaille

FIGURE 2.7: Mesure des dimensions

3 Dispositif de chargement mécanique et suivi de fissuration par imagerie

3.1 Dispositif de chargement mécanique

Le montage mécanique a été fait de manière symétrique, figure 2.8. Les éprouvettes ont été soumises à un effort de traction en mode I, perpendiculairement au sens des fibres. Les perçages (10 [mm] de diamètre), nécessaires au montage de l'éprouvette sur la presse hydraulique, ont été réalisés juste avant de procéder à l'essai. De la sorte, nous pouvons nous assurer que les conditions de liaison sont les mêmes pour toutes les éprouvettes, et ce, indépendamment des conditions d'humidité dans lesquelles elles se trouvent.

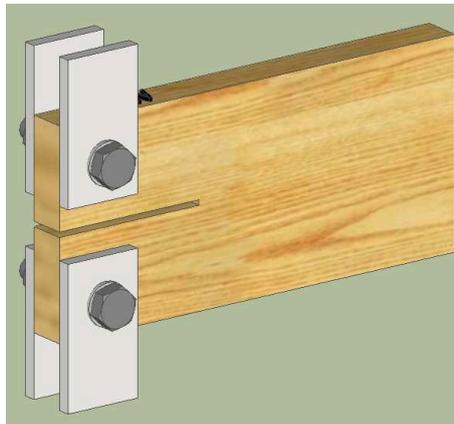


FIGURE 2.8: Chargement de la DCB

Les essais mécaniques ont été réalisés sur une presse électromécanique Zwick (figure 2.9). Pour chaque essai, nous récupérons les données de force et de déplacement. La fréquence d'acquisition est de 1 [Hz]. La vitesse retenue pour les essais est de 0,5 [mm/min]. Ce choix est dicté par le souhait de réaliser un essai permettant de négliger les effets de fluage tout en ayant un nombre suffisant de données à exploiter. Cette vitesse correspond à celles que l'on retrouve dans la littérature ([Aicher et al., 2001](#); [Ni and Iwamoto, 2002](#); [Pappas et al., 2004](#)).

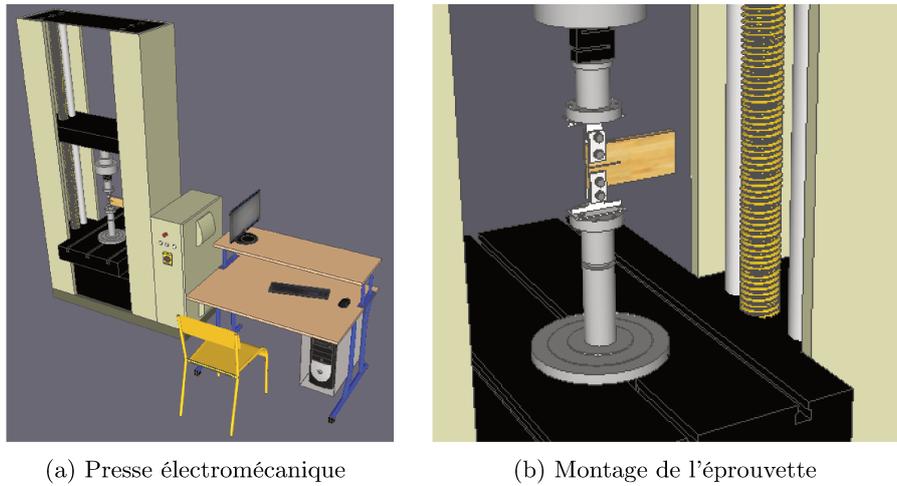


FIGURE 2.9: Chargement mécanique

3.2 Suivi de fissuration par imagerie

Présentation du matériel

L'acquisition vidéo a été faite à l'aide de 2 caméras (figure 2.10). Elles servent à réaliser des clichés, en cours d'essai, des faces avant et arrière des éprouvettes testées. Ces caméras, connectées sur port usb, permettent de réaliser des clichés en haute définition (2048 x 1536 pixels). Les clichés obtenus sont utilisés, par la suite, pour suivre l'évolution de la pointe de fissure au cours de l'essai.

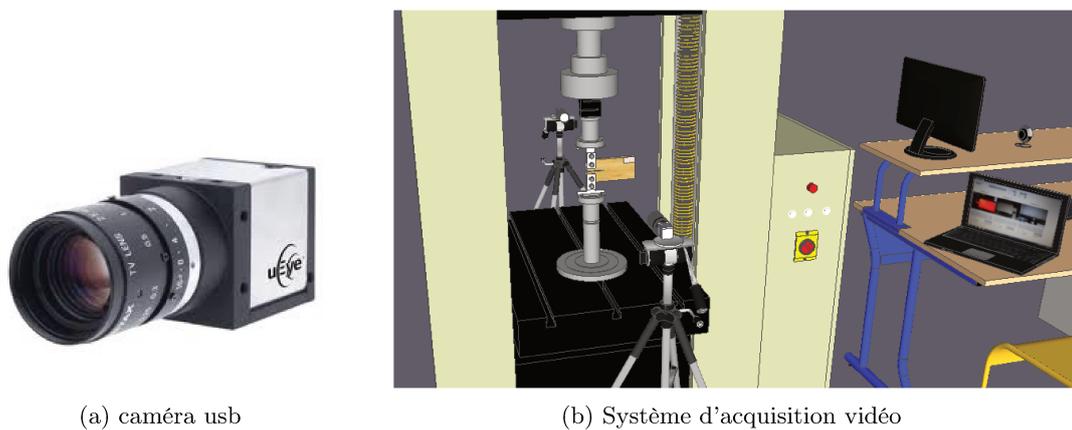


FIGURE 2.10: Système d'acquisition vidéo

Sachant que l'ordinateur servant à l'acquisition d'images n'est pas relié directement à la machine de traction, une troisième caméra est utilisée pour effectuer des clichés sur l'écran de contrôle de la machine pour réaliser la synchronisation.

Développement d'un système d'acquisition

Deux logiciels ont été testés pour l'acquisition des images. Le premier est le logiciel commercial Labview. Une application fonctionnelle a été développée (figure 2.11) qui permet d'enregistrer, à une fréquence choisie, les images provenant de caméras. Les images sont enregistrées dans un répertoire et l'ordre d'enregistrement des images est sauvegardé dans un fichier texte, propre à chaque caméra. A ce jour, une nouvelle version a été développée pour que les valeurs de force et déplacement soient automatiquement associés à chaque image lors de l'enregistrement. Cette application n'a toutefois pas été retenue car elle nécessite un ordinateur performant, performance qui nous faisait défaut au moment des essais.

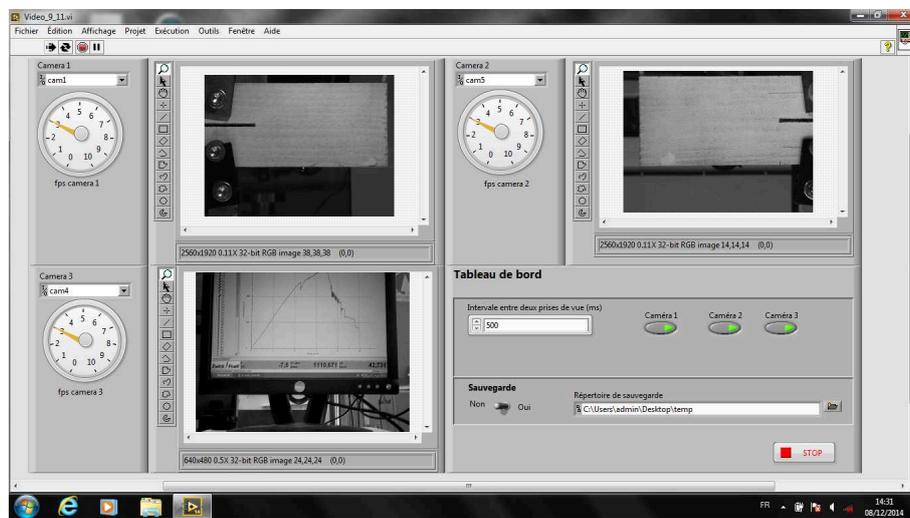


FIGURE 2.11: Copie d'écran du logiciel d'acquisition vidéo développé sous Labview

Le deuxième est le logiciel VVVV (gratuit pour une utilisation non commerciale). Il nous a permis de réaliser une application (elle aussi fonctionnelle) (figure 2.12) qui permet également d'enregistrer à une fréquence choisie, les images provenant de caméras. Les images sont enregistrées dans un répertoire et l'ordre d'enregistrement des images est sauvegardé dans un fichier texte, propre à chaque caméra. Cette application a été retenue, pour sa légèreté. En effet, le processeur de l'ordinateur étant moins sollicité, la vitesse d'acquisition des images s'en trouve grandement améliorée.

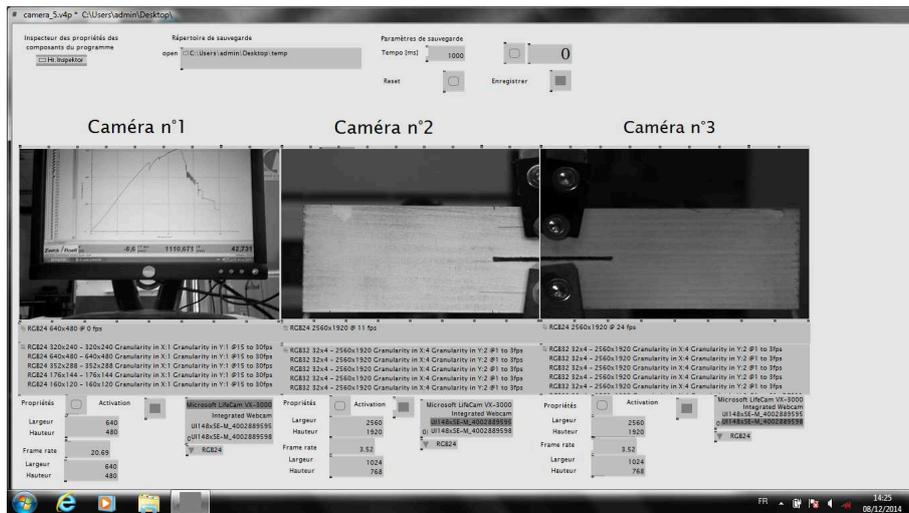


FIGURE 2.12: Copie d'écran du logiciel d'acquisition vidéo développé sous VVVV

Choix de la résolution des images

Les figures 2.11 et 2.12 montrent des prises de vues réalisées sur une éprouvette. Ces prises de vues ne correspondent pas exactement à celles qui ont été obtenues lors des essais. En effet, le choix d'un cadrage et d'une résolution sont dictés par plusieurs considérations indépendantes :

- . **La définition de la zone d'intérêt.** Nous avons souhaité limiter la largeur des clichés à une zone allant de la pointe de l'entaille au bord de l'éprouvette. Les caméras ayant une définition fixée (format 1:3), la dimension verticale nous est alors imposée.
- . **La profondeur de champ** qui permet d'obtenir une image nette. Celle-ci dépend de la qualité des objectifs disponibles.
- . **L'objectif de résolution** qui pousse à aller vers les définitions les plus élevées (et donc plus gourmandes en mémoire).
- . **Les capacités de stockages et les vitesses de transfert** sur les disques durs, forcément limitées.

Sur la figure 2.13, nous pouvons voir :

- . L'évolution, en trait continu, du poids de plusieurs résolutions d'images.
- . L'évolution, sous forme d'histogramme, du taux de rafraichissement.

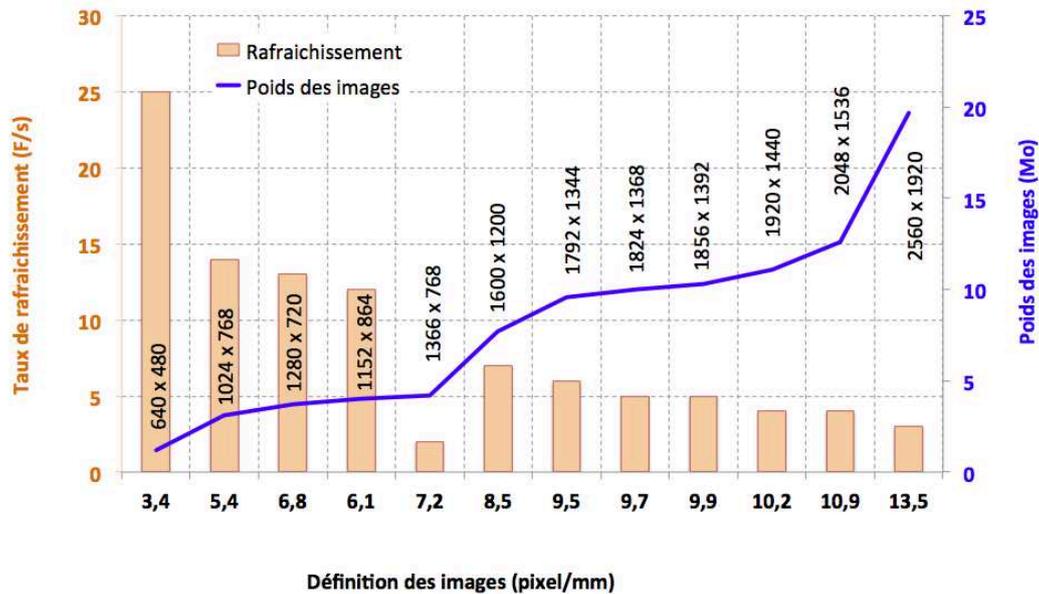


FIGURE 2.13: Analyse de la définition et du poids des images par le système d'acquisition vidéo

Ce comparatif permet de mettre en évidence un premier palier pour les formats 1024 x 768 à 1366 x 768 et un second à partir du format 1792 x 1344. Tout étant une affaire de compromis (capacité de stockage, taux de transfert et vitesse d'enregistrement), nous avons choisi le format 1024 x 768. Ce format permet d'avoir une échelle de l'ordre de 5 [pix/mm] tout en générant un volume d'images stockées raisonnable (environ 5 Go pour un essai de 5 minutes). Même si le système permettait d'accéder à une vitesse de rafraîchissement de 13 images par secondes, nous nous sommes volontairement limités à un taux d'acquisition de 2 images par seconde et par caméra.

Traitement des images

Afin de rendre la détermination de la position de la pointe de fissure plus aisée, une application a été développée (en TCL/TK)¹ spécifiquement pour permettre un traitement semi-automatique des clichés. La lecture et la détermination de la pointe de fissure ont été rendus possibles par l'emploi d'une bibliothèque graphique de traitement d'image (ImageMagick). Les algorithmes utilisés ont fait appel à la technique de détection de contour.

Le but de la détection de contour est de repérer sur une image les pixels dont l'intensité

1. TCL/TK : Tool Command Language/ graphical Tool Kit : langage de script multi plateforme, simple et puissant, que l'on peut comparer, dans une certaine mesure, au langage Python. Moins connu que ce dernier, on le retrouve comme outil dans des logiciels comme R-studio, Scilab, ...

varie brusquement. Dans une image en niveau de gris, figure 2.15a, il faut faire ressortir ces variations brusques et les mettre en évidence par des pixels blancs ou noirs.

Si l'on se représente une image comme une matrice, on peut travailler dans une section horizontale (ligne) ou verticale (colonne). Un contour sera associé à un maximum de pente (dérivée première) ou comme un passage par un zéro (dérivée seconde), figure 2.14. Dans ce dernier cas, un réglage de seuil (Threshold) sera nécessaire pour obtenir un contour plus précis.

Dans chacun des cas, la détection de contour est effectuée à l'aide de matrices de convolution.

$$G_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} * A \text{ et } G_y = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} * A \quad (2.1)$$

A représente l'image source et G_x , G_y respectivement les deux images issues de la dérivée première horizontale et verticale. Il est possible de combiner les gradients verticaux et horizontaux de la façon suivante :

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2.2)$$

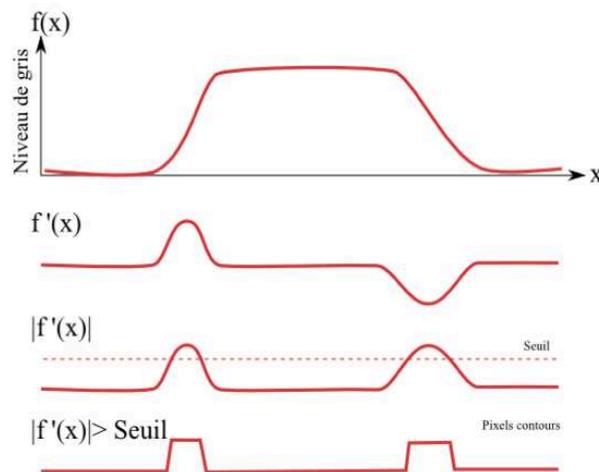


FIGURE 2.14: Traitement de la variation d'intensité dans une image

Dans le cas d'une dérivée seconde, il est possible d'utiliser une approximation du Laplacien.

$$G = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} * A \text{ ou encore } G = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} * A \quad (2.3)$$

Ce type d'opérateur est très sensible au bruit qui peut-être présent dans les images. D'autres traitements, comme le lissage gaussien (un opérateur qui permet de débruiter), peut être utilisé pour obtenir de meilleurs résultats. Les résultats de chacune de ces convolutions sont visibles sur les figures 2.15b et 2.15c.



FIGURE 2.15: Applications de la détection de contour à un visage, a) Image originale, b) Détection de contour par le filtre Sobel, c) Détection de contour par le filtre laplacien

Afin de ne pas solliciter les ordinateurs inutilement, il est nécessaire de définir une zone d'intérêt, figure 2.16. Celle-ci englobe la fissure et convient pour l'ensemble des images d'un même essai.



FIGURE 2.16: Définition d'une zone d'intérêt

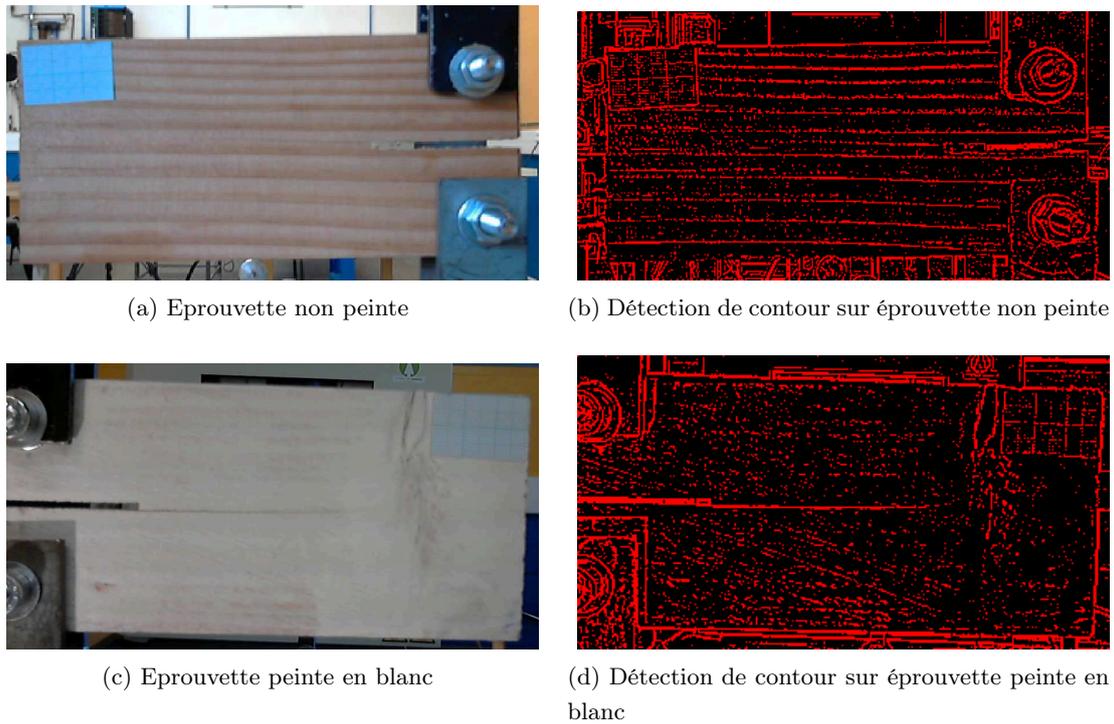


FIGURE 2.17: Exemples de détection de contour

Comme on peut le voir sur les figures 2.17b et 2.17d, la mise en évidence de la fissure se fait par mesure de la variation de contraste sur la zone de l'image étudiée. Si pour un contraste fort, la détermination de la zone fissurée laisse peu de place au doute, il n'en est pas de même pour la détermination de la pointe de fissure elle-même. De plus, de part et d'autre de la fissure, nous pouvons constater que la texture du matériau (le grain et les cernes du bois) génère un *bruit*. Ce *bruit* peut être une source de mauvaise interprétation au voisinage de la pointe de fissure. Par la suite, après conditionnement et juste avant l'essai, toutes nos éprouvettes ont été peintes en blanc. Nos essais étant réalisés à température et hygrométrie constantes, nous n'avons pas besoin de tenir compte du frein aux échanges thermiques et hydriques engendré par la peinture lors de l'expérience.

La détermination de la dimension horizontale de la fissure se fait à l'aide de deux marqueurs (deux traits verticaux en pointillés) qui sont positionnés par l'opérateur, image après image, figure 2.18. La distance entre les marqueurs est donnée en pixel. Pour déterminer la longueur réelle, du papier millimétré est collé sur chaque face des éprouvettes (figure 2.17a et 2.17c). Ainsi, il est possible de déterminer le facteur d'échelle (en pixel par mm) de chaque caméra.

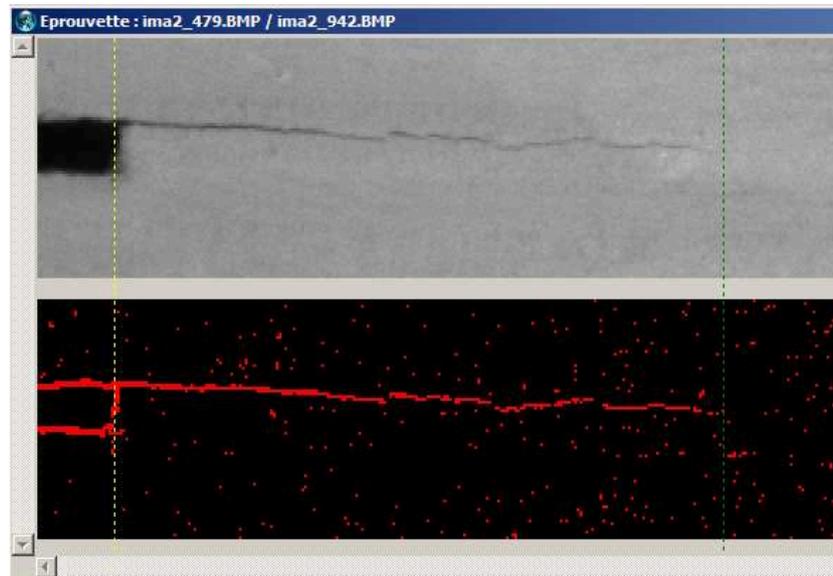


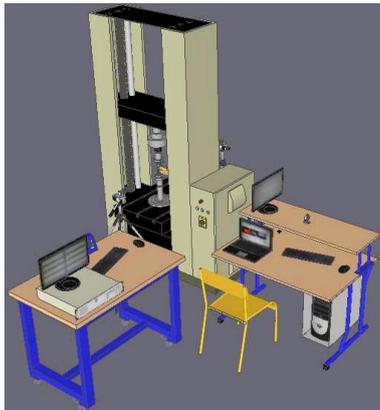
FIGURE 2.18: Mise en évidence de la fissure en surface de l'éprouvette par algorithme de détection de contour

Le logiciel de détection de pointe de fissure développé pour l'occasion nous permet de gagner du temps en effectuant un traitement d'image. La détermination de la pointe de fissure se fait visuellement et manuellement, grâce à un algorithme de détection de contour.

3.3 Synchronisation des données issues des différents systèmes

Le système expérimental (figure 2.19) qui a été utilisé pour les essais est composé de trois sous-systèmes :

- . Une presse mécanique chargée d'effectuer une mise en traction de l'éprouvette.
- . Un système d'acquisition vidéo chargé de prendre des clichés à intervalles réguliers pour permettre un suivi visuel de la propagation de la pointe de fissure.
- . Un système d'acquisition d'émission acoustique (pas encore présenté) chargé d'enregistrer tous les signaux acoustiques.



(a) Le plan de travail modélisé



(b) Le plan de travail photographié

FIGURE 2.19: Aperçu du plan de travail

Lorsque l'on utilise des machines qui ont été conçues indépendamment les unes des autres, il y a fort à parier que celles-ci posent quelques difficultés à communiquer entre elles. Cela peut se faire, a priori, au prix d'un investissement supplémentaire pour l'achat de cartes d'acquisition/communication qui seront à même de fournir ou de recevoir des signaux analogiques ou numériques. A défaut, si les phénomènes observés durant les chargements ne sont pas trop rapides, il reste toujours la possibilité de déclencher les machines en même temps, manuellement et de trouver un autre moyen pour synchroniser les données après les essais.

Cela suppose :

- . Que l'on ne soit pas trop regardant sur les éventuels retards entre machines.
- . Que les machines fonctionnent avec des vitesses d'acquisitions des données compatibles entre elles.
- . Que les données enregistrées (et qui doivent être utilisées et analysées par la suite) aient un paramètre en commun pour une synchronisation ultérieure.

Dans notre cas de la figure 2.20, voici les flux de données échangées entre machines.

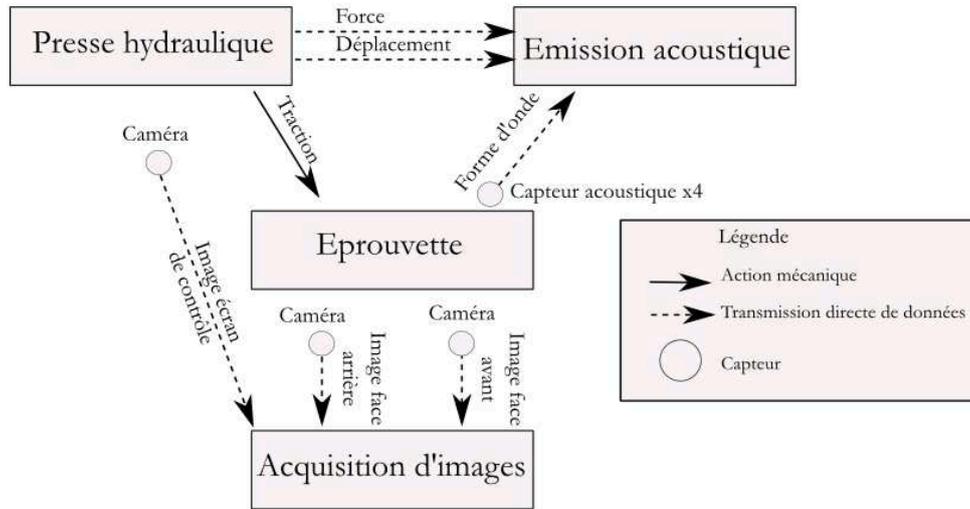


FIGURE 2.20: Diagramme des flux du système expérimental

Faute de pouvoir récupérer les données force et déplacement pour chaque image, nous avons dû filmer l'écran de contrôle de la presse (figure 2.21a). Afin de rendre la récupération des données moins fastidieuses pour l'opérateur, le programme de traitement des images précédemment présenté a été doté d'une procédure de reconnaissance de caractères (Programme Tesseract-ocr) (figure 2.21b).

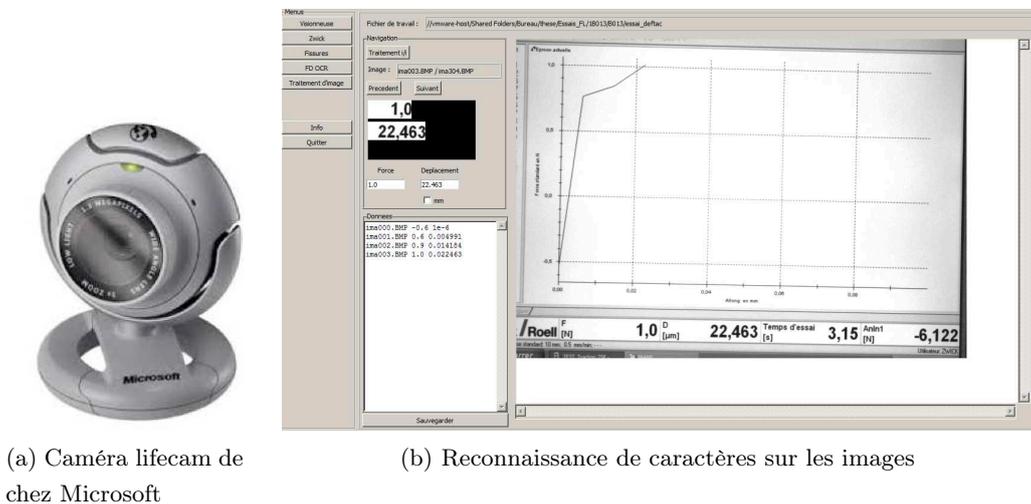


FIGURE 2.21: Synchronisation

4 Dispositif d'émission acoustique

4.1 Système de détection et d'enregistrement de l'activité acoustique

Présentation du système

Afin de récupérer les signaux acoustiques, nous devons passer par une chaîne d'acquisition de données, dont un schéma est proposé en figure 2.22.

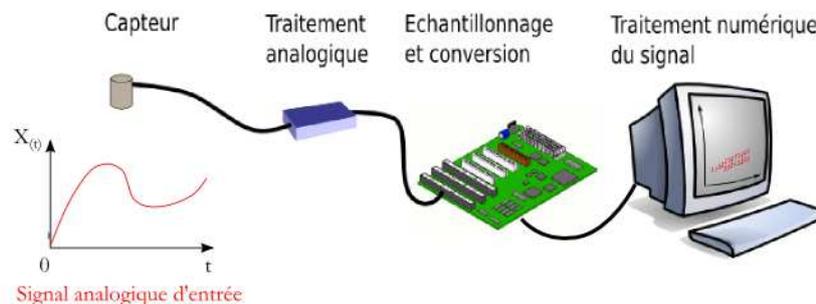


FIGURE 2.22: Chaîne d'acquisition acoustique

Une chaîne d'acquisition acoustique a pour but de recueillir les informations nécessaires à la connaissance de l'état d'un système et de délivrer ces informations sous une forme permettant leur exploitation. Elle est généralement composée de trois éléments :

- un ou plusieurs capteurs, des préamplificateurs.
- une carte analogique/numérique permettant la transformation des données.
- un ordinateur et un logiciel permettant le traitement des données.

Le système de détection et d'enregistrement de l'activité acoustique utilisé dans ce travail se compose des éléments suivants :

- Quatre cartes d'acquisition d'émission acoustique (18 bits, 2 voies, fréquence d'échantillonnage 40 [MSPS]).
- Quatre transducteurs piézoélectriques. Un couplant acoustique est utilisé afin d'assurer un contact plus uniforme et une meilleure transmission des ondes à travers la surface d'application du capteur, figure 2.24.
- Quatre préamplificateurs d'un gain de 40 [dB].
- Un logiciel d'acquisition (AEWINTM, figure 2.23a) et un logiciel d'analyse (NOESISTM, figure 2.23b) des voies de signaux d'émission acoustique en temps réel et en relecture.

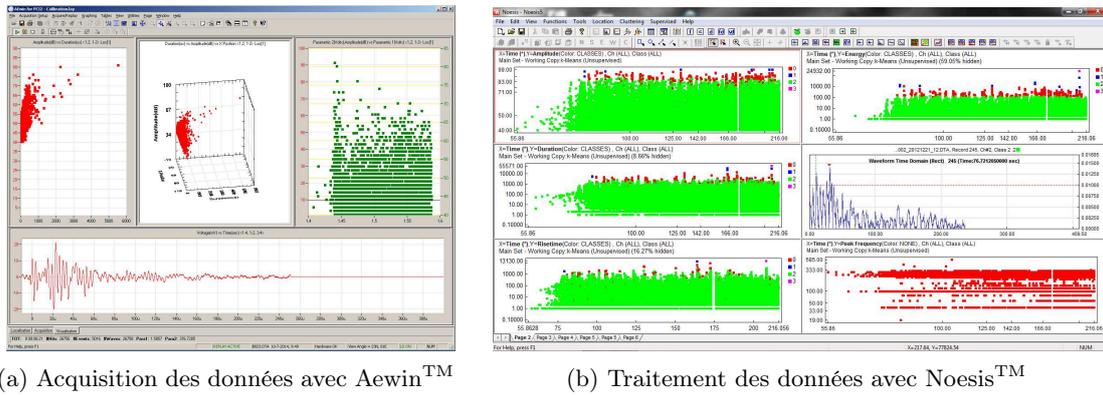


FIGURE 2.23: Logiciels d'acquisition et de traitement de données de chez Mistras



FIGURE 2.24: Modèles de transducteurs disponibles

Les caractéristiques les plus intéressantes des transducteurs disponibles sont regroupées dans le tableau 2.2.

	R45	R15α	SH10	Nano30
Plage de fréquence [kHz]	(10 - 70 [kHz]) (80 - 100 [kHz])	(50 - 400 [kHz])	(0 - 200 [kHz])	(125 - 750 [kHz])
Type	Large bande	Large bande	Cisaillement	Large bande
Diamètre [mm]	26,8	19	20	8

Tableau 2.2: Caractéristiques des transducteurs disponibles

Le choix d'un transducteur est dicté par plusieurs considérations :

- **Les ondes enregistrées.** Selon la technologie employée, les transducteurs peuvent enregistrer des ondes de compression ou des ondes de cisaillement (voir annexe A paragraphe 2).
- **La plage de fréquence.** Lorsque l'on souhaite mettre en évidence un phénomène, sans pour autant en connaître la ou les fréquences caractéristiques, une large plage d'acquisition permet d'enregistrer un maximum d'informations.
- **Géométrique.** Tous les transducteurs n'ont pas le même diamètre. Des capteurs ayant de petites dimensions peuvent s'employer sur des éprouvettes de petite taille.

Compte tenu de notre volonté d'enregistrer un maximum d'informations à analyser et de la taille de nos éprouvettes, le modèle de capteurs que nous avons retenu est le Nano30 (Mistras). Sa courbe d'étalonnage (figure 2.25) permet de constater qu'une plage de fréquence qui va de 125 à 750 [kHz] est couverte.

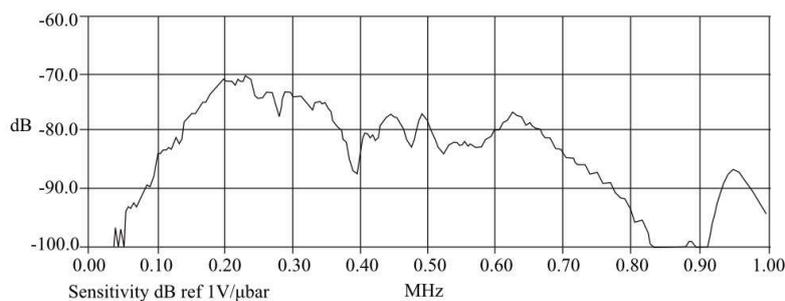


FIGURE 2.25: Certification de l'étalonnage pour un nano 30

La fréquence d'échantillonnage, à mettre en œuvre lors des enregistrements, doit respecter le critère de Nyquist-Shannon ([Shannon, 1998](#); [Le Roux, 2013](#)) et être au moins supérieure à 3 fois la fréquence maximale enregistrée. L'acquisition des signaux doit se faire selon une fréquence d'échantillonnage permettant de reconstituer le plus fidèlement le signal. En effet si la fréquence d'échantillonnage choisie est trop faible on assiste au phénomène de repliement, c'est-à-dire que la fréquence du signal enregistré est inférieure à la fréquence réelle du signal.

Bien que le critère de Nyquist-Shannon permette de rendre compte de la fréquence du signal, celui-ci n'est pas suffisant. Dans le cas où l'on cherche à effectuer des mesures précises en utilisant des données échantillonnées, la fréquence d'échantillonnage doit être suffisamment élevée c'est-à-dire de l'ordre de 5 à 10 fois la composante fréquentielle la plus élevée du signal ([Larcher, 2014](#)).

Dans notre cas, cela correspond à une fréquence d'échantillonnage supérieure à 3 [MHz].

Compte tenu des possibilités offertes par le système d'acquisition de données acoustiques, nous fixons une fréquence de 20 [MHz], valeur maximale fournie par notre système d'acquisition.

Réglages choisis

Compte tenu de la disposition des capteurs (les capteurs sont proches l'un de l'autre : 10 [cm]) et des dimensions des éprouvettes, il ressort que les signaux sont relativement courts et que la dissociation des modes est peu visible. Les paramètres (dont la définition est fournie en annexe C, page 218) retenus pour l'acquisition sont répertoriés dans le tableau 2.3.

Paramètres	Valeur ou option
Threshold	40 [dB]
Peak Definition Time (PDT)	40 [μs]
Hit Lockout Time (HLT)	200 [μs]
Hit Definition Time (HDT)	100 [μs]
Max Duration	1000 [μs]
Sample rate	20 [MSPS]
Analog filter (lower)	100 [kHz]
Analog filter (upper)	3 [MHz]
Pre-Trigger	10 [μs]
Timing Feature	First Threshold Crossing (FTC)
Wave Velocity	5350 [m/s]

Tableau 2.3: Paramètres d'acquisition des signaux acoustiques

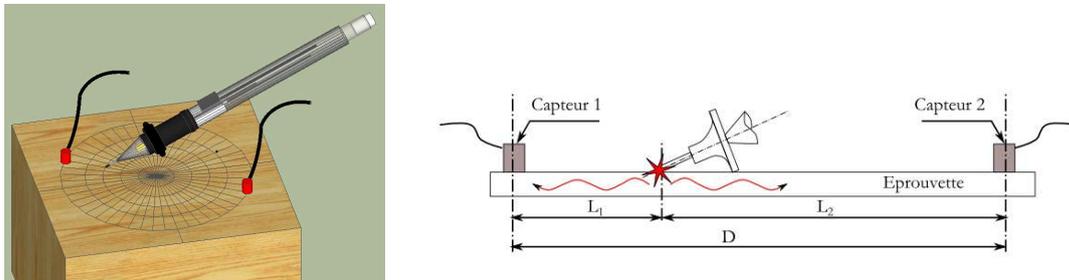
4.2 Position et nombre de capteurs

Dans le cadre de nos essais, l'imagerie va être utilisée pour déterminer la longueur de fissure, image après image. Compte tenu de l'orientation des fibres, du type d'éprouvette choisie et du mode de chargement, la fissure se propagera, préférentiellement, de manière horizontale.

L'EA est une technique issue de la sismologie, et comme dans le cadre de l'étude des séismes, la localisation des épicentres (et par extension des sources sonores) en est un aspect important. La sismologie permet une localisation spatiale des épicentres dans la croûte terrestre - un matériau anisotrope au demeurant. Même si le bois est un matériau orthotrope, la transposition des méthodes de localisation semble tout à fait possible, à condition toutefois de bien appréhender l'effet de cette orthotropie sur les vitesses de propagation des ondes.

Détermination de la vitesse de propagation des ondes

La détermination de la vitesse de propagation des ondes peut se faire en utilisant la méthode du cassé de mine (Hsu–Nielsen) (figure 2.26a).



(a) Méthode du cassé de mine sur un cube de bois (b) Méthode du cassé de mine sur un barreau selon (Sibil, 2011)

FIGURE 2.26: Localisation linéaire selon la méthode du cassé de mine

Lorsque l'on effectue un cassé de mine, les ondes générées sont à la fois des ondes volumiques et surfaciques. Lorsque celui-ci est effectué sur le même plan que les capteurs, le signal reçu peut donc être, en tenant compte des différentes réflexions sur les parois et de l'atténuation due au matériau, très modifié. Ceci dit, l'étude des ondes de cisaillement nécessite l'emploi de transducteurs spécifiques ainsi que d'un couplant offrant une certaine viscosité. En dehors de ces précautions d'emploi, la localisation effectuée donne une bonne estimation de la vitesse de propagation des ondes de compression.

$$C_{[mm/s]} = \frac{\Delta L_{[mm]}}{\Delta t_{[s]}} \quad \Delta L = L_2 - L_1 \text{ et } \Delta t = t_2 - t_1 \quad (2.4)$$

Dans la pratique, l'acquisition se fait à l'aide d'une première vitesse estimée (et nécessairement fautive) de la vitesse de propagation des ondes. Il en résulte une mauvaise localisation de l'événement acoustique. De cette erreur, Δx , nous sommes en mesure de déduire la vitesse de propagation de l'onde.

$$C_{\text{réelle}[mm/s]} = C_{\text{estimée}[mm/s]} + 2 \cdot \frac{\Delta x_{[mm]}}{\Delta t_{[s]}} \quad (2.5)$$

Hypothèse isotrope

La localisation d'événements acoustiques peut se faire de manière relativement simple lorsque ceux-ci sont localisés entre les capteurs (avec deux capteurs dans le cas d'une localisation linéaire ou trois capteurs dans le même plan dans le cas d'une localisation plane). Une explication plus détaillée est disponible en annexe A, page 202.

Dans notre cas d'étude, nous ne pouvons pas prédire où passera exactement le chemin de fissuration. De plus, celui-ci aura lieu dans toute l'épaisseur de l'éprouvette. Afin de

pouvoir laisser les faces avant et arrière de l'éprouvette non masquées pour pouvoir déterminer, image après image, la position de la pointe de fissure en surface, nous devons déporter les capteurs parallèlement à la ligne supposée de propagation de fissure (qui doit avoir lieu parallèlement aux fibres du bois).

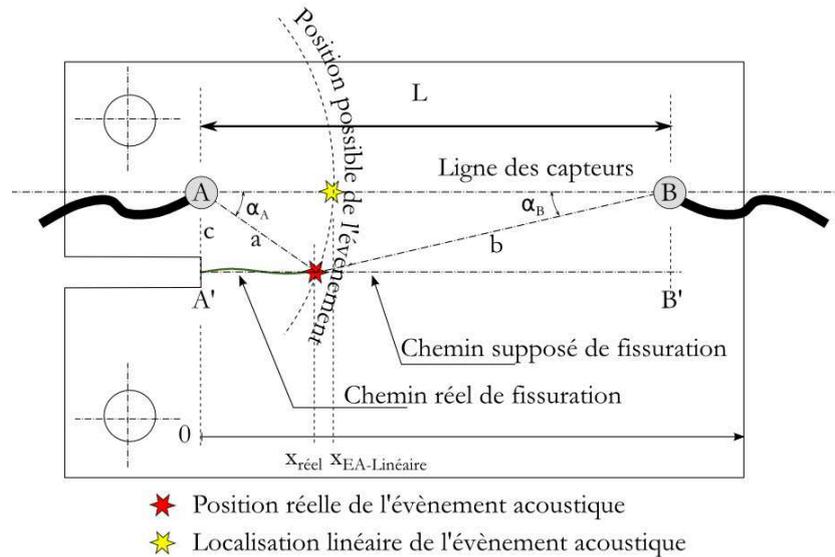


FIGURE 2.27: Localisation déportée des évènements parallèlement à la ligne de fissuration

Lorsque nous déportons les capteurs, il convient d'effectuer une correction géométrique pour retrouver la position réelle des évènements, figure 2.27. Pour un matériau isotrope et un type d'onde, la détermination de la position d'un évènement se fait par la connaissance de la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau et par la différence de temps de réception du signal entre les capteurs A et B. Lorsque nous récupérons les évènements localisés par deux capteurs, nous pouvons retrouver la bonne côte $X_{réel}$ à l'aide des équations suivantes.

$$t_A = \frac{a}{V} \text{ et } t_B = \frac{b}{V} \quad (2.6)$$

Le long de la ligne AB, nous pouvons écrire l'équation suivante.

$$t_A - t_B = \frac{2 \cdot X_{EA\text{-linéaire}} - L}{V} \quad (2.7)$$

Le long de la ligne A'B', nous obtenons :

$$t_A - t_B = \frac{a - b}{V} = \frac{\sqrt{X_{réel}^2 + c^2} - \sqrt{(L - X_{réel})^2 + c^2}}{V} \quad (2.8)$$

$$X_{\text{EA-linéaire}} = 0,5 \cdot \left(\sqrt{X_{\text{réel}}^2 + c^2} - \sqrt{(L - X_{\text{réel}})^2 + c^2 + L} \right) \quad (2.9)$$

Où :

- . a représente la distance entre l'événement acoustique et le capteur A.
- . b représente la distance entre l'événement acoustique et le capteur B.
- . c représente la distance entre la ligne de propagation de la fissure et la ligne des capteurs.
- . L représente la distance entre le capteur A et le capteur B.
- . V représente la vitesse de propagation des ondes dans le matériau.
- . $X_{\text{réel}}$ représente la côte réelle de l'événement acoustique le long de la ligne de propagation de la fissure.
- . $X_{\text{EA-linéaire}}$ représente la côte de l'événement acoustique déterminée par une simple localisation linéaire le long de la ligne des capteurs.

L'inversion de l'équation (2.9) nous donne l'expression ci-dessous.

$$X_{\text{réel}} = \frac{\text{sgn} \left(X_{\text{EA-linéaire}} - \frac{L}{2} \right) \cdot \sqrt{A}}{2 \left(L \cdot X_{\text{EA-linéaire}} - X_{\text{EA-linéaire}}^2 \right)} + \frac{L}{2} \quad (2.10)$$

Avec :

$$\begin{aligned} A = & c^2 \cdot L^3 \cdot X_{\text{EA-linéaire}} - 5 \cdot c^2 \cdot L^2 \cdot X_{\text{EA-linéaire}}^2 + 8 \cdot c^2 \cdot L \cdot X_{\text{EA-linéaire}}^3 - 4 \cdot c^2 \cdot X_{\text{EA-linéaire}}^4 \\ & + L^4 \cdot X_{\text{EA-linéaire}}^2 - 6 \cdot L^3 \cdot X_{\text{EA-linéaire}}^3 + 13 \cdot L^2 \cdot X_{\text{EA-linéaire}}^4 - \\ & 12 \cdot L \cdot X_{\text{EA-linéaire}}^5 + 4 \cdot X_{\text{EA-linéaire}}^6 \end{aligned}$$

Cette équation, issue d'une pure construction géométrique, nous donne les représentations suivantes (figure 2.28).

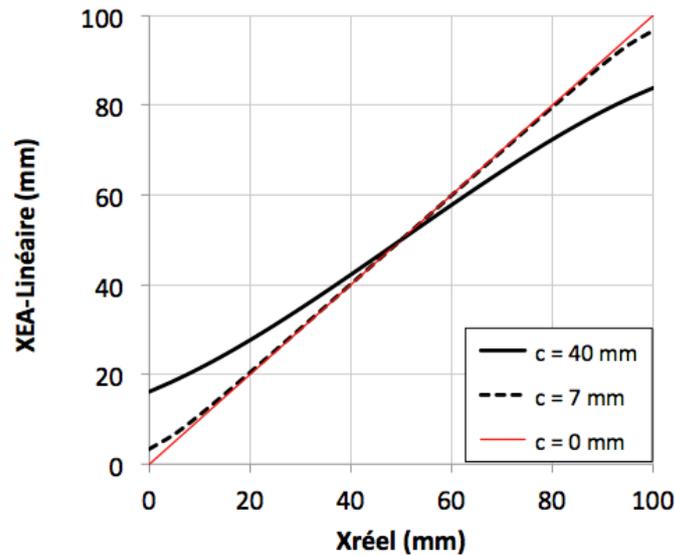


FIGURE 2.28: Courbe de correction géométrique

Dans cette figure, plusieurs courbes sont représentées. Nous retrouvons :

- . Une ligne droite continue. Elle représente la courbe de localisation parfaite dans laquelle $X_{EA\text{-linéaire}} = X_{réel}$.
- . Une courbe noire en pointillés. Cette courbe correspond à un décalage de la ligne des capteurs de 7 [mm] parallèlement au plan supposé de fissuration.
- . Une courbe noire en trait continu. Cette courbe correspond à un décalage de la ligne des capteurs de 40 [mm] parallèlement au plan supposé de fissuration.

On constate que la correction à apporter est d'autant plus importante que les capteurs sont déportés parallèlement au plan de fissuration.

Afin de vérifier la validité de cette courbe de correction, nous avons effectué des essais de cassé de mine (figure 2.29a) sur des matériaux témoins (figure 2.29b) : du PVC et de l'aluminium.

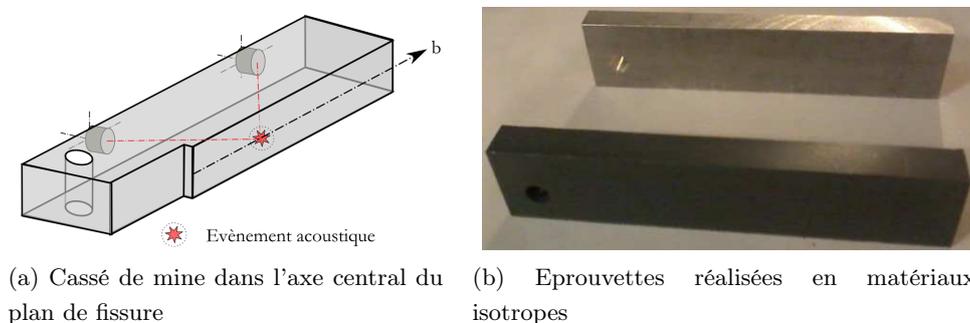


FIGURE 2.29: Epreuves réalisées en matériaux témoins isotropes (PVC et aluminium)

Ces formes représentent les demi éprouvettes que nous sommes supposés récupérer à la fin de chaque essai. Pour chacune d'entre elle, onze cassés de mine ont été effectués le long d'un chemin de fissuration à des côtes $X_{\text{réel}}$ connues et choisies (entre 0 et 10 [cm], tous les centimètres).

A titre d'illustration, et parce que nous obtenons le même type de courbe avec le PVC, seuls les résultats obtenus sur l'aluminium sont présentés dans un premier temps figure 2.30.

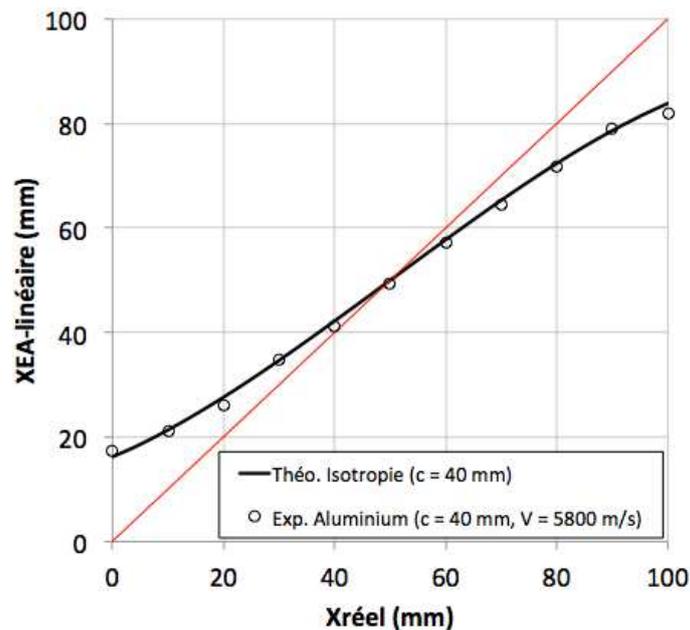


FIGURE 2.30: Courbe de correction géométrique appliquée à l'aluminium

De manière analogue à la figure 2.28 nous retrouvons :

- . Une ligne droite continue. Elle représente la courbe de localisation parfaite dans laquelle $X_{\text{EA-linéaire}} = X_{\text{réel}}$.
- . Des ronds qui correspondent aux mesures réalisées sur le matériaux avec une ligne de capteurs déportés de 40 [mm].
- . Une courbe noire en trait continu. Cette courbe théorique correspond à la courbe théorique pour un décalage de la ligne des capteurs de 40 [mm] parallèlement au plan supposé de fissuration.

A la lecture des courbes on peut constater qu'il y a une bonne concordance entre la courbe expérimentale et la courbe théorique. Lors des essais, les signaux acoustiques sont enregistrés à l'aide du logiciel AEWINTM. Le traitement de ces données a, en partie, été réalisé sur NOESISTM, un logiciel de traitement de données. Que ce soit pour l'acquisition

des données ou leur traitement, il est nécessaire de saisir une vitesse de propagation des ondes dans le logiciel afin qu'une localisation soit possible. Dans le cas de la figure 2.30, la vitesse qui avait été saisie correspond à celle qui a été mesurée par la méthode du cassé de mine (5800 [m/s]).

Si l'on utilise des vitesses de propagation différentes de la vitesse réelle pour le matériau, nous obtenons les graphiques de la figure 2.31. Des mesures ont été réalisées pour des vitesses entre 5000 et 7000 [m/s].

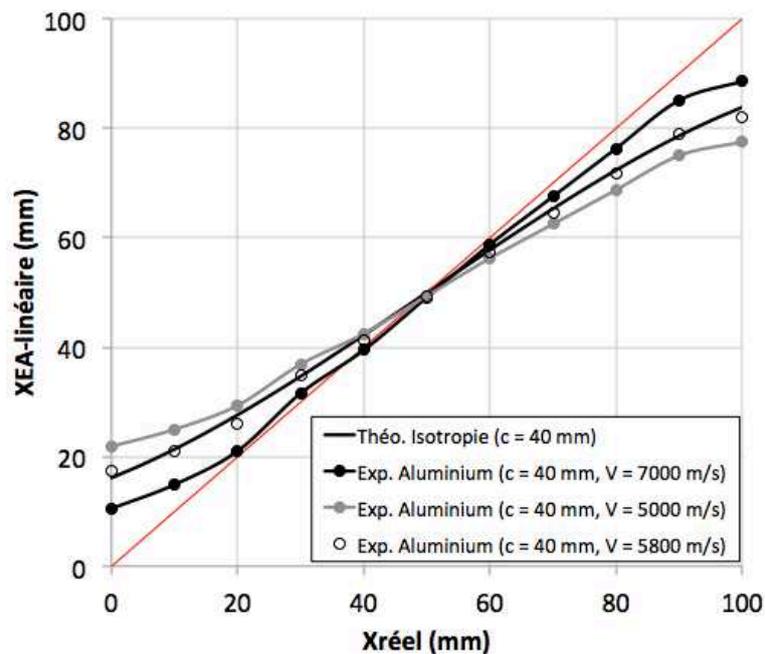


FIGURE 2.31: Influence de la vitesse effective sur les courbes de correction appliquées à l'aluminium

Dans le cas d'une *sur* ou d'une *sous* estimation de la vitesse de propagation des ondes, on peut constater que les courbes de correction obtenues par mesure ne correspondent plus à la théorie.

A titre d'illustration, voici les courbes que nous obtenons sur notre éprouvette en PVC, figures 2.32 et 2.33. Dans le cas présent, la vitesse de propagation des ondes qui a été obtenue par cassés de mine est de 2200 [m/s]. Comme nous pouvons le constater, lorsque la vitesse supposée correspond à la vitesse de propagation des ondes, il y a une bonne concordance entre la courbe expérimentale et la courbe théorique. Et si l'on saisit une vitesse nettement différente, de la même façon que pour l'aluminium, nous obtenons des courbes de correction très différentes.

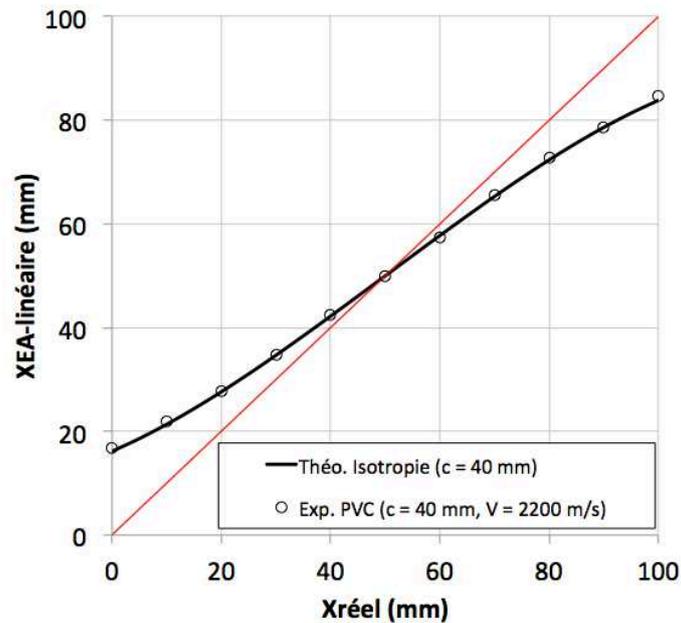


FIGURE 2.32: Courbe de correction géométrique appliquée au PVC

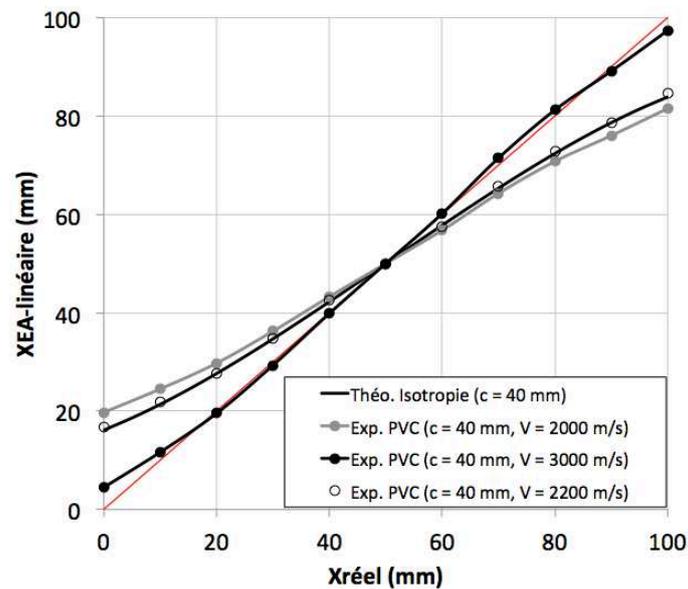


FIGURE 2.33: Influence de la vitesse effective sur les courbes de correction appliquées au PVC

La détection d'un évènement acoustique par le système d'acquisition passe par l'association de deux salves. L'écart entre leurs temps d'enregistrement respectifs doit être compatible avec la vitesse de propagation des ondes dans le matériaux. Pour évaluer la

nécessité de déterminer la bonne vitesse de propagation des ondes dans un matériau, onze cassés de mine ont été effectués sur les éprouvettes le long d'un chemin de fissuration. Sur la figure 2.34 sont représentés sous forme d'histogramme le nombre d'évènements qui ont été réellement localisés par le système d'émission acoustique.

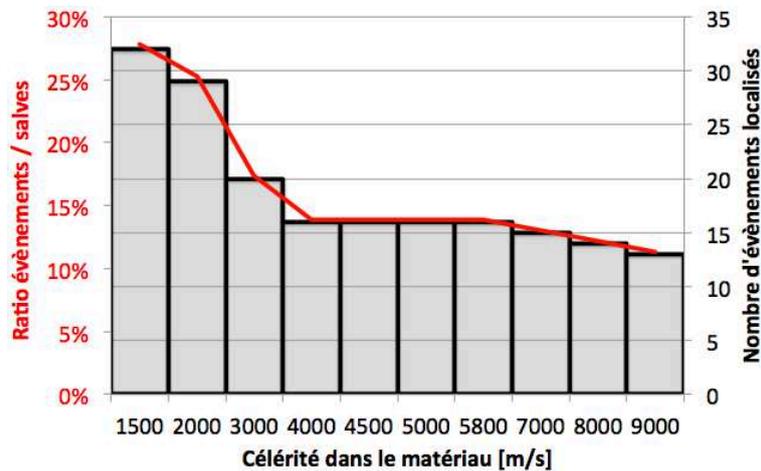


FIGURE 2.34: Effets de la vitesse effective sur la détection du nombre d'évènements pour l'aluminium

Dans le cas de l'aluminium (matériau peu atténuant), nous pouvons constater que quelle que soit la vitesse effective choisie, le nombre des évènements est toujours supérieur à 11. Des salves (échos) sont associées par erreur. Il existe un palier (de 4000 à 6000 [m/s]) sur lequel les algorithmes de localisation détectent un nombre d'évènements acoustiques légèrement supérieur à la réalité (16 pour 11). Lorsque la vitesse effective choisie est inférieure à ce palier, le nombre d'évènements détectés croît alors que pour une valeur au dessus de ce palier, certains évènements trop proches dans le temps ne sont plus dissociés. Sur la même figure est représenté, en trait continu, le ratio évènements détectés sur salves enregistrées. Lors de cet essai, 115 salves avaient été enregistrées par les capteurs. Dans le cas idéal, sans échos ni signaux parasites, nous devrions avoir un ratio de 50% (deux salves permettent de créer un évènement). On peut voir qu'en utilisant une vitesse effective proche de la vitesse réelle, nous créons peu d'évènements parasites mais que de nombreux échos sont cependant encore présents.

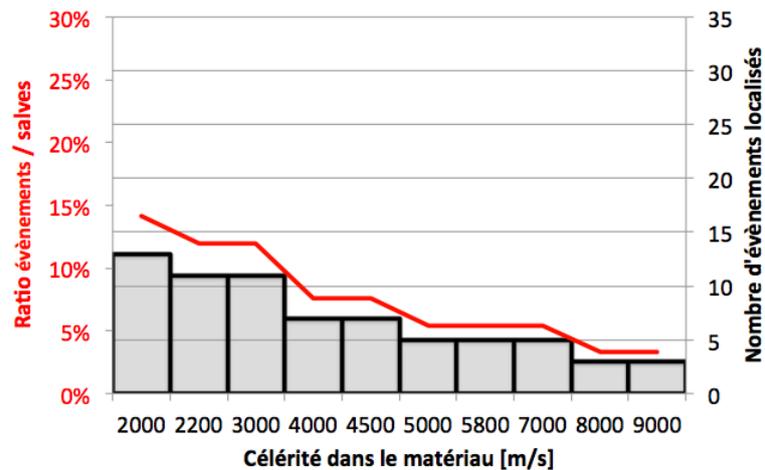
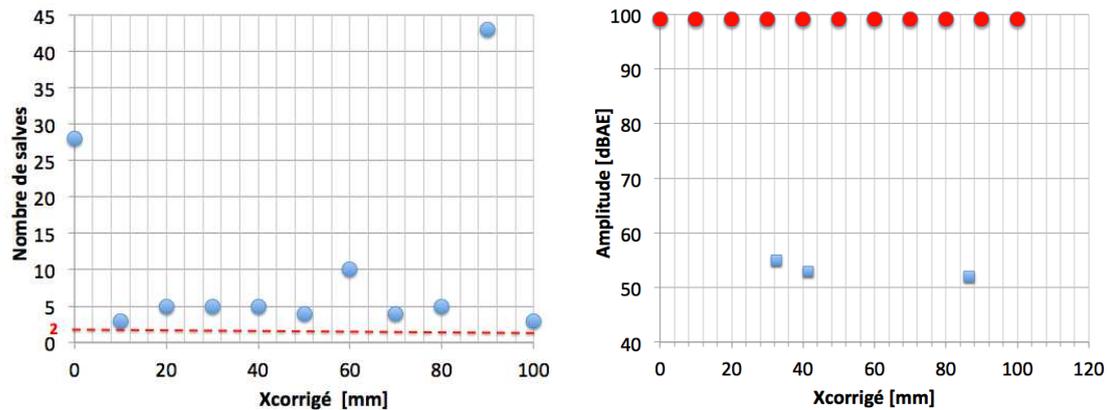


FIGURE 2.35: Effets de la vitesse effective sur la détection du nombre d'évènements pour le PVC

En ce qui concerne le PVC (figure 2.35), le nombre d'évènements acoustiques détectés ne correspond à la réalité que pour des vitesses comprises entre 2200 et 3000 [m/s]. Lors de cet essai, 92 salves avaient été enregistrées par les capteurs. On constate que pour des vitesses d'acquisition trop élevées, le nombre d'évènements détectés ne correspond plus à la réalité et que certains sont exclus par l'algorithme de détection.

Sur la figure 2.36a, dans le cas de l'aluminium, est représenté, pour une vitesse donnée, le nombre de salves qui ont accompagné un évènement. Dans l'idéal, nous ne devrions avoir que deux salves pour un évènement (le trait mixte horizontal). On constate dans le cas présent que les salves parasites sont très présentes au droit du premier capteur ainsi que du deuxième capteur. Dans ce dernier cas, cela peut s'expliquer par la présence du bord de l'éprouvette qui génère des échos.

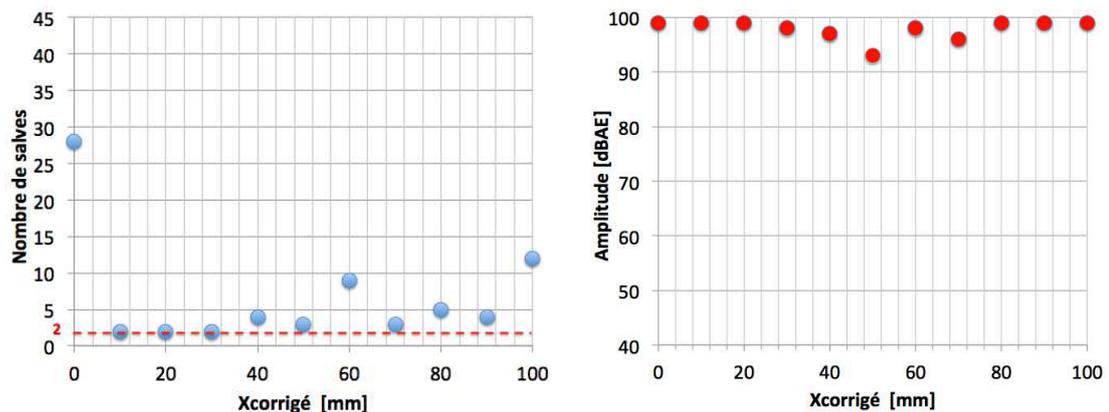
Sur la figures 2.36b sont représentés, pour l'aluminium, pour une vitesse donnée, tous les évènements localisés. Les évènements représentés par des ronds (99 [dBae]) correspondent aux premiers évènements localisés après chaque cassé de mine effectué sur le plan de fissuration de l'éprouvette. On constate que les évènements *parasites* présentent, dans ce cas de figure, une amplitude nettement plus faible (inférieure à 60 [dB_{AE}]) et que certains d'entre eux sont mal localisés.



(a) Nombre de salves enregistrées pour chaque source pour une vitesse effective de 5800 [m/s] (b) Amplitude des évènements localisés pour une vitesse effective de 5800 [m/s]

FIGURE 2.36: Salves, évènements localisés pour l'aluminium

Dans le cas du PVC (figure 2.37), nous pouvons voir que les échos sont plus nombreux au droit des capteurs.



(a) Nombre de salves enregistrées pour chaque source pour une vitesse effective de 2200 [m/s] (b) Amplitude des évènements localisés pour une vitesse effective de 2200 [m/s]

FIGURE 2.37: Salves, évènements localisés pour le PVC

Nous pouvons conclure de ces graphiques, que si le choix d'une vitesse effective adaptée permet de limiter la création d'évènements *fantômes*, il nous restera à effectuer une filtration pour éliminer ces derniers. Ainsi, par analyse des données, nous pourrions prétendre fournir une signature acoustique des mécanismes ayant lieu lors d'un essai.

Hypothèse orthotrope

Une autre possibilité pour déterminer la vitesse effective est d'utiliser une autre fonction liée au système d'EA : l'Auto Sensor Test (AST) (figure 2.38). Lorsque l'on procède à une AST, tour à tour, les transducteurs se transforment en émetteur. Une impulsion est alors émise et les autres se contentent d'écouter. De cette façon, il est possible de déterminer si les ondes ultra-sonores transitent bien, quel est l'ordre de grandeur de l'atténuation du signal et quel est le temps nécessaire pour qu'un signal émis soit reçu par chacun des autres capteurs de la chaîne d'acquisition.

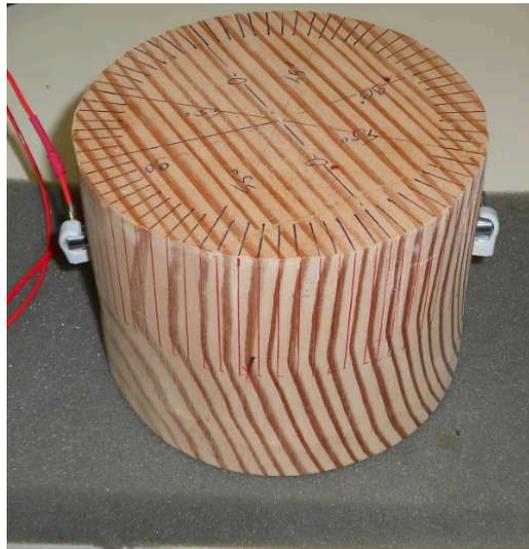


FIGURE 2.38: Détermination expérimentale de la vitesse de propagation des ondes sur une éprouvette cylindrique en Douglas

Nous avons pu noter, lors de nos essais, des vitesses de propagation des ondes de compression variant de 2200 à 5500 [m/s]. Les valeurs qui ont été observées sont conformes à celles que l'on peut retrouver dans la littérature (Beall, 2002; Bucur, 2006). C'est à l'aide de cette méthode que nous avons étudié la variation de la vitesse en fonction de l'angle sur une éprouvette de Douglas (sur le plan LR).

Sur la figure 2.39, des lois ont été optimisées pour obtenir le graphique. Selon les coefficients choisis (tableau 2.4), nous obtenons une corrélation intéressante pour les formules d'Hankinson, Osgood ainsi que pour l'approche parabolique.

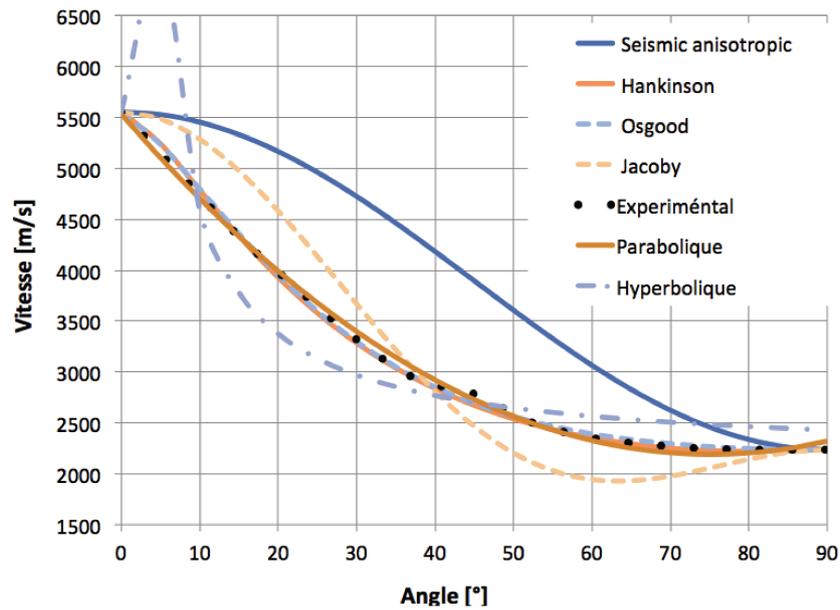


FIGURE 2.39: Variation de la vitesse des ondes de compression selon l'angle de propagation par rapport au sens des fibres (plan LR)

Loi	Formule V_α	Paramètres optimisés	Coefficient de détermination
Hankinson	$\frac{V_0 \cdot V_{90}}{V_0 \cdot \sin^n \alpha + V_{90} \cdot \cos^n \alpha}$	$n = 1,49$	0,9993
Osgood	$\frac{V_0 \cdot V_{90}}{V_0 + (V_0 - V_{90}) (\sin^n \alpha + a \cdot \cos^n \alpha) \cdot \sin^n \alpha}$	$a = 1$ et $n = 1,32$	0,9993
Jacoby	$V_0 \cdot \cos^n \alpha + V_{90} \cdot \sin^n \alpha$	$n = 3,32$	0,980
Parabolique	$A + B \cdot \alpha + C \cdot \alpha^2$	$A = 5534$ $B = -88,9$ $C = 0,592$	0,999
Hyperbolique	$A + \frac{B}{\alpha} + \frac{C}{\alpha^2}$	$A = 2159$ $B = 24325$ $C = -2,432$	0,90
Sismic anisotropic	$\frac{V_0 + V_{90}}{2} - \frac{V_0 - V_{90}}{2} \cdot \cos(180 - 2 \cdot \alpha)$	Sans objet	0,91

Tableau 2.4: Paramètres optimisés pour chacune des formules

Configuration des capteurs

Les évènements acoustiques ont lieu le long de la ligne de fissuration dans l'épaisseur de l'éprouvette. Quel que soit le montage envisagé, on peut considérer trois situations particulières, figure 2.40, à savoir :

- . Les sources d'EA sont situées en face avant de l'éprouvette, le long de la ligne (a).
- . Les sources d'EA sont situées en milieu de l'éprouvette, le long de la ligne (b).
- . Les sources d'EA sont situées en face arrière de l'éprouvette, le long de la ligne (c).

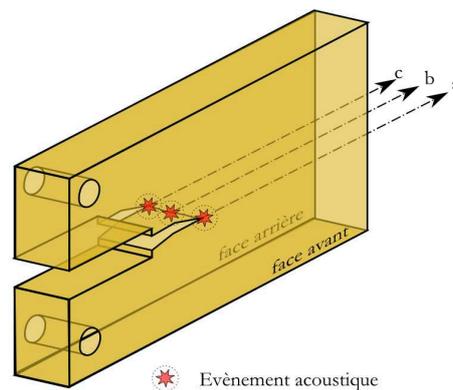


FIGURE 2.40: Localisation des sources d'émission acoustique

En utilisant deux capteurs, seule une localisation linéaire est possible. Quelles que soient leurs positions sur l'éprouvette, il y aura nécessairement une erreur de localisation des évènements acoustiques, figure 2.41.

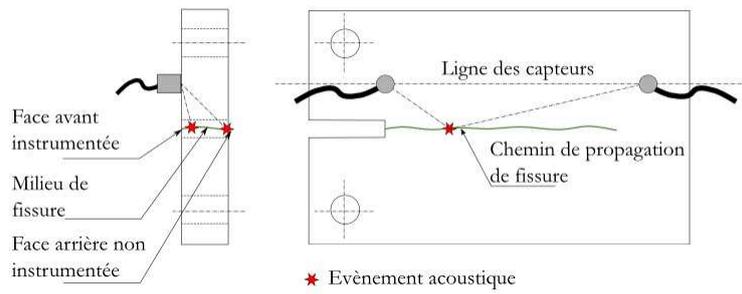
Nous ne pouvons disposer les capteurs sur le chemin de fissuration. Nous ne savons pas où il se situe exactement et, dans l'absolu, la transmission des ondes jusqu'aux capteurs ne se ferait plus. Les capteurs doivent être déportés.

Dans le cas où les sources d'EA sont sur la ligne (a), ils sont au plus proche des capteurs. Si les sources d'EA sont situées à l'arrière de l'éprouvette, le long de la ligne (c), le chemin suivi par les ondes d'EA est le plus long.

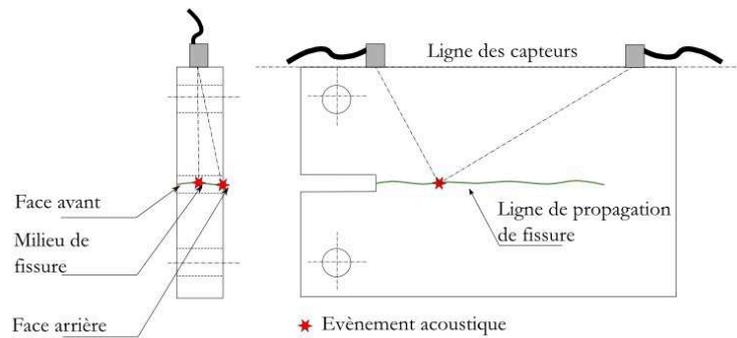
Nous devons établir des courbes de correction entre la position réelle des évènements acoustiques et la position calculée par les différences de temps de parcours.

Deux types de positionnement des capteurs peuvent être envisagés :

- . Dans un premier montage, les capteurs sont placés parallèlement à la ligne supposée de fissuration, au plus près de celle-ci, sur l'une des faces principales (figure 2.41a).
- . Dans un deuxième montage, les capteurs sont déportés, parallèlement au plan supposé de fissuration, sur chant (figure 2.41b).

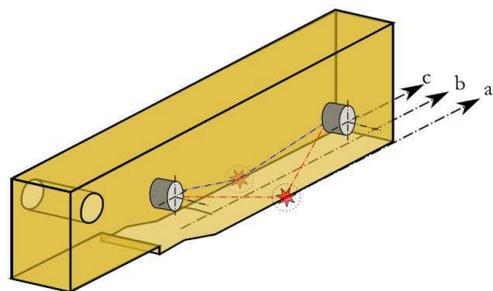


(a) Capteurs en face avant



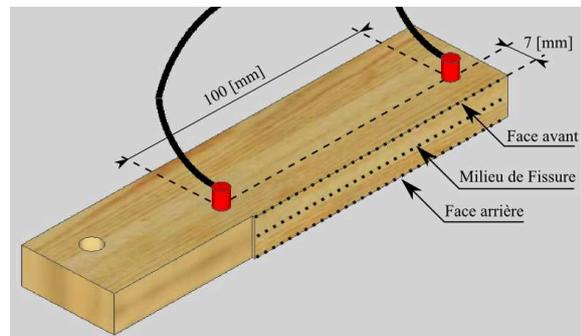
(b) Capteurs sur chant

FIGURE 2.41: Deux configurations pour les capteurs



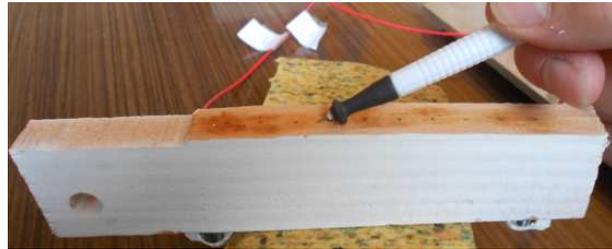
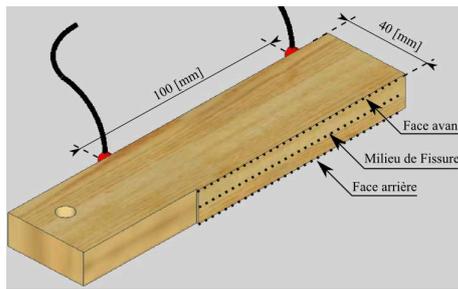
★ Évènement acoustique

(a) Positions extrêmes des évènements acoustiques



(b) Mise en situation

FIGURE 2.42: Principe du cassé de mine pour des capteurs placés face avant

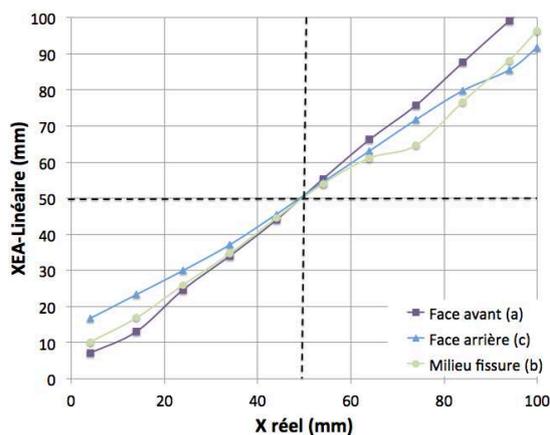


(a) Positions extrêmes des évènements acoustiques

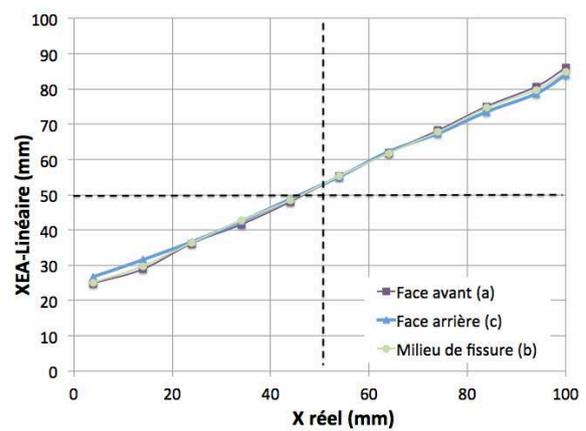
(b) Mise en situation

FIGURE 2.43: Principe du cassé de mine pour des capteurs placés sur chant

Les courbes de correction donnant $X_{EA\text{-linéaire}}$ en fonction de $X_{réel}$ sont obtenues en réalisant des cassés de mine sur le plan de fissure, après essai de fissuration, le long des lignes (a), (b) et (c).



(a) Pour des capteurs montés face avant



(b) Pour des capteurs montés sur chant

FIGURE 2.44: Courbes de correction de localisation

Sur les figures 2.44a et 2.44b sont reportées les trois courbes de correction. Les côtes ($X_{réel}$) 0 et 100 [mm] correspondent, respectivement, à la verticale de chacun des capteurs.

A la lecture de ces courbes, on peut constater que :

- Quel que soit le type de montage, la correction de localisation sera minimale, voire nulle lorsque les évènements auront lieu à mi-chemin entre les capteurs. Cette même correction sera plus importante lorsque les évènements auront lieu au droit de l'un ou l'autre des capteurs.
- Les courbes de correction sont nettement distinctes les unes des autres selon la configuration. Cela signifie que, selon l'endroit où l'EA aura lieu dans le plan de fissuration, la correction

à apporter sera plus ou moins importante. Comme l'on ne sait pas où se trouve exactement la source d'EA, cela signifie qu'il y aura une incertitude sur le résultat que l'on obtiendra.

Lors des essais, nous ne saurons pas où se situent les événements acoustiques sur le plan de fissuration. Aussi, afin d'orienter notre choix, des simulations ont été effectuées le long des lignes (a), (b) ou (c). Avec chacune des courbes de correction, l'erreur maximale commise a été déterminée et retenue. Les résultats sont restitués en figure 2.45a.

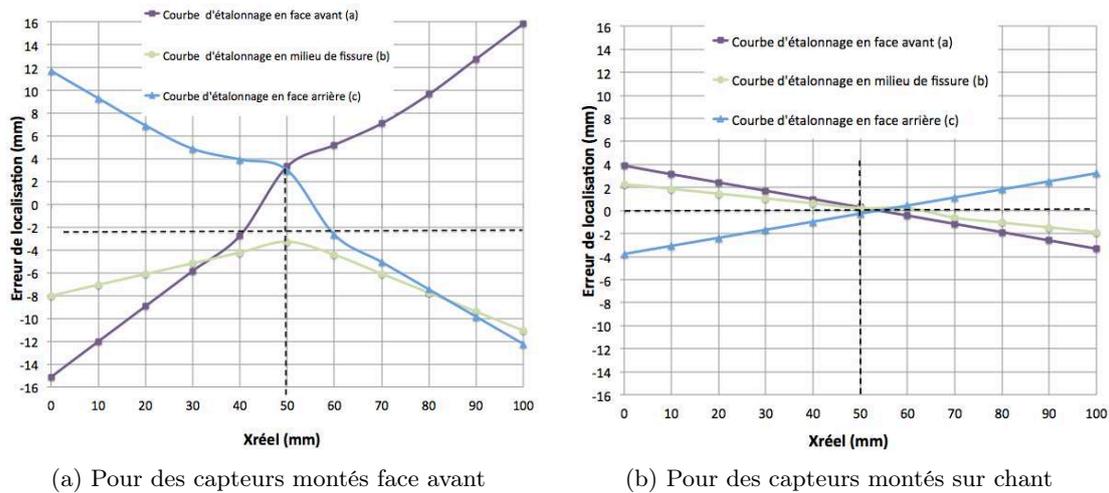


FIGURE 2.45: Erreurs de localisation pour les montages des capteurs

Nous constatons que :

- . Les erreurs de localisation sont maximales au droit des capteurs (côtes $X_{réel}$ 0 et 100 [mm]).
- . Les erreurs de localisation sont les plus faibles lorsqu'on utilise une courbe de correction obtenue avec des cassés de mines réalisés sur la ligne (b).
- . Selon la courbe de correction choisie, l'erreur de localisation peut être négative ou positive. Un événement sera, selon les cas, situé en avance ou en retard par rapport à la réalité.
- . D'après la figure 2.45a, nous pouvons voir que si nous souhaitons minimiser l'erreur sur la localisation des événements, nous devons utiliser la courbe de correction réalisée sur l'axe du plan de fissure. Cette erreur variera de 0 à 11 [mm].
- . D'après la figure 2.45b, nous arrivons à la même conclusion quant à l'emploi de la courbe de correction réalisée sur l'axe du plan de fissure. Par contre l'erreur ne variera que de 0 à 2 [mm].
- . La configuration offrant le moins d'erreur de localisation est celle dont les capteurs sont montés sur chant.

La configuration sur chant est celle qui offre le moins d'erreur quant à la localisation. Le montage retenu fait donc usage de quatre capteurs disposés sur chant, figure 2.46. Ils travailleront par paire, à savoir les capteurs 1-2 et les capteurs 3-4. De cette façon, nous pourrions réaliser pour chaque essai :

- . Deux enregistrements.
- . Deux localisations d'évènements.
- . Une comparaison des résultats obtenus pour la demi éprouvette supérieure et la demi éprouvette inférieure.

De cette façon, nous pourrions constater l'effet de l'orthotropie du matériau, et ce, malgré l'apparente symétrie du montage.

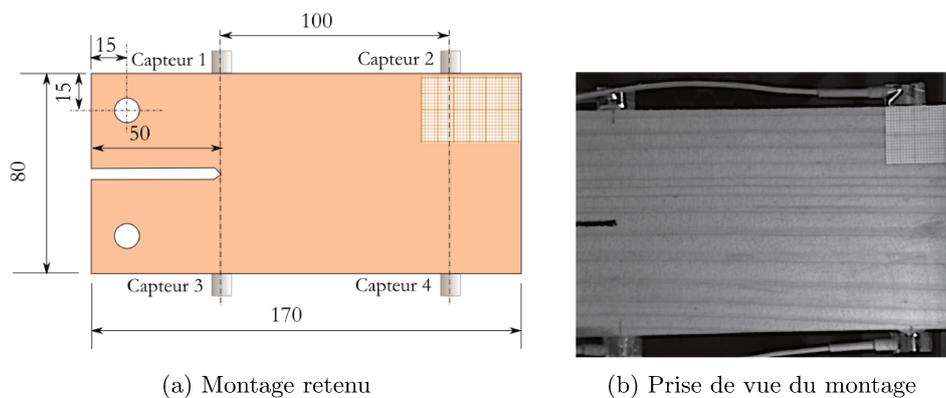


FIGURE 2.46: Caractéristiques du montage retenu (côtes en [mm])

Effets de l'orthotropie

Reprenons les équations que nous avons obtenu pour les matériaux isotropes (2.6) à (2.10) et ajoutons-y l'orthotropie.

Pour l'étude d'un matériau orthotrope, tel que le bois, nous nous retrouvons avec une formule qui tient compte de l'angle formé par la direction de propagation des ondes et le sens des fibres. En utilisant la formule de Hankinson (chapitre 1, paragraphe 5.1) appliquée à la vitesse de propagation des ondes, nous nous trouvons face à un problème un peu plus délicat à résoudre. La vitesse varie selon l'angle fait par l'axe longitudinal et la direction de propagation des fibres (2.11) et (2.12). Ici V_0 correspond à une propagation dans le sens des fibres et V_{90} à une propagation perpendiculairement au sens des fibres (propagation radiale).

$$V_\alpha = \frac{V_0 \cdot V_{90}}{V_0 \cdot \sin^n \alpha + V_{90} \cdot \cos^n \alpha} \quad (2.11)$$

$$V_\alpha = \frac{V_L \cdot V_R}{V_L \cdot \sin^n \alpha + V_R \cdot \cos^n \alpha} \quad (2.12)$$

Où α représente l'angle entre la direction de propagation de l'onde et la direction des fibres, V_L et V_R , respectivement les vitesses longitudinales et radiales. Nous obtenons les équations suivantes (2.13) à (2.16) :

$$t_A = \frac{a}{V_\alpha} \text{ et } t_B = \frac{b}{V_\beta} \quad (2.13)$$

$$t_A - t_B = \frac{2 \cdot X_{\text{EA-linéaire}} - L}{V_L} = \frac{a}{V_\alpha} - \frac{b}{V_\beta} \quad (2.14)$$

$$t_A - t_B = \frac{\sqrt{X_{\text{réel}}^2 + c^2}}{V_L \cdot V_R} \cdot (V_L \cdot \sin^n \alpha + V_R \cdot \cos^n \alpha) - \frac{\sqrt{(L - X_{\text{réel}})^2 + c^2}}{V_L \cdot V_R} \cdot (V_L \cdot \sin^n \beta + V_R \cdot \cos^n \beta) \quad (2.15)$$

$$\frac{2 \cdot X_{\text{EA-linéaire}} - L}{V_L} = \frac{\sqrt{X_{\text{réel}}^2 + c^2}}{V_L \cdot V_R} \cdot (V_L \cdot \sin^n \alpha + V_R \cdot \cos^n \alpha) - \frac{\sqrt{(L - X_{\text{réel}})^2 + c^2}}{V_L \cdot V_R} \cdot (V_L \cdot \sin^n \beta + V_R \cdot \cos^n \beta) \quad (2.16)$$

Dans l'équation (2.16), il est moins évident de trouver une expression littérale à $X_{\text{réel}}$ comme dans le cas de l'équation (2.10). De plus, comme nous l'avons vu précédemment, plusieurs lois expérimentales (Hankinson ou autres) peuvent être utilisées pour approcher la valeur de la vitesse de propagation des ondes en fonction de l'angle fait avec les fibres. Chaque éprouvette étant unique, même si elles sont issues du même plateau, on ne peut pas garantir que les vitesses de propagation longitudinale, tangentielle et radiale soient identiques.

On constate, que si plusieurs formules sont disponibles dans la littérature, toutes ne collent pas parfaitement à la réalité (figure 2.39). Il convient, pour chacune d'elles, de déterminer les coefficients qui semblent mieux correspondre aux valeurs expérimentales. De plus, chaque éprouvette possédant sa propre courbe de variation de vitesse en fonction de l'angle, toute généralisation peut s'avérer hasardeuse.

Devant tant d'incertitudes et quel que soit le modèle choisi, il conviendra de toujours faire référence à des vitesses déterminées expérimentalement sur l'éprouvette plutôt qu'à des valeurs tabulées (Aicher et al., 2001).

Sur la figure 2.47 sont représentées différentes courbes :

. En trait mixte clair est représentée la courbe pour laquelle aucune correction de la

- localisation n'est nécessaire.
- . En trait continu clair est représentée la courbe de correction de localisation due à la géométrie.
 - . En trait mixte foncé est représentée la courbe de correction obtenue par une approximation à l'aide de la formule de Hankinson.
 - . En trait continu foncé est représentée la courbe de correction obtenue par cassés de mine sur une éprouvette de Douglas pour une vitesse effective égale à la vitesse longitudinale ($V=5320 [m/s]$ dans le cas présent). Cette vitesse a été obtenue par cassés de mine, pour une propagation des ondes dans le sens longitudinal.

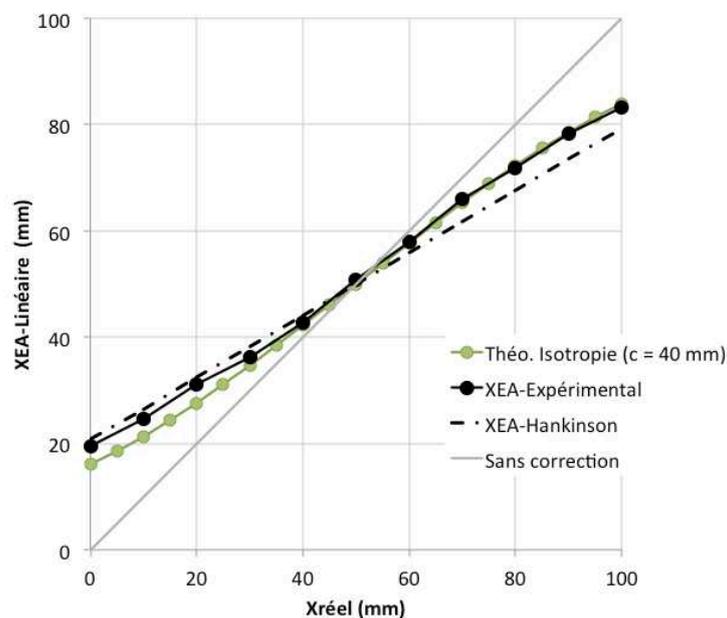


FIGURE 2.47: Effets de l'orthotropie sur les courbes de correction de localisation

Nous pouvons constater qu'il y a un faible écart entre la courbe de correction géométrique (Théo.Isotropie) et celles obtenues par cassé de mine (XEA-Expérimental) ou par approximation à l'aide de la loi de Hankinson (XEA-Hankinson). L'effet de la géométrie est donc prépondérant par rapport à l'effet de l'orthotropie.

Approximation linéaire

Si l'on regarde l'allure des courbes de correction, on voit que l'on peut être tenté de l'approximer par une droite. Afin de tenir compte de l'orthotropie du matériau, nous allons considérer les vitesses de propagation des ondes selon le chemin suivi par celles-ci. Les données sont représentée sur la figure 2.48.

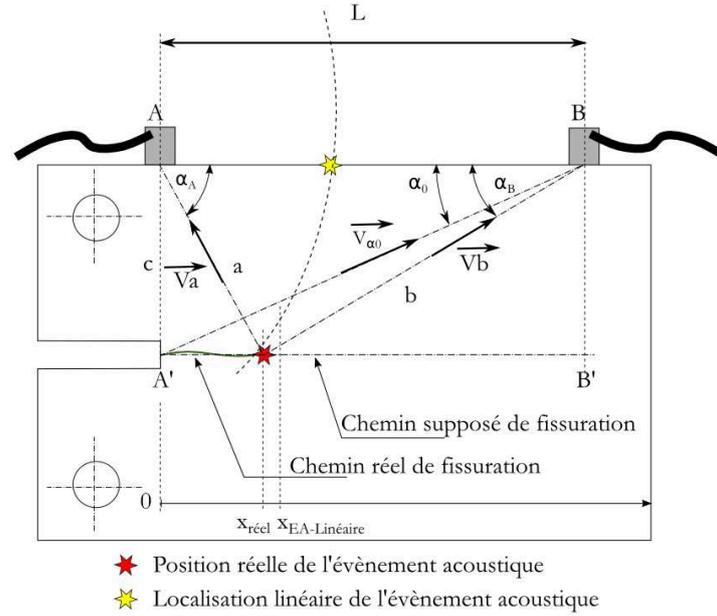


FIGURE 2.48: Données géométriques pour l'approximation linéaire

$$t_A = \frac{a}{V_a} \text{ et } t_B = \frac{b}{V_b} \quad (2.17)$$

$$t_A - t_B = \frac{2 \cdot X_{EA\text{-linéaire}} - L}{V_0} \quad (2.18)$$

$$t_A - t_B = \frac{a}{V_a} - \frac{b}{V_b} = \frac{\sqrt{X_{\text{réel}}^2 + c^2}}{V_a} - \frac{\sqrt{(L - X_{\text{réel}})^2 + c^2}}{V_a} \quad (2.19)$$

$$X_{EA\text{-linéaire}} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{V_0}{V_a} \cdot \sqrt{X_{\text{réel}}^2 + c^2} - \frac{V_0}{V_b} \cdot \sqrt{(L - X_{\text{réel}})^2 + c^2} + L \right] \quad (2.20)$$

Supposons maintenant que cette loi puisse être approximée par une droite. Nous aurons une formule de forme suivante.

$$X_{EA\text{-linéaire}} = J \cdot X_{\text{réel}} + M \quad (2.21)$$

Quand $X_{\text{réel}} = 0$, $X_{EA\text{-linéaire}} = M$

$$M = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{V_0}{V_a} \cdot c - \frac{V_0}{V_b} \cdot \sqrt{L^2 + c^2} + L \right] \quad (2.22)$$

Avec $V_a = V_{90^\circ}$ et $V_b = V_{\alpha_0}$

$$M = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{V_0}{V_{90^\circ}} \cdot c - \frac{V_0}{V_{\alpha_0}} \cdot \sqrt{L^2 + c^2} + L \right] \quad (2.23)$$

Quand $x_{\text{réel}} = L$,

$$J \cdot L + M = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{V_0}{V_{\alpha_0}} \cdot \sqrt{L^2 + c^2} - \frac{V_0}{V_{90^\circ}} \cdot c + L \right]$$

$$J \cdot L = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{V_0}{V_{\alpha_0}} \cdot \sqrt{L^2 + c^2} - \frac{V_0}{V_{90^\circ}} \cdot c + L - \frac{V_0}{V_{90^\circ}} \cdot c + \frac{V_0}{V_{\alpha_0}} \cdot \sqrt{L^2 + c^2} - L \right]$$

$$J \cdot L = \left[\frac{V_0}{V_{\alpha_0}} \cdot \sqrt{L^2 + c^2} - \frac{V_0}{V_{90^\circ}} \right]$$

$$J = \frac{1}{L} \cdot \left[\frac{V_0}{V_{\alpha_0}} \cdot \sqrt{L^2 + c^2} - \frac{V_0}{V_{90^\circ}} \right]$$

$$X_{EA\text{-linéaire}} = \frac{1}{L} \cdot \left[\frac{V_0}{V_{\alpha_0}} \cdot \sqrt{L^2 + c^2} - \frac{V_0}{V_{90^\circ}} \right] \cdot x_{\text{réel}} + \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{V_0}{V_{90^\circ}} \cdot c - \frac{V_0}{V_{\alpha_0}} \cdot \sqrt{L^2 + c^2} + L \right] \quad (2.24)$$

La pente de la courbe est exprimée par l'expression $\frac{1}{L} \cdot \left[\frac{V_0}{V_{\alpha_0}} \cdot \sqrt{L^2 + c^2} - \frac{V_0}{V_{90^\circ}} \right]$. Le seul paramètre qui peut varier dans cette formule est V_{α_0} . Nous avons supposé que la propagation des ondes se faisait de manière rectiligne entre le capteur et la source d'EA. En tenant compte du principe de la loi de Snell-Descartes qui décrit le comportement de la lumière à l'interface de deux milieux et qui s'applique aussi aux ondes ultrasonores, nous pouvons voir que la succession de couches traversées va modifier la longueur du trajet (figure 2.49).

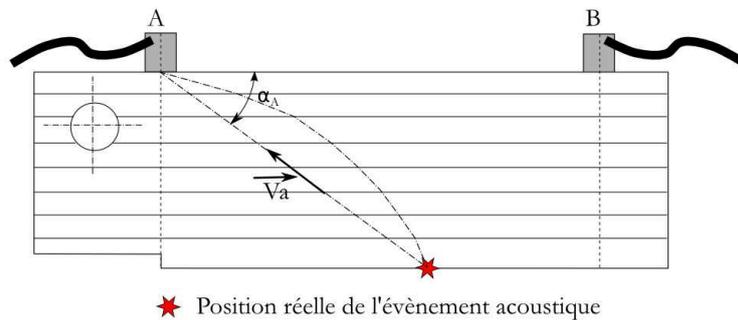


FIGURE 2.49: Cheminement supposé linéaire dans le cas de la localisation et cheminement réel dû à la diffraction.

La vitesse de propagation des ondes est donc mal estimée. Ceci aura une incidence sur la pente de la courbe. Nous pouvons même supposer que la pente de cette courbe sera un indicateur de l'orthotropie du matériau.

4.3 Courbes de correction de la localisation et de l'amplitude

Nous avons pu constater que la courbe de correction de la position intègre les effets de la géométrie de l'éprouvette, l'orthotropie du bois ainsi que le choix de la vitesse effective saisie dans le système d'acquisition. Nous avons pu voir que pour des matériaux homogènes isotropes, le choix d'une vitesse différente de la vitesse de propagation des ondes de compression dans le matériau en modifiait l'allure générale (la pente globale). Pour le bois, à défaut de pouvoir connaître précisément la vitesse de propagation des ondes en fonction de l'angle de fibres, nous utilisons une valeur de vitesse qui sert à l'algorithme de localisation. Cette vitesse porte le nom de vitesse effective et permet d'accéder à des informations exploitables.

La vitesse de propagation des ondes de compression variant dans une plage allant approximativement de 2500 à 5500 [m/s], le choix d'une vitesse dans cette plage peut sembler relever de l'arbitraire. De la même façon que pour les éprouvettes en aluminium et en PVC, nous avons donc procédé à 11 cassés de mine le long du chemin de fissuration. Sur la figure 2.50 sont représentés, sous forme d'histogramme, le nombre d'évènements qui ont été réellement localisés par le système d'émission acoustique.

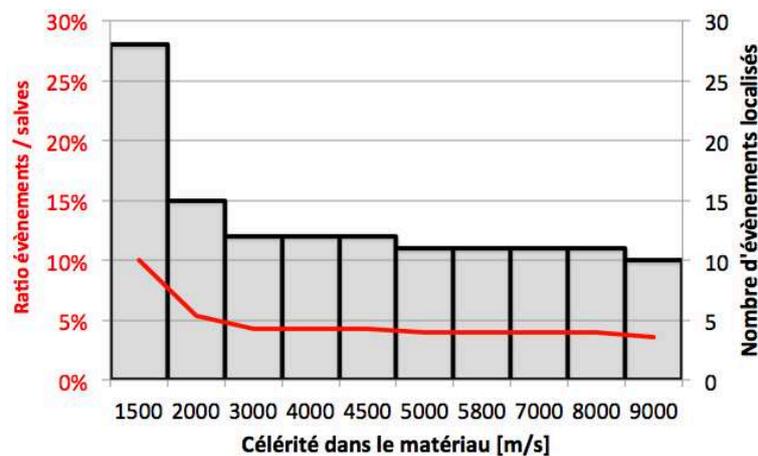
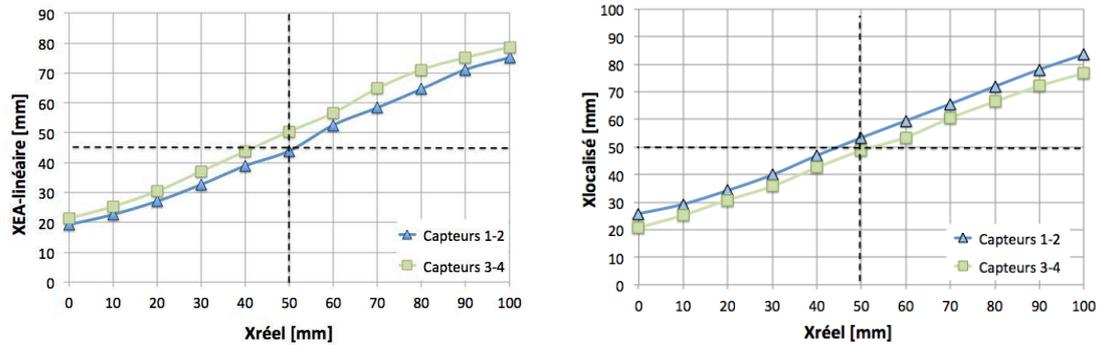


FIGURE 2.50: Effets de la vitesse effective sur la détection du nombre d'évènements pour le Douglas

Nous pouvons constater que pour des vitesses supérieures à 5000 [m/s] la détection des évènements correspond exactement au nombre de cassés de mines qui ont été effectués. Pour une vitesse plus faible, des évènements *fantômes* commencent à apparaître. Par la

suite, nous avons choisi une vitesse de 5325 [m/s]. Cette vitesse correspond à la vitesse longitudinale (V_L), estimée par cassé de mine sur nos premières éprouvettes.

Par la suite, nous avons pu établir des courbes de correction pour chacune de nos demi-éprouvettes. Les courbes obtenues ont toutes la même allure (figure 2.51).



(a) Exemple de courbe de correction pour une éprouvette sèche

(b) Exemple de courbe de correction pour une éprouvette humide

FIGURE 2.51: Exemples de courbes de correction

Pour chaque éprouvette, il n'y a pas de grande différence entre la courbe obtenue pour le couple de capteur 1-2 et le couple de capteur 3-4. Dans le chapitre n°3, afin de voir si l'humidité (ou d'autres données physiques/géométriques des éprouvettes) a une influence sur ces courbes de correction, nous procéderons à une analyse statistique et regarderons s'il existe d'éventuelles corrélations.

Partant de la configuration expérimentale choisie, nous avons, conformément à la norme ASTM Standard E970, procédé à un AST à différents points situés le long de la ligne de fissuration, figure 2.52. Une impulsion, dont l'amplitude est connue et maîtrisée, est émise (99 [dbae]). Le signal transmis dans l'éprouvette est reçu par les deux autres capteurs. On récupère ainsi l'amplitude du signal reçu. Comme on peut le voir sur les illustrations suivantes, la taille du capteur nous impose de travailler au milieu du plan de fissuration.

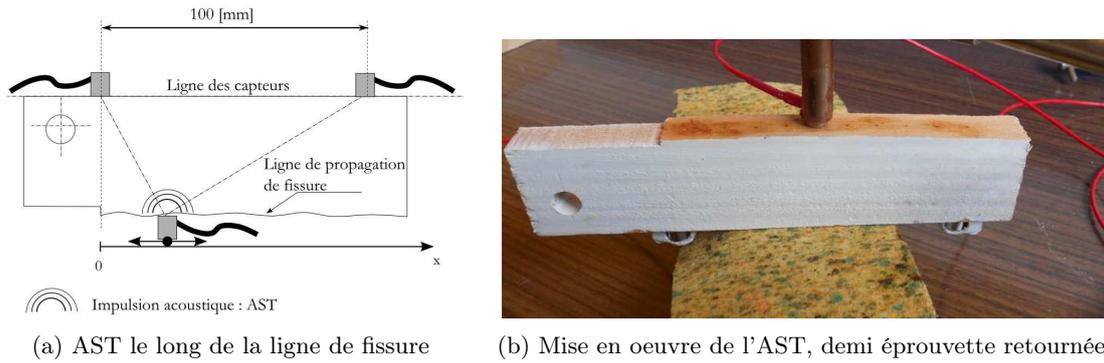


FIGURE 2.52: Principe et mise en œuvre de l'AST

Dans le cas d'une localisation linéaire, lorsqu'un évènement acoustique a lieu, deux formes d'ondes sont enregistrées (une pour chaque capteur). Le signal, qui est retenu par le système d'acquisition acoustique et qui est traité, est celui qui est arrivé en premier. Le deuxième ne sert que pour mesurer un écart de temps avec le premier signal. Cet écart est utile dans la localisation de la source de l'évènement acoustique.

Dans la figure 2.53, quatre courbes de correction d'amplitude sont disponibles, une pour chaque capteur. Lorsque le signal reçu est enregistré et traité, c'est la valeur du $X_{réel}$ qui permet de déterminer quelle courbe de correction d'amplitude utiliser. Par exemple, pour une valeur de $X_{réel}$ inférieure à 50 [mm], la courbe de correction d'amplitude du capteur 1 ou 3 sera utilisée. La correction est déterminée par interpolation linéaire.

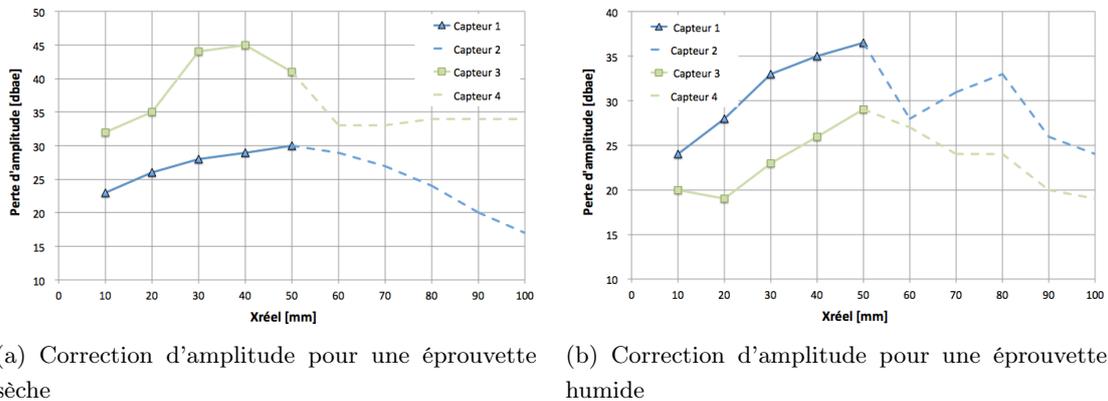


FIGURE 2.53: Perte d'amplitude en fonction de la position de la source

Il faut garder à l'esprit que ce type de correction ne permet de remonter qu'à l'amplitude maximale à la source et ne permet en aucun cas de corriger l'amplitude de chacune des fréquences du signal. A aucun moment, nous n'obtenons le signal émis à la source. De plus, comme nous pouvons le voir sur les figures 2.53a et 2.53b, chaque éprouvette possède ses propres courbes de correction.

Pour tous les essais, les corrections sont réalisées de la manière suivante : une correction de la localisation pour passer du $X_{EA\text{-linéaire}}$ au $X_{\text{réel}}$, et une correction de l'amplitude pour passer de l'amplitude enregistrée à l'amplitude corrigée. Les différentes étapes de la correction sont visibles dans les graphiques présents dans les figures 2.54.

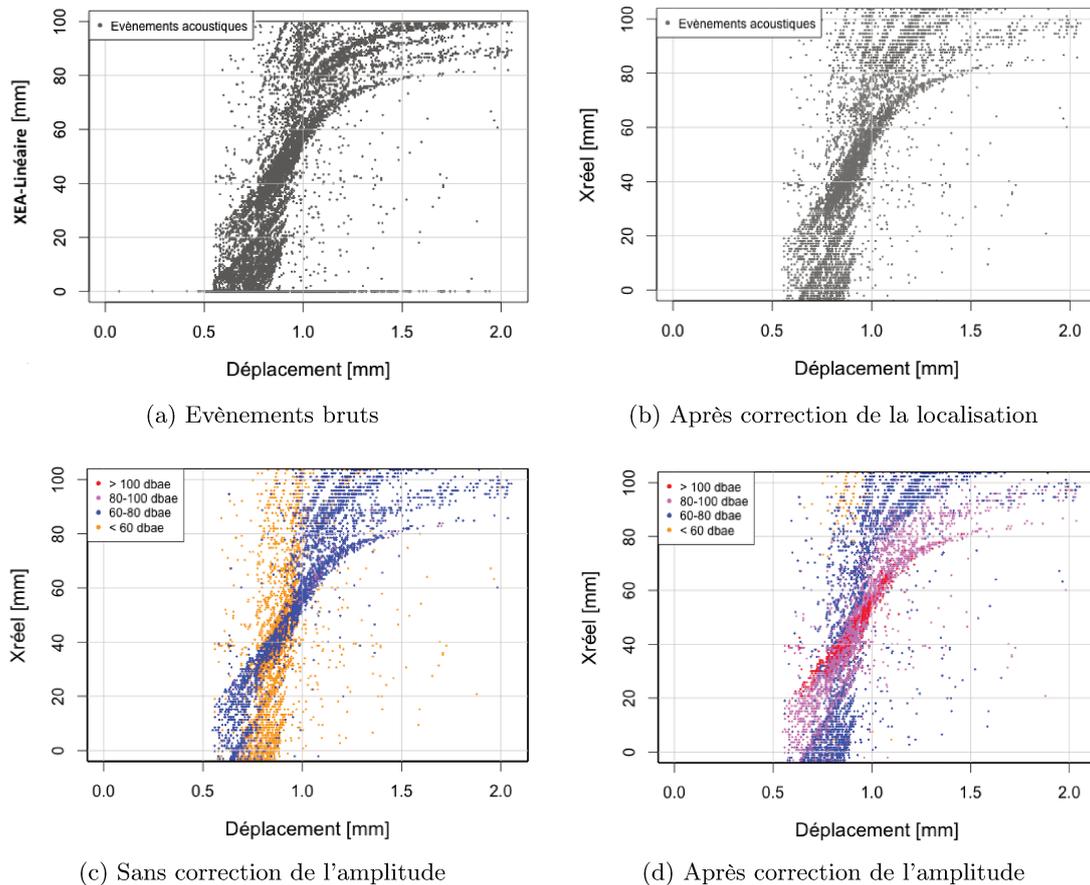


FIGURE 2.54: Localisation des événements

Sur la figure 2.54a sont représentés tous les événements qui ont été localisés sans qu'aucune correction (localisation et/ou amplitude) ne leur soit appliquée. Comme nous effectuons une localisation linéaire, tous les événements détectés en dehors de l'intervalle 0 - 100 [mm] pour un $X_{EA\text{-Linéaire}}$ sont représentés de manière *massive* à la côté 0 et 100.

Le passage de la figure 2.54a à la figure 2.54b montre les effets de la correction en localisation. Ne sont retenus, lors de l'enregistrement, que les événements localisés entre les capteurs. La deuxième figure, quant à elle, représente ces mêmes événements après recalcul de leur position.

Le passage de la figure 2.54c à la figure 2.54d montre les effets de la correction

d'amplitude sur les évènements relocalisés. Ils sont représentés à l'aide de plages de valeurs arbitrairement choisies. La correction en amplitude augmente la valeur de l'amplitude des évènements acoustiques. Ceci peut avoir son importance si l'on retient cette variable comme un élément pertinent pour effectuer une classification ou une discrimination par exemple.

5 Conclusion

Un protocole expérimental a été développé dans le but de mettre au point des techniques de correction dans la problématique de la localisation de la pointe de fissure. Parallèlement à l'écoute acoustique, le dispositif expérimental a été doublé par une technique d'analyse d'images par détection de contours afin d'avoir des données de référence qui permettent, au terme de cette première partie, de montrer la pertinence et l'apport de l'émission acoustique dans la description et la localisation des signaux propres à la propagation de fissure.

A cette échelle centimétrique et en environnement constant (7,5% et 20% d'humidité interne), plusieurs configurations ont été testées pour aboutir à des courbes de correction, en termes de correction de localisation, qui intègrent la déportation des capteurs sur chant parallèlement au plan de fissuration, la géométrie de l'éprouvette DCB ainsi que l'orthotropie de la vitesse de propagation des ondes dans le matériau. Les courbes d'étalonnage expérimentales ont été validées sur des matériaux modèles isotropes (aluminium et PVC) et sur le matériau de notre étude (Douglas) dont l'orthotropie a été mise en évidence par des essais d'AST. Une correction en terme d'amplitude a également été réalisée. Sur le même principe utilisé avec les courbes de correction en localisation, l'amplitude maximale à la source a été corrigée et nous a permis d'obtenir une information supplémentaire sur les signaux localisés.

Nous disposons maintenant des données de détection et de localisation de la propagation de fissure, à partir desquelles nous allons proposer des outils pour approcher le comportement et la cinétique de la fissure observée, que ce soit sur un plan mécanique ou énergétique.

Chapitre 3

Analyse temporelle et spatiale

Sommaire

1	Introduction	118
2	Traitement statistique des données	118
2.1	Jeu de données et notation matricielle	119
2.2	Représentations graphiques	120
2.3	Application pour l'analyse des données géométriques	121
3	Analyse temporelle des données acoustiques	124
3.1	Précisions sur le protocole expérimental : choix des essais représentatifs ou particuliers	124
3.2	Données mécaniques et suivi de fissure par imagerie	126
3.3	Activité acoustique	133
3.4	Etude énergétique	138
4	Analyse spatiale des données acoustiques	142
4.1	Activité acoustique du point de vue des évènements	142
4.2	Correction de la position et de l'amplitude	144
4.3	Outils acoustiques de détection de la pointe de fissure	146
4.4	Calcul du taux de restitution d'énergie moyen G_c par EA	154
5	Détection de la pointe de fissure lors d'un essai en fluage sur une éprouvette à inertie variable	156
5.1	Conditions expérimentales	156
5.2	Courbes d'étalonnage	158
5.3	Cinétique de fissuration	160
6	Conclusion	164

1 Introduction

Une étude énergétique est proposée dans ce chapitre. Il s'agit d'étudier les relations qu'il y a, par exemple, entre les activités acoustiques enregistrées lors de la fissuration pendant les essais et l'état mécanique lors de la fissuration. L'ensemble du protocole de traitement des données acoustiques est ensuite présenté en y intégrant la localisation d'évènements ainsi que la correction d'amplitude.

A l'aide de l'outil statistique, différentes études de corrélations sont envisagées pour mettre en évidence un lien entre des caractéristiques (anatomiques, géométriques) propres aux éprouvettes et les énergies (acoustique et mécaniques). Enfin, afin de se placer dans une situation analogue à celle d'un diagnostic d'ouvrage, une étude de la fissuration lors d'un chargement en fluage est abordée sur une éprouvette DCB à inertie variable.

2 Traitement statistique des données

A différents stades des travaux effectués durant cette thèse, une quantité importante d'informations a été recueillie. Nous pouvons considérer différents types de données :

- . Purement géométriques (épaisseur moyenne des cernes, angle du fil) ou physique (densité, teneur en eau massique). Elles ont été collectées lors des différentes pesées lorsque les éprouvettes ont été conditionnées (chapitre 2, paragraphe 2.2).
- . D'autres sont déterminées ou calculées à partir des courbes force-déplacement récupérées par la machine de traction durant l'essai.
- . Les pointes de fissures obtenues par imagerie sur chacune des faces des éprouvettes.
- . Certaines sont liées aux courbes d'étalonnage (perte d'amplitude maximale, coefficient directeur de la droite d'étalonnage de la localisation). Elles sont propres aux éprouvettes qui ont été testées (chapitre 2, paragraphe 4.3).
- . Enfin, les autres sont propres au système d'EA. Nous avons vu au premier chapitre (paragraphe 5.2) qu'une analyse multivariée était un outil pertinent et courant pour effectuer des classifications, des regroupements lorsque le nombre d'individus et de variables devenaient importants.

Lorsqu'il s'agit de traiter simultanément un grand nombre de variables, il est nécessaire de faire appel aux outils de statistique descriptive multidimensionnelle. Par défaut, les

méthodes utilisées sont purement descriptives, elles ne supposent, *a priori*, aucun modèle de type probabiliste.

Les données dont nous disposons dans nos essais sont quantitatives. Nous pouvons effectuer une Analyse des Correspondances pour mettre en évidence d'éventuelles liaisons entre elles. Enfin, il est possible d'effectuer une ACP pour préparer une classification de celles-ci.

2.1 Jeu de données et notation matricielle

Considérons q caractéristiques statistiques réelles X^j ($j = 1, \dots, q$) observées sur n individus i ($i = 1, \dots, n$) affectées des poids w_i . $\forall i = 1, \dots, n : w_i > 0$ et $\sum_{i=1}^n w_i = 1$
 $\forall i = 1, \dots, n : x_i^j = X^j(i)$, mesure de X^j sur le i^{me} individu

	X^1	\dots	X^j	\dots	X^q
--	-------	---------	-------	---------	-------

1	x_1^1	\dots	x_1^j	\dots	x_1^q
\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
i	x_i^1	\dots	x_i^j	\dots	x_i^q
\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
n	x_n^1	\dots	x_n^j	\dots	x_n^q

Tableau 3.1: Matrice des données acoustiques

A chaque individu i est associé le vecteur X_i de \mathbb{R}^n contenant la i -ème ligne de X mise en colonne.

A chaque variable x^j est associé un vecteur X^j de \mathbb{R}^q contenant la j -ème colonne de X .

En effectuant une analyse par composante principale, nous travaillons sur des données centrées et réduites. Centrer une variable revient à soustraire son espérance à chacune de ses valeurs initiales. Réduire une variable consiste à diviser toutes ses valeurs par son écart-type. Aussi pour chaque valeur nous avons (3.1) :

$$\bar{X}_i^j = \frac{X_i^j - E(X^j)}{\sigma(X^j)} \tag{3.1}$$

2.2 Représentations graphiques

Le logiciel d'analyse statistique (le langage R dans la cas présent) permet d'étudier les jeux de données, d'en préciser le degré de corrélation ainsi que la significativité à l'aide de la valeur p. Afin de rendre les résultats plus intelligibles, il est possible d'utiliser un corrélogramme pour mettre en évidence d'éventuels liens. A titre d'exemple, étudions les données issues d'une base de données sur les voitures (figures 3.1). Indépendamment de toute compréhension des variables et données qui figurent dans ces tableaux, l'étude des corrélations s'avère vite fastidieuse.

	mpg	cyl	disp	hp	drat	wt	qsec	vs	am	gear	carb
Mazda RX4	21.0	6	160	110	3.90	2.620	16.46	0	1	4	4
Mazda RX4 Wag	21.0	6	160	110	3.90	2.875	17.02	0	1	4	4
Datsun 710	22.8	4	108	93	3.85	2.320	18.61	1	1	4	1
Hornet 4 Drive	21.4	6	258	110	3.08	3.215	19.44	1	0	3	1
Hornet Sportabout	18.7	8	360	175	3.15	3.440	17.02	0	0	3	2
Valiant	18.1	6	225	105	2.76	3.460	20.22	1	0	3	1

(a) Données brutes de mtcars

	mpg	cyl	disp	hp	drat	wt	qsec	vs	am	gear	carb
mpg	1.00	-0.85	-0.85	-0.78	0.68	-0.87	0.42	0.66	0.60	0.48	-0.55
cyl	-0.85	1.00	0.90	0.83	-0.70	0.78	-0.59	-0.81	-0.52	-0.49	0.53
disp	-0.85	0.90	1.00	0.79	-0.71	0.89	-0.43	-0.71	-0.59	-0.56	0.39
hp	-0.78	0.83	0.79	1.00	-0.45	0.66	-0.71	-0.72	-0.24	-0.13	0.75
drat	0.68	-0.70	-0.71	-0.45	1.00	-0.71	0.09	0.44	0.71	0.70	-0.09
wt	-0.87	0.78	0.89	0.66	-0.71	1.00	-0.17	-0.55	-0.69	-0.58	0.43

(b) Corrélation sur les données de mtcars

FIGURE 3.1: Données mtcars (langage R)

Les mêmes données, représentées sous forme de corrélogramme donnent le graphique proposé en figure 3.2.

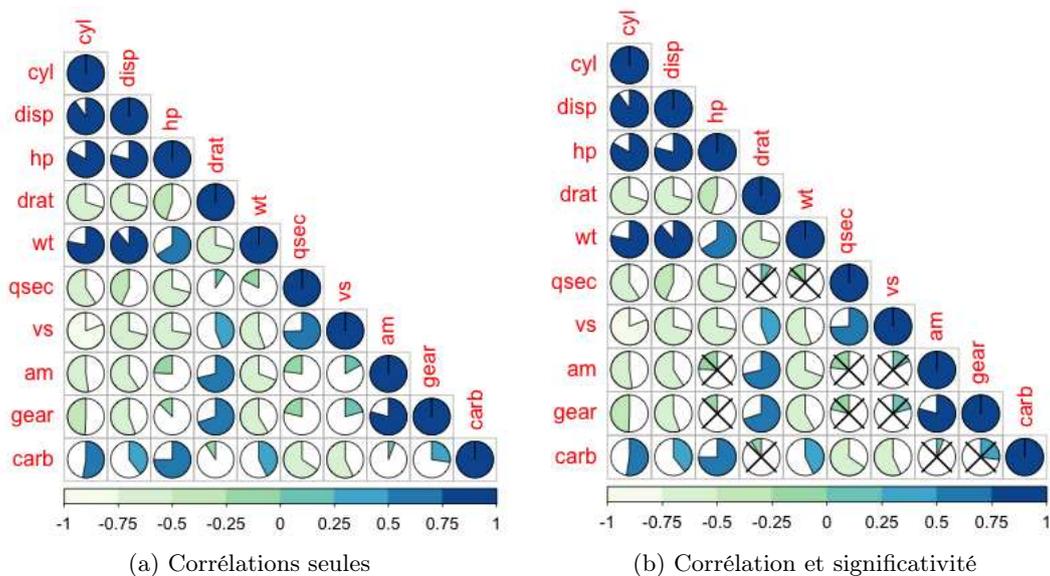


FIGURE 3.2: Corrélogramme des données mtcars (langage R)

Dans ce type de graphique, figure 3.2a, la corrélation entre deux variables est exprimée sous forme d'un diagramme circulaire, à l'intersection des colonnes et des lignes. Lorsque la portion du diagramme circulaire est presque complète, la corrélation est importante. Lorsque la couleur est foncée elle est positive alors que dans le cas de la couleur claire elle est négative. Une information complémentaire est apportée sur le graphique, figure 3.2b. Lorsque le diagramme n'est pas barré cela signifie que, si corrélation il y a entre deux variables, les écarts constatés ne sauraient être expliqués du simple fait du hasard. Ce nombre est utilisé en statistiques inférentielles pour conclure sur le résultat d'un test statistique. La procédure généralement employée consiste à comparer la valeur p à un seuil préalablement défini (traditionnellement 5 %). Si la valeur- p est inférieure à ce seuil, on rejette l'hypothèse nulle en faveur de l'hypothèse alternative, et le résultat du test est déclaré *statistiquement significatif*. Dans le cas contraire, si la valeur- p est supérieure au seuil, on ne rejette pas l'hypothèse nulle et on ne peut rien conclure quant aux hypothèses formulées : une incertitude demeure sur la qualité et le risque d'erreur dans l'analyse des résultats obtenus.

2.3 Application pour l'analyse des données géométriques

Dans le chapitre traitant des données géométriques et des courbes d'étalonnage (chapitre 2 paragraphes 2.2 et 4.3), nous avons pu voir que chaque éprouvette (ou demi éprouvette après essai) possédait ses propres caractéristiques géométriques ainsi que ses propres courbes d'étalonnage.

Nous avons aussi constaté qu'il y a toujours un décalage entre la courbe d'étalonnage (localisation et amplitude à la source) du couple de capteurs 1-2 et du couple de capteurs 3-4. Malgré tout, pour une même éprouvette, ces courbes suivent globalement la même pente. Afin de voir l'influence de l'humidité, de données physiques ou géométriques des éprouvettes, sur ces courbes d'étalonnage, procédons à une analyse statistique et regardons s'il existe une éventuelle corrélation.

Le chemin de propagation de la fissure étant supposé se produire au milieu de l'éprouvette, nous avons réalisé une série de mesures sur chacune des demi-éprouvettes (figure 3.3). Comme nous ne pouvons pas prédire où elle va passer exactement, nous avons pris le parti de ne pas prendre en compte le cerne du milieu mais seulement ce qu'il y avait de part et d'autre de l'entaille. Nous avons ainsi récupéré le nombre de cernes, la pente longitudinale moyenne (pente du fil de la face avant et de la face arrière), la pente tangentielle moyenne (pente tangentielle prise sur les deux tranches) ainsi que l'épaisseur moyenne du bois de printemps dans les cernes. Les résultats des dispersions statistiques de ces données sont disponibles dans le tableau 3.2.

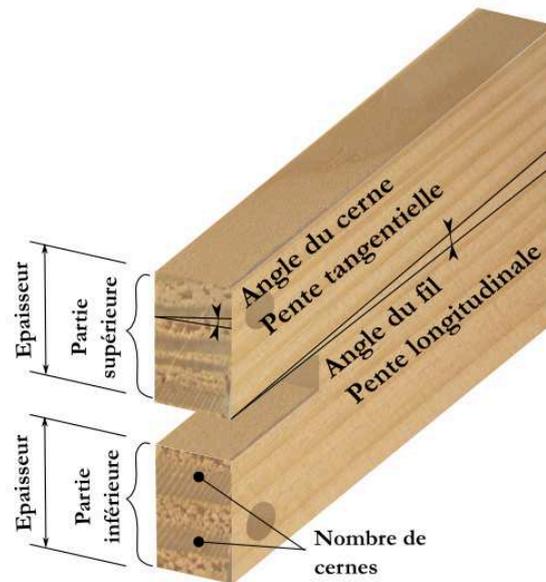


FIGURE 3.3: Paramètres géométriques

Grandeur	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
Angle moyen du fil [°] (<i>Pente_long</i>)	1,7	0	5	1,38
Angle moyen des cernes [°] (<i>Pente_tang</i>)	5,73	0	23	4,67
Nombre moyen de cernes (<i>Nbre_cerne</i>)	5,77	3,32	8,25	1,35
Epaisseur moyenne du bois de printemps [mm] (<i>Epaisseur_print</i>)	4,36	2,08	8,06	1,59
Pente correction linéaire (<i>Pente_X_reel</i>)	1,66	1,20	1,94	0,15
Perte d'amplitude maximale [dB _{AE}] (<i>Perte_amplitude</i>)	41,6	29	57	7,76

Tableau 3.2: Dispersion statistique des données géométriques et acoustiques pour les éprouvettes

Examinons les corrélations de chacune de ces données pour chaque conditionnement

des éprouvettes. Afin de rendre la lecture de ces corrélations plus aisée, examinons leur corrélogramme, figure 3.4.

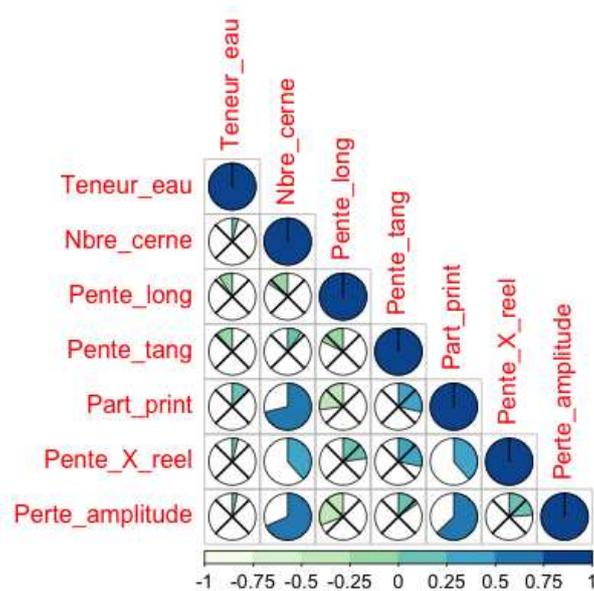


FIGURE 3.4: Corrélogramme sur nos éprouvettes

Sur l'ensemble des éprouvettes testées, nous pouvons affirmer :

- . Qu'il y a une corrélation positive entre la pente de la droite d'étalonnage de la localisation $f(X_{\text{réel}}) = a \cdot X_{\text{EA_localisé}} + b$ et le nombre de cernes traversés par les ondes d'EA. Comme nous l'avons vu précédemment (chapitre 2, figure 2.49), la pente est un indicateur du niveau d'orthotropie du matériau. L'effet de l'orthotropie du bois se ressent aussi lorsque l'on considère l'influence de la part du bois de printemps dans les cernes.
- . Le même type de corrélation est constaté pour la perte d'amplitude : elle aussi est un indicateur de l'orthotropie du bois.

Si les influences de l'angle longitudinal et de l'angle tangentiel semblent non négligeables (corrélation supérieure à 20 %), la significativité du résultat n'est pas satisfaisante (valeur p supérieure à 5%).

Par contre, pour toutes les autres corrélations étudiées, il n'est pas possible de conclure. Que les coefficients de corrélation soient faibles ou non, les valeurs p nous indiquent que les écarts constatés peuvent être le fruit du hasard ou d'erreurs de manipulation. Ainsi, nous ne pouvons pas conclure quant à l'influence de l'humidité sur la pente de cette droite de correction.

Un moyen pour obtenir des résultats plus probants pourrait être d'augmenter le nombre d'éprouvettes testées.

3 Analyse temporelle des données acoustiques

3.1 Précisions sur le protocole expérimental : choix des essais représentatifs ou particuliers

Plusieurs éprouvettes ont été utilisées dans le cadre de ces travaux. Si certaines ont servi à la mise au point de différents réglages, 17 (5 humides et 12 sèches) ont été testées selon le protocole expérimental décrit au chapitre précédent. Afin de rendre compte des résultats obtenus, 4 éprouvettes seulement ont été retenues pour venir illustrer ce chapitre. Elles ont été choisies pour leur représentativité ou parce qu'elles viennent illustrer un ou plusieurs points particuliers décrits plus loin. Des résultats complémentaires, pour toutes les éprouvettes testées, sont présentés en annexe D.

Dans le tableau 3.3 les éprouvettes S1 et H1 correspondent à des échantillons à des niveaux de teneur en eau différents qui ont été testés dans un strict respect du protocole. Les éprouvettes S2 et S3 représentent des essais où certains éléments du protocole expérimental ont été volontairement dégradés.

Eprouvette	Conditionnement	Remarques
S1	20 [°C] – 40 %Hr	
H1	30 [°C] – 90 %Hr	
S2	20 [°C] – 40 %Hr	Chargement dissymétrique
S3	20 [°C] – 40 %Hr	Une caméra pendant l'essai

Tableau 3.3: Eprouvettes retenues pour la présentation des résultats

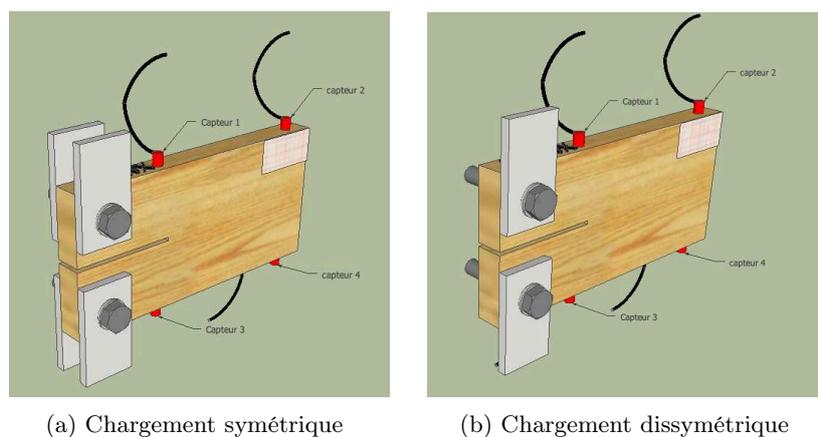


FIGURE 3.5: Chargements utilisés lors des essais conformément au protocole (a), et de manière dissymétrique (b)

Sur la figure 3.5a est représenté le cas du chargement symétrique qui est décrit au chapitre précédent. Ce montage a été utilisé sur 17 éprouvettes. La figure 3.5b représente un cas de chargement dissymétrique qui a été testé sur une seule éprouvette (éprouvette S3). Ce montage a pour but de mettre en évidence des différences qu'il pourrait y avoir avec le cas de chargement originel.

Les enregistrements issus de l'EA sont liés à la disposition des capteurs sur une éprouvette et à la manière dont ils sont associés. Dans notre cas (figure 3.6a), 4 capteurs sont disposés sur chant. Un même événement acoustique est enregistré par chacun des capteurs. Comme nous pouvons le constater, le chemin parcouru pour rejoindre chacun des capteurs est différent. La distance parcourue et l'angle avec le fil du bois sont différents. Le nombre de cernes traversés représente lui aussi une différence *naturelle*, qui peut être constatée entre la partie supérieure et la partie inférieure (figure 3.6b).

La même onde élastique provenant de l'éprouvette est enregistrée à des instants différents par chacun des capteurs. La forme d'onde reçue au niveau des capteurs (et donc enregistrée) est plus ou moins modifiée selon le (ou les) chemin(s) qui est (sont) emprunté(s). Le signal enregistré n'est qu'une représentation altérée de la forme d'onde émise par la source EA.

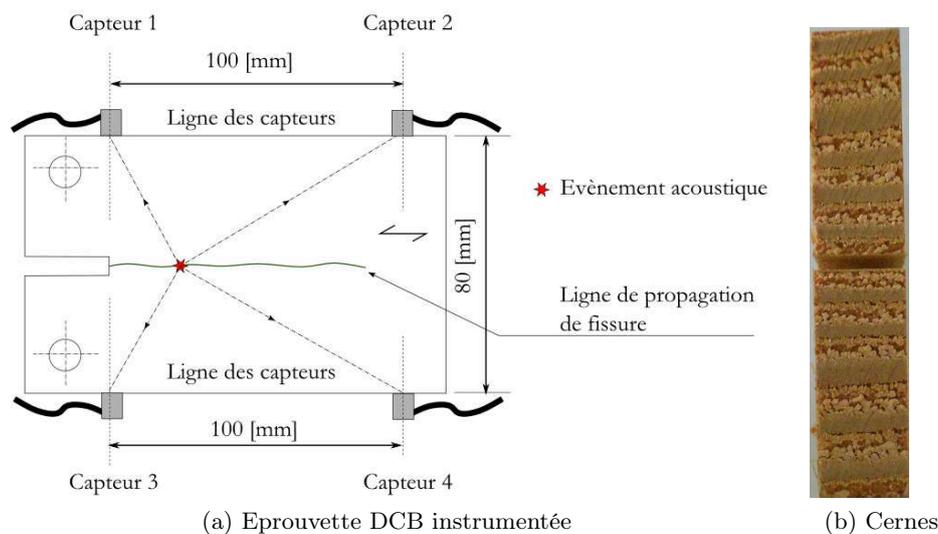


FIGURE 3.6: Mise en place des capteurs sur les éprouvettes DCB et dissymétrie naturelle

Compte tenu de la disposition des capteurs et de leur éloignement de l'évènement acoustique, un même phénomène n'est pas perçu et n'est donc pas enregistré de la même façon. Les clichés présentés sur la figure 3.7 montrent que la fissure amorce au droit des capteurs 1 et 3, se propage et se termine quasiment à la verticale des capteurs 2 et 4. Au début de l'essai, les capteurs 1 et 3 fournissent les formes d'onde les moins altérées alors qu'à la fin de l'essai, ce sont les capteurs 2 et 4.

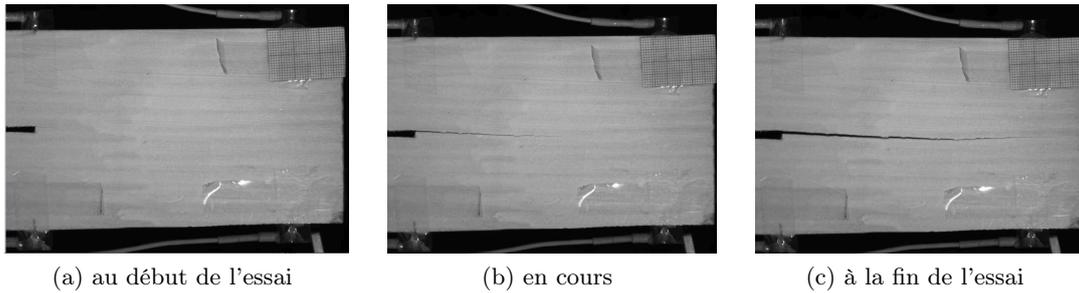


FIGURE 3.7: Evolution de la pointe de fissure à différents instants de l'essai de l'éprouvette S1

Au chapitre 2 (page 88), nous avons pu voir que dans chacun des graphiques, la distance entre le plan de fissuration et le chant où sont fixés les capteurs était considérée comme constante. Sur la figure 3.7, nous pouvons voir qu'il n'en est rien : la fissure suit le sens des fibres.

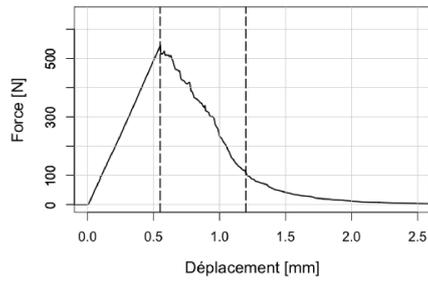
3.2 Données mécaniques et suivi de fissure par imagerie

Courbes force - déplacement

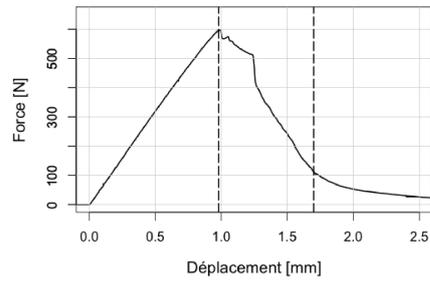
A l'aide de la presse électromécanique, nous récupérons, pour chaque essai, les données *force-déplacement*. Des résultats sont présentés sur la figure 3.8.

A la lecture de ces graphiques, on peut constater que pour chaque éprouvette :

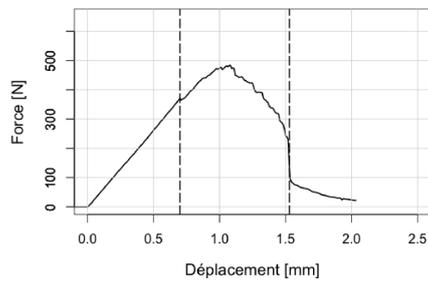
- . Le comportement est de nature quasi fragile.
- . La phase de croissance linéaire de la force correspond à un comportement élastique. La fin de cette phase est marquée par un premier trait vertical en pointillé sur le graphique.
- . Une première phase décroissante de la force qui correspond à une fissuration rapide. La fin de cette phase est marquée par un deuxième trait vertical en pointillé sur le graphique.
- . Une deuxième phase décroissante plus lente de la force qui correspond à la fin de l'essai durant laquelle l'éprouvette n'oppose plus beaucoup de résistance au déplacement imposé par la machine d'essai.



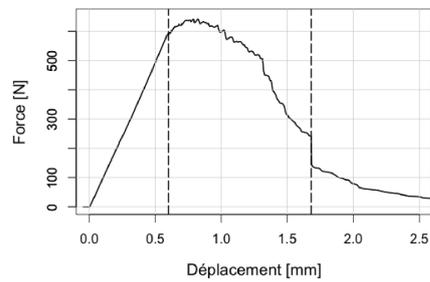
(a) Epreuve S1



(b) Epreuve H1



(c) Epreuve S2



(d) Epreuve S3

FIGURE 3.8: Courbes force-déplacement pour les éprouvettes S1, H1, S2 et S3

Pour les 17 éprouvettes testées, les valeurs moyenne, minimale, maximale et écart-type sont fournies dans le tableau 3.4.

Grandeur	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
Fmax [N]	601	483	781	82,1
Raideur [N/mm]	744	464,5	1116,2	208,3

Tableau 3.4: Dispersion statistique de la force maximale et de la raideur pour les éprouvettes sèches

Grandeur	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
Fmax [N]	569	458	561	89,2
Raideur [N/mm]	546	362,4	647,6	142,8

Tableau 3.5: Dispersion statistique de la force maximale et de la raideur pour les éprouvettes humides

Propagation de fissure par imagerie

A l'aide du système d'acquisition d'images, les faces avant et arrière des éprouvettes ont pu être photographiées régulièrement. De ces clichés ont été extraites les positions de la pointe de fissure. La position moyenne a été déterminée en faisant la moyenne arithmétique des deux pointes de fissure (face avant et face arrière), figure 3.9.

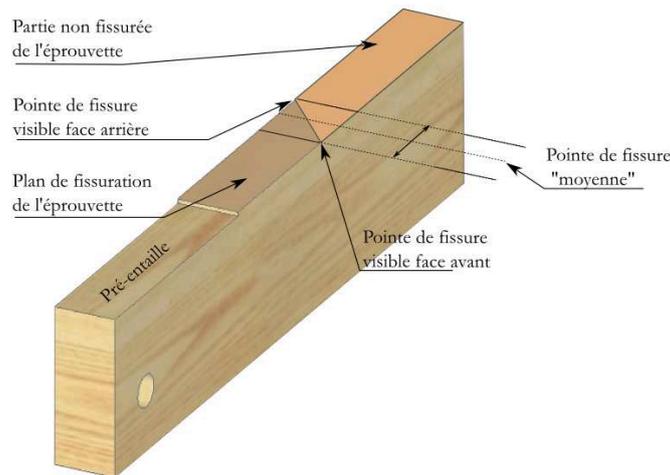


FIGURE 3.9: Hypothèse de la pointe de fissure *moyenne*

Pour les quatre éprouvettes précédemment sélectionnées les courbes de propagation de fissure sont présentées sur la figure 3.10. Sont représentées, en pointillés clairs, les positions des pointes de fissure en face avant et en face arrière. Toujours en pointillés, mais plus sombre, est représentée la position d'une pointe de fissure dite « moyenne ». D'une manière générale, ces courbes se décomposent en trois phases :

- . Une première phase durant laquelle aucune fissure n'est détectable. La fin de cette phase est marquée par un trait vertical en pointillés sur le graphique.
- . Une deuxième phase durant laquelle les pointes de fissures évoluent de façon quasi constante. La fin de cette phase est marquée par un deuxième trait vertical.
- . Une troisième phase durant laquelle les fissures évoluent de moins en moins rapidement.

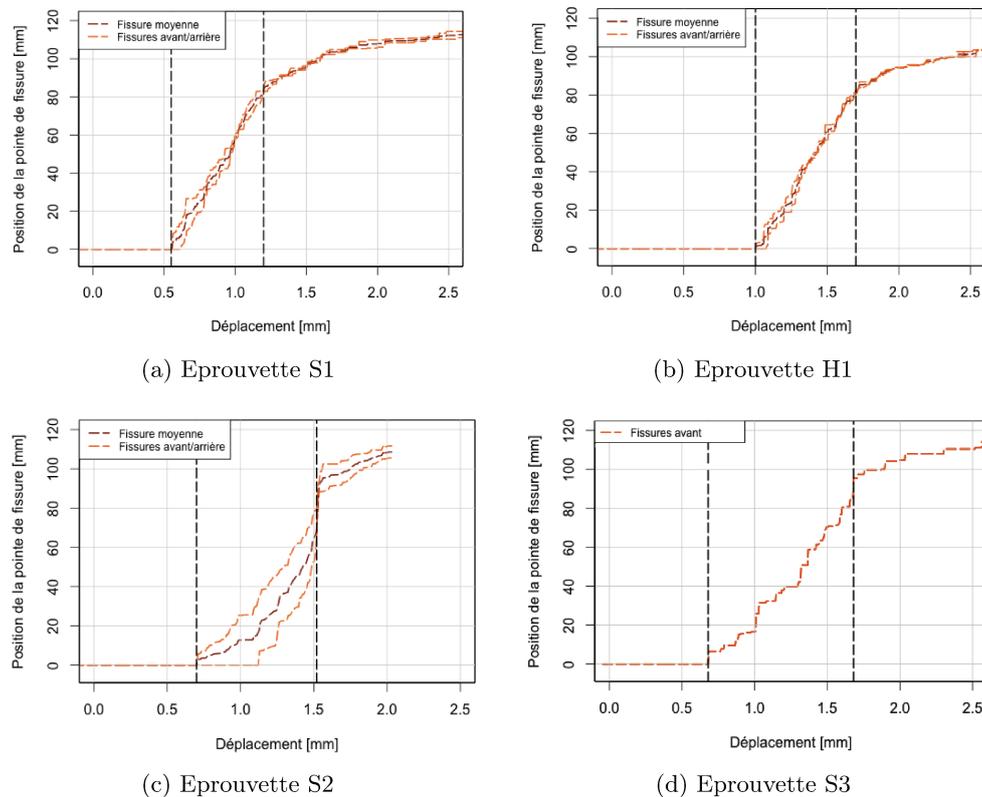


FIGURE 3.10: Courbes de propagation de fissure par imagerie pour les éprouvettes S1, H1, S2 et S3

D'une manière générale, il n'y a pas de différence notable entre les courbes obtenues sur les éprouvettes sèches et humides comme en attestent les courbes obtenues pour S1 (figure 3.10a) et H1 (figure 3.10b). On peut seulement constater un *léger* décalage entre la pointe de fissure face avant et la pointe de fissure face arrière. Sur tous les essais, nous avons pu constater que la fissure en face avant était toujours en avance par rapport à la fissure en face arrière. Ce décalage peut être la conséquence d'une dissymétrie du chargement.

Dans le cas de l'éprouvette S2, un chargement dissymétrique (figure 3.5b) a été appliqué. Dans ce cas, le décalage entre la pointe de fissure face avant et la pointe de fissure face arrière est plus prononcé et atteint 20 [mm] pour quelques déplacements.

Enfin, si l'on regarde l'éprouvette S3 où une seule face a été filmée, nous pouvons supposer, qu'à la lecture des courbes précédentes, il doit manquer une information. Nous ne savons pas s'il existe un décalage entre la fissure évoluant en face avant et celle évoluant en face arrière.

A la lecture des graphiques, nous pouvons aussi constater que les courbes de fissuration ne débutent pas toutes au même moment. De plus, la partie rectiligne ne semble pas

présenter la même pente, ni la même durée, pour chaque éprouvette. Les résultats obtenus pour les éprouvettes sèches et humides sont présentés dans les tableaux 3.6 et 3.7.

Grandeur	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
Vitesse de propagation de la fissure [mm/s]	1,09	0,69	2,15	0,36
Valeur du déplacement au début de fissure visuelle [mm]	0,84	0,55	1,3	0,19
Plage du déplacement pour la propagation linéaire de la fissure [mm]	0,74	0,45	1,68	0,32

Tableau 3.6: Dispersion statistique de la cinétique de fissuration pour les éprouvettes sèches

Grandeur	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
Vitesse de propagation de la fissure [mm/s]	1	0,96	1,10	0,07
Valeur du déplacement au début de fissure visuelle [mm]	1,11	1,00	1,28	0,13
Plage du déplacement pour la propagation linéaire de la fissure [mm]	0,67	0,62	0,75	0,06

Tableau 3.7: Dispersion statistique de la cinétique de fissuration pour les éprouvettes humides

Il faut garder à l'esprit que ces prises de vue ont été réalisées à une fréquence de 2 [Hz]. La position d'une pointe de fissure est donc une donnée discrète. Les *sauts* que l'on peut constater sur les courbes ne sont pas nécessairement le reflet de la réalité. L'évolution d'une pointe de fissure peut se faire de manière brusque ou continue et peut être la conséquence d'une mauvaise détermination visuelle de la pointe de fissure. La définition des images est de 7,5 [pix/mm] soit 0,133 [mm/pix]. La vitesse de propagation des fissures varie dans une plage de 0,7 à 2,15 [mm/s] soit 0,35 à 1,08 [$mm/image$]. Toute variation de fissure inférieure à 0,133 [mm] entre deux prises de vue risque de passer inaperçue.

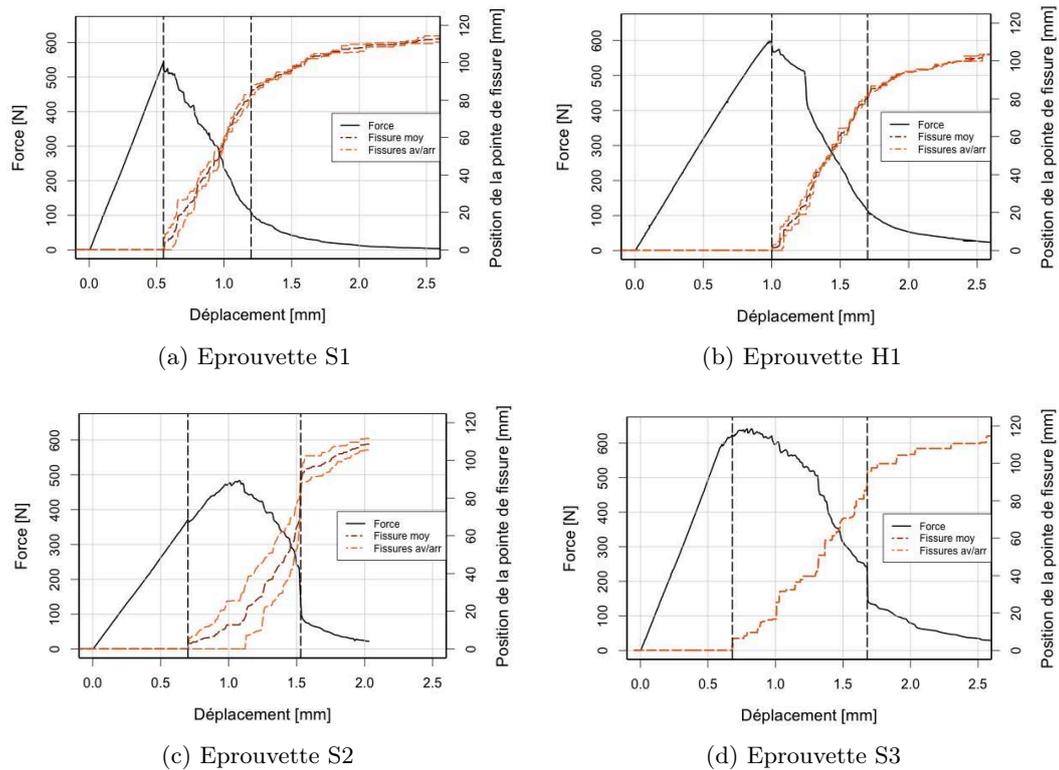
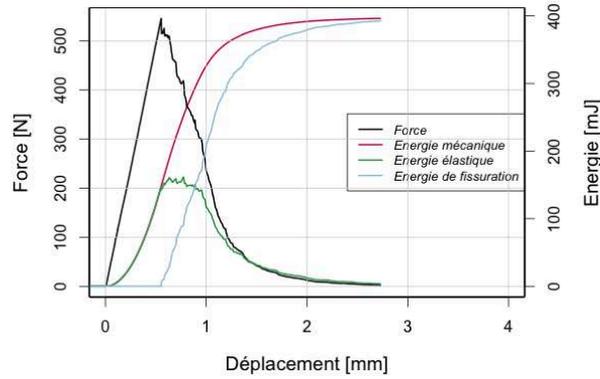


FIGURE 3.11: Courbes Force déplacement et propagation de fissure par imagerie pour les éprouvettes S1, H1, S2 et S3

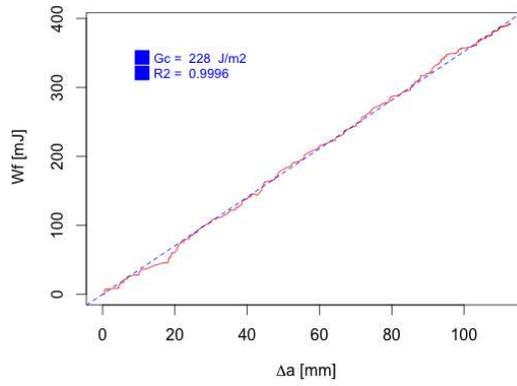
Une superposition des courbes de fissures avec la courbe force-déplacement, en figure 3.11, permet de constater que l'apparition des fissures coïncide avec la fin du comportement élastique de l'éprouvette.

Fissuration et taux de restitution d'énergie

La détermination de la position de la pointe de fissure permet de remonter au taux de restitution d'énergie G_c . Pour calculer ce taux, nous avons déterminé la valeur des énergies mécanique, élastique et de fissuration et considéré que toute l'énergie dissipée était employée dans la fissuration. Un exemple de courbes et des résultats obtenus est donné sur la figure 3.12.



(a) Courbe mécaniques



(b) Taux de restitution d'énergie

FIGURE 3.12: Données énergétiques pour S1

Pour les 17 éprouvettes testées, les valeurs moyennes, minimale, maximale et écart-type sont fournies dans les tableaux 3.8 et 3.9.

Grandeur	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
$G_c [J/m^2]$	324	228	443	67,3

Tableau 3.8: Dispersion statistique du taux de restitution d'énergie pour les éprouvettes sèches

Grandeur	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
$G_c [J/m^2]$	348	312	375	29,3

Tableau 3.9: Dispersion statistique du taux de restitution d'énergie pour les éprouvettes humides

3.3 Activité acoustique

Grâce aux logiciels NoesisTM et AewinTM, il est possible, pour chaque essai et pour chaque capteur, de réaliser une analyse des formes d'ondes enregistrées. Plusieurs paramètres propres à la forme d'onde sont extraits. L'ensemble de ces paramètres est décrit en annexe (paragraphe C). Un premier niveau d'analyse consiste à regarder l'évolution temporelle de certains de ces paramètres au cours de l'essai.

Au niveau de chaque capteur, on peut noter l'évolution de l'activité acoustique, à l'aide des ondes enregistrées. Cette activité peut être caractérisée :

- . Par des salves. Chaque enregistrement compte alors pour 1.
- . Par des événements. Dans le cas d'une localisation à l'aide de deux capteurs, deux salves sont nécessaires pour constituer un événement. C'est la salve détectée en premier qui est utilisée pour déterminer les grandeurs caractéristiques de l'événement acoustique.

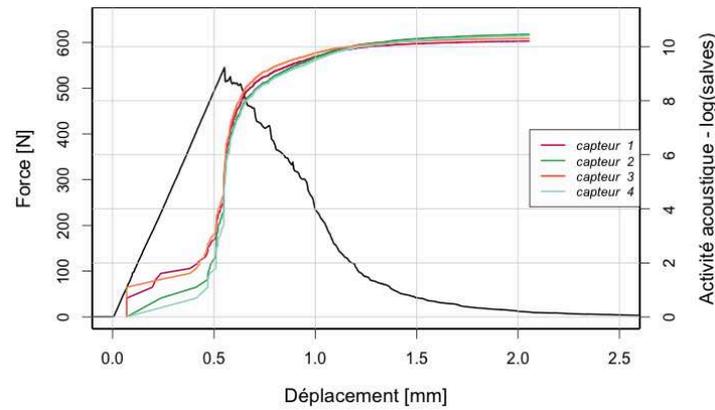
Lien avec la mécanique

Sur les figures 3.13 (a et b) sont représentées les activités (salves cumulées en échelle logarithmique) pour chacun des capteurs (de 1 à 4) pour une éprouvette sèche et une éprouvette humide. Nous nous contenterons des représentations graphiques de ces deux éprouvettes car, à elles seules, elles illustrent tous les cas de figure qui ont pu être rencontrés lors des essais.

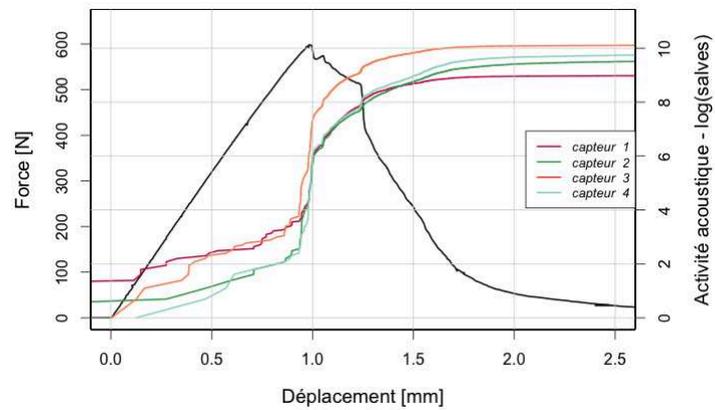
Pour chaque demi-éprouvette (couples de capteurs 1-2 et 3-4), nous constatons qu'il y a toujours une différence (plus ou moins marquée) sur le nombre de salves enregistrées. Cette différence peut s'expliquer par le fait que les ondes acoustiques enregistrées par les capteurs 1-2 et 3-4 n'ont pas traversé exactement le même milieu (apparente symétrie du montage - figure 3.6b). Une partie de l'information (salves de faible énergie) a été perdue et cela se traduit par un nombre inférieur de salves enregistrées.

Au début de l'essai, le premier capteur enregistre toujours plus de salves que le deuxième alors qu'à la fin de l'essai, la tendance s'inverse. La fissure commençant au droit des premiers capteurs (1 et 3), certaines salves ne sont pas détectées par les capteurs les plus éloignés (capteurs 2 et 4). Leur amplitude est trop faible et a été atténuée par le matériau. A la fin de l'essai, la fissure se propage au delà de l'abscisse des capteurs 2 et 4. Dans ce cas, le phénomène d'atténuation influe dans l'autre sens : les salves ne sont plus enregistrées par les premiers capteurs 1 et 3.

Enfin, la représentation logarithmique de l'activité acoustique nous permet de mettre en évidence qu'un début d'activité apparaît dès le début du chargement, bien avant que la force maximale de l'essai ne soit atteinte et que l'activité démarre réellement à partir du maximum de la force.



(a) Eprouvette S1



(b) Eprouvette H1

FIGURE 3.13: Activité acoustique cumulée du point de vue des salves

Lien avec l'imagerie

Superposons maintenant l'activité acoustique (échelle non logarithmique) aux données issues de l'imagerie. Sur la base de l'éprouvette S1, les graphiques suivants dans les figures 3.14 (a et b) sont obtenus.

Sur chacun des graphiques sont séparées, par des traits verticaux en pointillés, les différentes zones observées sur la courbe force-déplacement définies en figure 3.10. Nous pouvons constater que la fin de la linéarité de la propagation de la pointe de fissure correspond à la fin de linéarité de courbe d'activité acoustique. Le simple suivi de l'activité acoustique donne une indication sur la propagation de la fissure dans le matériau.

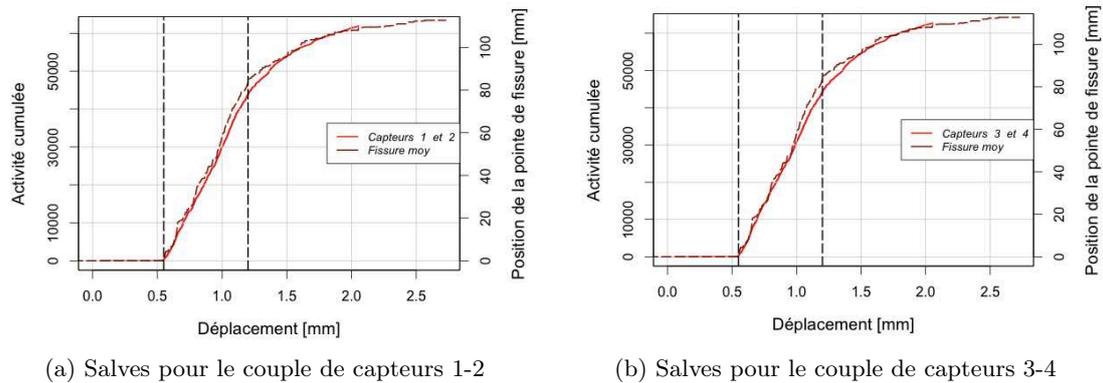


FIGURE 3.14: Evolution de l'activité acoustique (salves) et courbes de propagation de fissure pour chaque couple de capteurs au cours de l'essai de l'éprouvette S1

Etude statistique

Etudions maintenant les corrélations entre les différents éléments issus des essais mécaniques et de la cinétique de chargement à partir des données présentées aux tableaux 3.6 et 3.7. Sur la figure 3.15, les données sont regroupées en différentes catégories : une correspondant au conditionnement des éprouvettes, une autre à leurs caractéristiques géométriques et enfin une dernière représentant la cinétique de la fissuration.

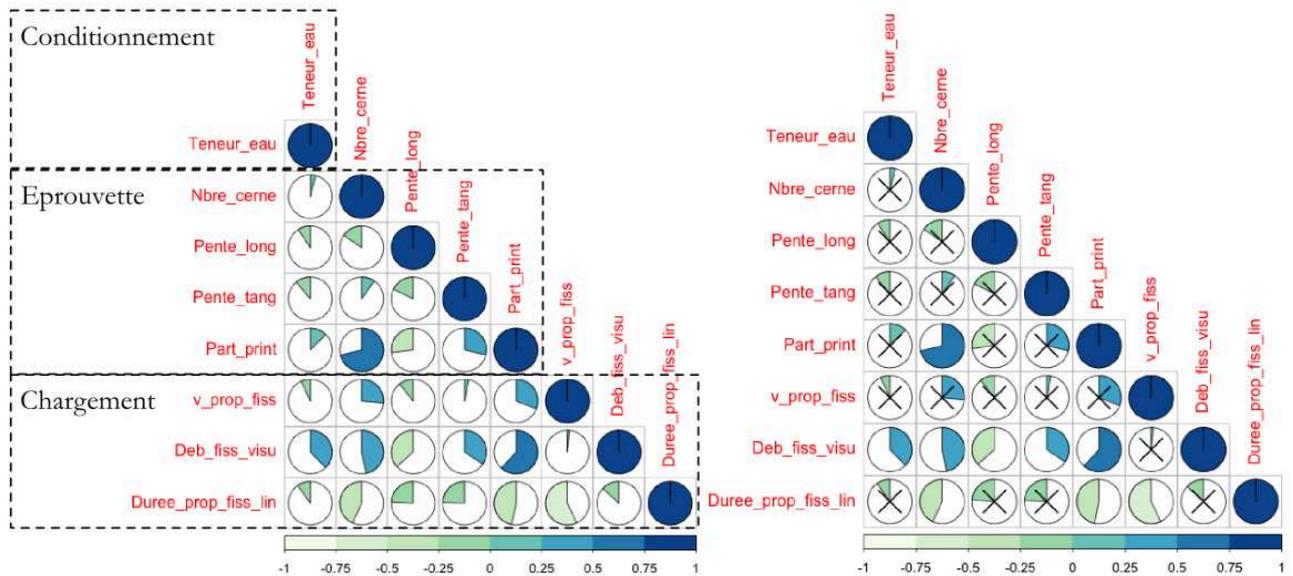


FIGURE 3.15: Corrélogramme sur les données relatives au conditionnement, à la géométrie et au chargement des éprouvettes

Nous pouvons constater plusieurs corrélations intéressantes.

- . L'apparition de la fissure visuelle est corrélée positivement avec la teneur en eau. A vitesse de chargement constante, une fissure apparaîtra d'autant plus tard que l'éprouvette a une teneur en eau élevée.
- . Cette même apparition de la fissure visuelle dépend de l'orthotropie du matériau. Il y a une corrélation positive avec le nombre de cernes présents dans chaque demi éprouvette, la pente tangentielle et la part du bois de printemps dans les cernes. Par contre, cette corrélation devient négative si l'on prend en compte l'angle du fil.
- . La durée de propagation linéaire de la fissure est corrélée négativement avec le nombre de cernes ainsi que la part de bois de printemps. La durée de propagation linéaire est d'autant plus courte que le nombre de cerne et la part de bois de printemps sont importants.

Sur la base des essais, nous ne saurions conclure quant à la corrélation entre la vitesse de propagation de la fissure et les données géométriques ou le conditionnement des éprouvettes.

	Teneur en eau		Nombre cernes		Pente longitudinale		Part printemps	
	Corr	p	Corr	p	Corr	p	Corr	p
V_prop_fiss	-0,068	0,699	0,264	0,130	-0,106	0,548	0,309	0,075
Deb_fiss_visu	0,377	0,027	0,468	0,00519	-0,366	0,033	0,618	0,0000982
Duree_prop_fiss_lin	-0,098	0,580	-0,431	0,0107	-0,240	0,170	-0,469	0,00512

Tableau 3.10: Corrélation et valeur p pour les données géométriques

Étudions maintenant les corrélations entre les différents éléments issus des essais mécaniques et acoustiques. Les résultats sont présentés de manière tabulée (tableau 3.10) ainsi que sur la figure 3.16.

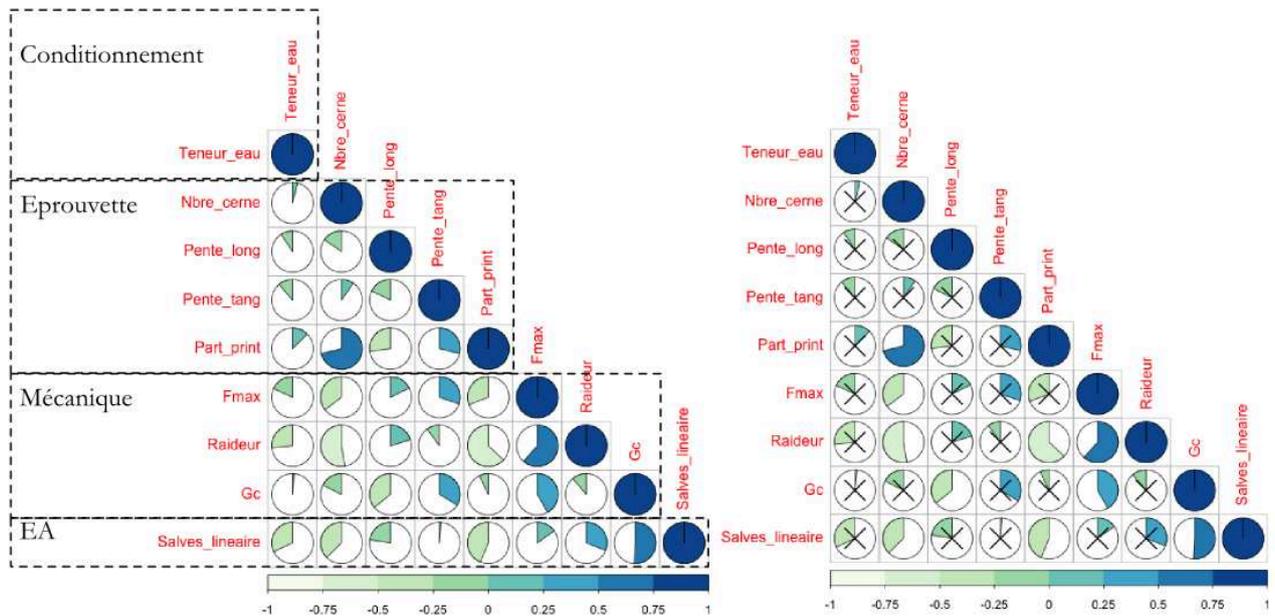


FIGURE 3.16: Corrélogramme sur les données relatives au conditionnement, à la géométrie, au chargement des éprouvettes et à l'activité acoustique

Sur la base des essais, on peut affirmer que :

- . La valeur de la force de ruine est corrélée négativement au nombre de cernes. Par contre nous ne pouvons pas conclure quant à l'influence des autres paramètres. Il existe une incertitude sur la qualité des résultats.
- . La raideur est aussi négativement corrélée au nombre de cernes présents dans l'éprouvette ainsi qu'à la part du bois de printemps.
- . Il n'y a pas de corrélation entre la teneur en eau du matériau et le taux de restitution d'énergie G_c qui semble plus sensible à la pente des fibres.
- . Le nombre de salves enregistrées est corrélé négativement au nombre de cernes ainsi qu'à la part de bois de printemps présent dans les éprouvettes. Les ondes élastiques sont sensibles au phénomène de diffraction. Une onde élastique sera donc moins facile à détecter si elle a traversé un grand nombre de cernes.
- . Le nombre de salves est négativement corrélé au taux d'humidité mais le résultat n'est pas significatif.
- . En ce qui concerne le nombre d'évènements, seule l'humidité semble avoir une influence.

Malgré l'apparence significativité des résultats, il faut faire attention au fait, qu'avec l'humidité, le système d'EA enregistre moins facilement les salves acoustiques. De plus, les trois dernières constatations mettent en évidence les phénomènes de diffraction (ou

d'absorption) des signaux acoustiques. Plus le nombre de cernes traversés est important, plus il y aura d'interfaces à traverser et plus le signal acoustique subira de diffraction. A titre d'information, certains résultats sont fournis au tableau 3.11.

	Teneur en eau		Nombre cernes		Pente longitudinale		Part printemps	
	Corr	p	Corr	p	Corr	p	Corr	p
F max	-0,182	0,302	-0,354	0,0397	0,177	0,315	-0,309	0,0752
Raideur	-0,267	0,127	-0,527	0,00134	0,203	0,249	-0,630	0,000065
Gc	0,015	0,933	-0,176	0,381	-0,358	0,037	-0,070	0,691
Salves	-0,320	0,064	-0,374	0,0293	-0,225	0,200	-0,438	0,00942

Tableau 3.11: Correlation et valeur p pour les données mécaniques et acoustiques

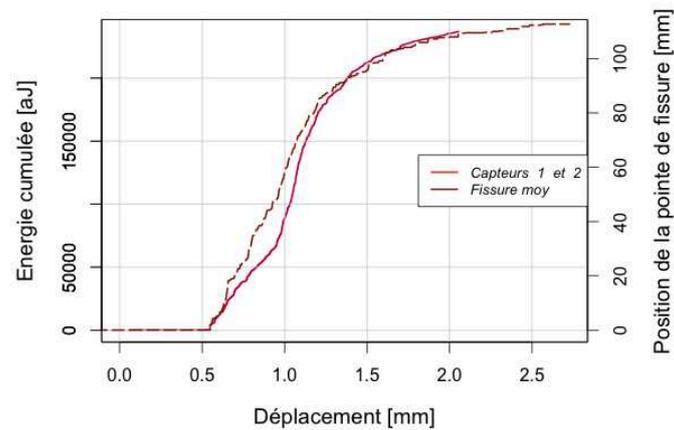
3.4 Etude énergétique

Représentation de l'évolution de l'énergie

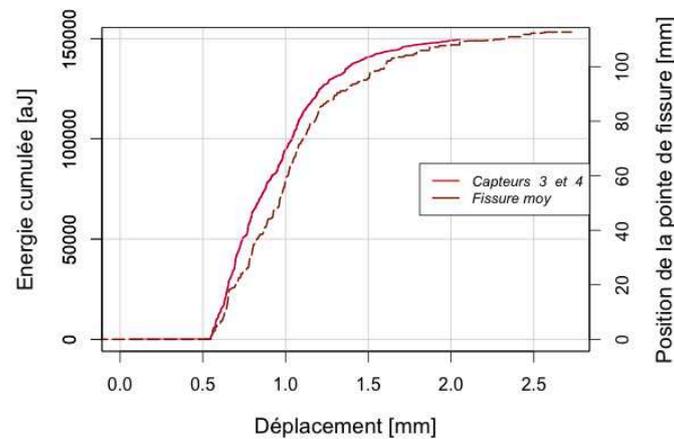
Les signaux enregistrés par les capteurs sont porteurs d'une *certaine* énergie. L'analyse des signaux réalisée par AewinTM ou NoesisTM permet d'obtenir l'énergie d'un signal (énergie absolue), valeur qui à la dimension d'une énergie et qui tient compte de l'impédance du système d'acquisition. La grandeur obtenue est donnée en [aJ].

De la même façon que précédemment, il est possible de représenter l'évolution de l'énergie acoustique disponible au niveau des couples de capteurs en considérant les salves. Les résultats sont disponibles sur la figure 3.17.

A la lecture des graphiques, nous pouvons voir que l'énergie acoustique et la courbe de propagation de fissure suivent la même évolution. Ceci dit, lorsque l'on prête attention aux échelles choisies en ordonnée, nous constatons qu'elles ne sont pas les mêmes d'un graphique à l'autre.



(a) Energie pour le couple de capteurs 1-2



(b) Energie pour le couple de capteurs 3-4

FIGURE 3.17: Évolution de l'énergie acoustique (salves) et courbes propagation de fissure pour chaque couple de capteurs au cours de l'essai de l'éprouvette S1

Corrélation entre énergie acoustique et énergie mécanique

L'énergie acoustique enregistrée par les capteurs est directement liée à la propagation de fissure. Même si cette énergie est très faible, en comparaison de l'énergie de fissuration mise en jeu (il y a un rapport de 10^{-17}), il existe une bonne corrélation entre elles (figure 3.18).

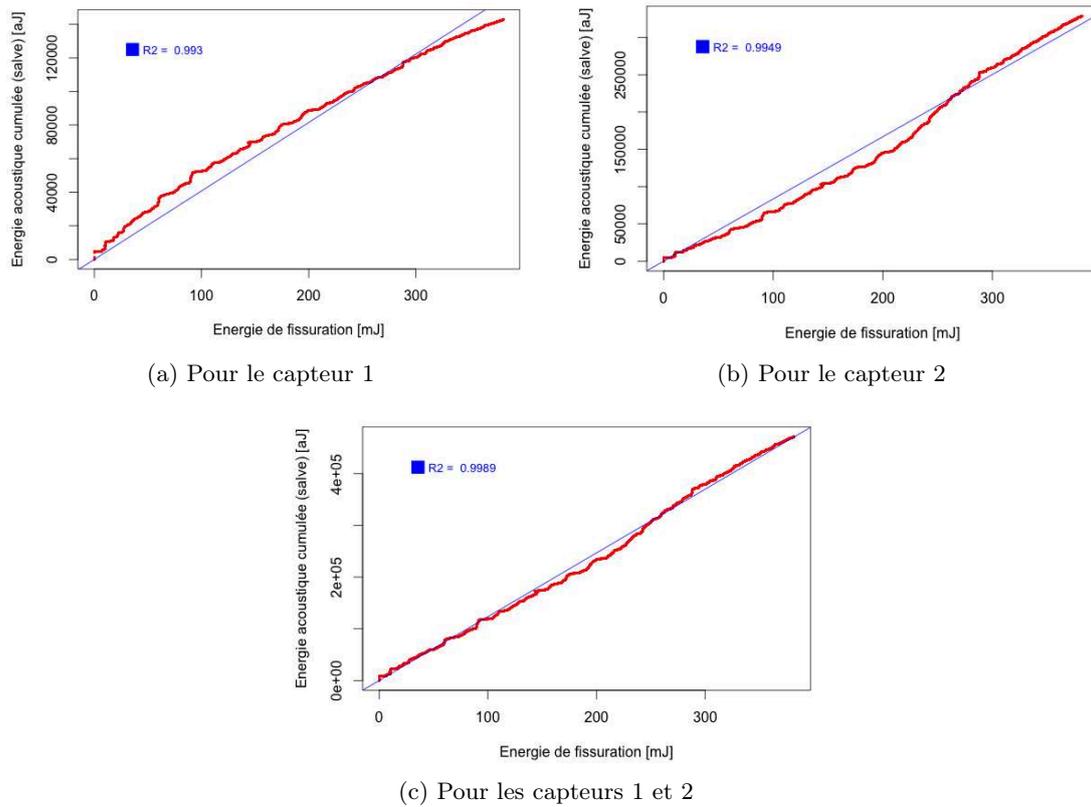


FIGURE 3.18: Corrélation entre l'énergie acoustique et l'énergie de fissuration pour S1 sur la base des salves.

A la lecture de ces graphiques, nous nous apercevons que le coefficient de corrélation entre l'énergie acoustique et l'énergie mécanique de fissuration est très proche de 1. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque l'on utilise un cumul des énergies enregistrées par les capteurs 1 et 2.

Autres corrélations

A ce stade de l'étude il serait possible d'envisager d'autres corrélations. Par le passé, d'autres tentatives ont été réalisées ([Radon and Pollock, 1972](#)) et ([Pollock, 1973](#)). Pour éviter un trop grand nombre d'étude de graphiques, nous pouvons représenter toutes les variables sur un cercle de corrélation ou un dendrogramme (figure 3.19).

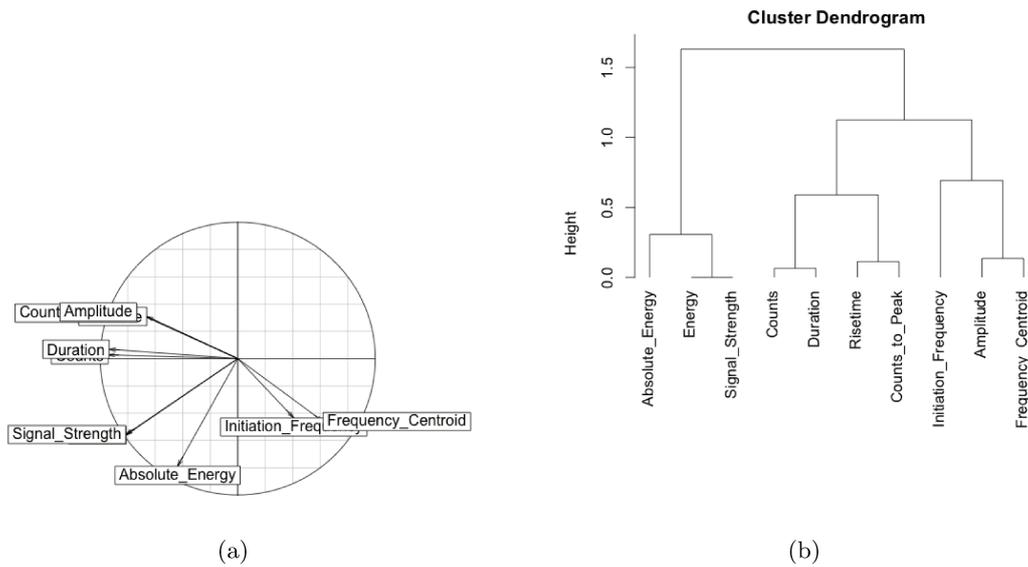


FIGURE 3.19: Cercle de corrélation et dendrogramme réalisés sur les salves

En regardant les dendrogramme ou le cercle de corrélation, nous pouvons nous rendre compte de la corrélation qui existe entre les variables Energy et SignalStrength. Cela nous permet d'en déduire que d'autres paramètres seront moins bien corrélés à l'énergie de fissuration.

A l'aide de l'énergie acoustique, nous avons pu voir que la corrélation avec l'énergie mécanique de fissuration était proche de 1. Cette étude a été réalisée sur la base des salves, sans chercher à effectuer le moindre nettoyage des données. Maintenant, nous allons faire intervenir une dimension supplémentaire dans le traitement des données : la localisation. Une filtration va être nécessaire et nous allons devoir travailler avec les évènements.

4 Analyse spatiale des données acoustiques

4.1 Activité acoustique du point de vue des évènements

Lors des essais, nous venons de voir que chaque capteur acoustique enregistrerait des salves. Pour effectuer une localisation et obtenir un évènement, deux salves sont associées. Ce premier travail d'association constitue une filtration des données : sur deux salves associées, nous ne retiendrons que la première enregistrée, les salves non associées seront ignorées.

Activité acoustique

Si l'on envisage l'activité du point de vue des évènements, nous obtenons les courbes suivantes (figure 3.20). Ces graphiques sont analogues à ceux présentés à la figure 3.13.

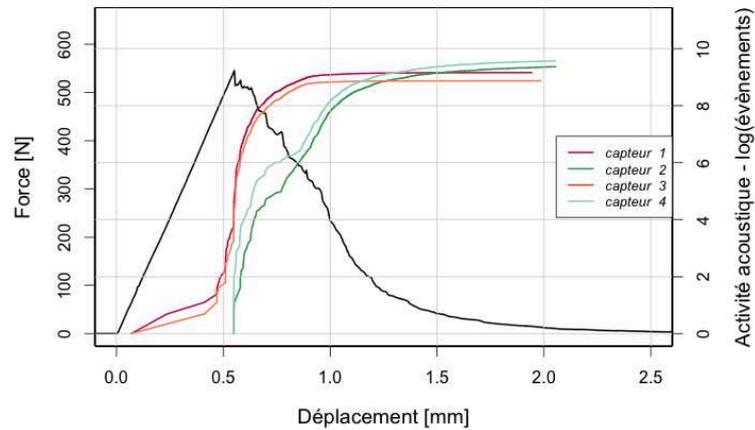
Comme nous l'avions vu sur les graphiques de la figure 3.13, une activité acoustique est présente, bien avant que l'on ait atteint le maximum du chargement de l'éprouvette.

Pour l'éprouvette sèche (figure 3.20a), les capteurs 1 et 3 enregistrent des évènements avant les capteurs 2 et 4. Les salves retenues pour créer des évènements arrivent sur les premiers capteurs au début de l'essai. Vers la fin de l'essai, c'est le contraire : les premières salves arrivent d'abord sur les capteurs 2 et 4 avant d'atteindre les capteurs 1 et 3.

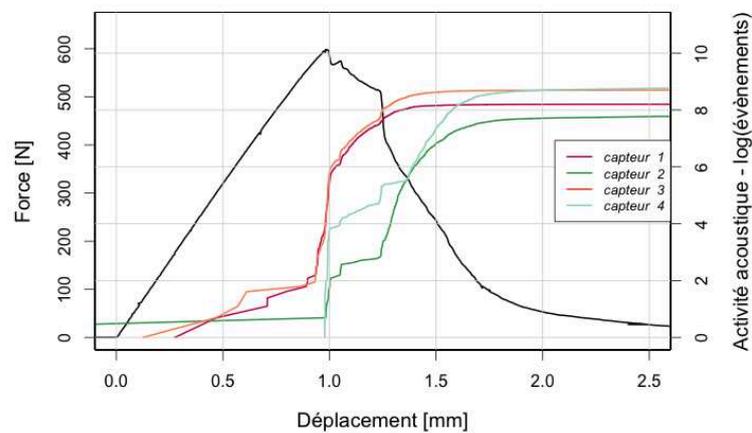
Les évènements sur les capteurs 2 et 4 apparaissent en grand nombre lorsque l'activité acoustique des autres capteurs stagne. Cela signifie que les sources d'EA sont maintenant plus proches des deuxièmes capteurs. Le fait qu'il y ait plus d'évènements enregistrés sur les derniers capteurs signifie qu'il y a eu plus d'activité acoustique à proximité de ceux-ci.

Les derniers écarts constatés entre les capteurs 1 et 3 et les capteurs 2 et 4 sont plus nets. Cela est probablement dû au fait que la partie supérieure et la partie inférieure de l'éprouvette ne sont pas rigoureusement identiques.

Pour l'éprouvette humide, le nombre d'évènements récupérés est nettement inférieur. Ici (figure 3.20b), nous avons une différence de comportement avec le couple de capteurs 1-2, le capteur 2 semblant avoir plus de mal à associer, à la fin de l'essai, des salves avec le capteur 1. Ce phénomène ne se retrouve pas au niveau de l'autre couple de capteurs.



(a) Eprouvette S1



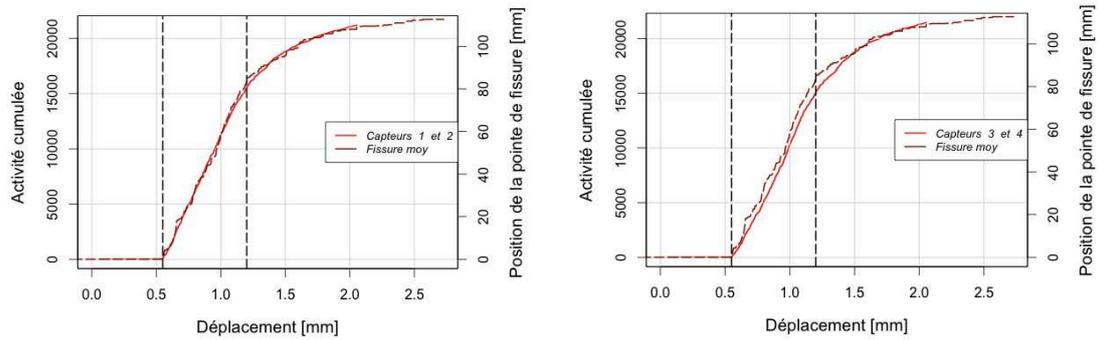
(b) Eprouvette H1

FIGURE 3.20: Évolution de l'activité acoustique du point de vue des évènements

La localisation étant déportée, les courbes de correction de localisation (décrites au chapitre 2 paragraphe 4.3) sont appliquées pour retrouver la position réelle sur le plan de fissure. De la même façon, nous appliquons les courbes de correction d'amplitude pour *estimer* l'amplitude à la source du signal.

Lien avec l'imagerie

Regardons maintenant l'activité acoustique (échelle non logarithmique, sur la base des évènements) et superposons la aux données issues de l'imagerie. Sur la base de l'éprouvette S1, nous obtenons les graphiques suivants (figure 3.21).



(a) Evènements pour le couple de capteurs 1-2

(b) Evènements pour le couple de capteurs 3-4

FIGURE 3.21: Evolution de l'activité acoustique (évènements) et courbes propagation de fissure pour chaque couple de capteurs au cours de l'essai de l'éprouvette S1

Si, cette fois-ci, nous considérons l'activité (évènements) sur les couples de capteurs sur les figures 3.21, nous arrivons à des constatations analogues à celles que nous avons faites pour les courbes de la figure 3.14.

Sur chacun des graphiques sont séparées, par des traits verticaux en pointillés, les différentes zones observées sur la courbe force déplacement. On peut constater que la fin de la linéarité de la propagation de la pointe de fissure correspond à la fin de linéarité de courbe d'activité acoustique (pour les évènements). Le simple suivi de l'activité acoustique (pour les évènements) peut nous donner une indication sur la propagation de la fissure dans le matériau.

4.2 Correction de la position et de l'amplitude

On peut donc rajouter une autre dimension aux résultats précédemment présentés : la localisation des évènements. Cette nouvelle dimension est représentée sur la figure 3.22. Sur les graphiques sont représentés pour chaque couple de capteurs d'une même éprouvette : en trait continu la courbe force-déplacement et tous les évènements acoustiques localisés (localisation corrigée) en fonction du déplacement.

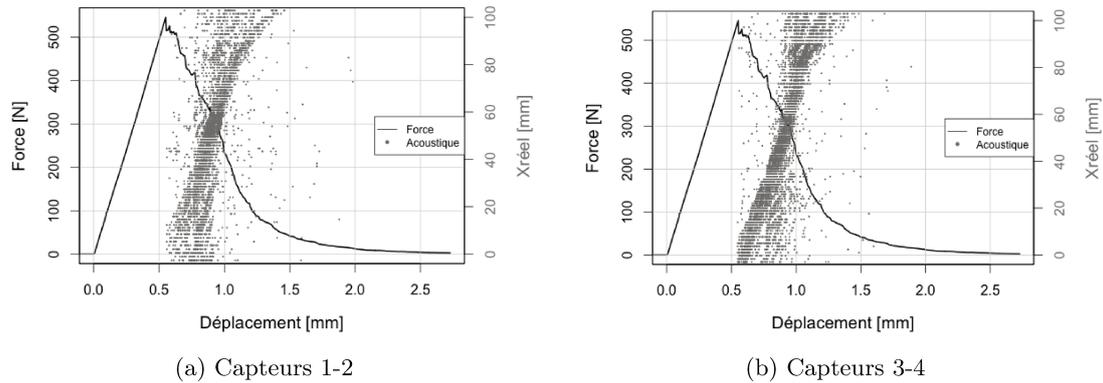


FIGURE 3.22: Courbes force-déplacement et activité acoustique localisée pour l'éprouvette S1

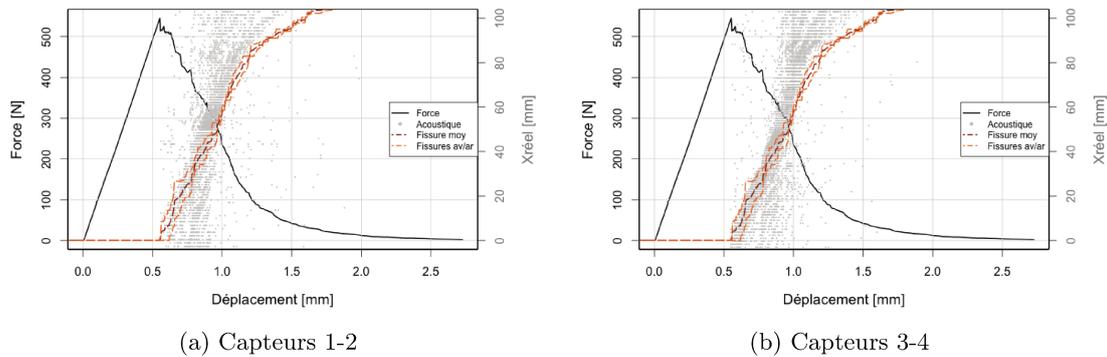


FIGURE 3.23: Courbes force-déplacement, évènements acoustiques et pointes de fissure visible pour l'éprouvette S1

Plusieurs remarques sont possibles à la lecture des graphiques de la figure 3.23 :

- . Nous avons limité l'affichage des évènements localisés entre 0 et 100 [mm]. De cette façon nous sommes certains qu'ils sont situés entre les capteurs.
- . Tous les évènements situés à une côte inférieure à 0 [mm] ou supérieure à 100 [mm] n'ont donc pas été retenus.
- . Il y a une apparente similitude entre la localisation des évènements réalisée avec les capteurs 1-2 et les capteurs 3-4.
- . Une 'bande' d'évènements acoustiques semble accompagner la pointe de fissure visible entre les côtes 0 et 70 [mm].
- . Qu'au delà de cette côte, la bande d'évènements acoustiques semble avoir une légère avance.

Rajoutons maintenant la dimension liée à l'amplitude (corrigée). Sur la base de différents niveaux d'amplitude choisis arbitrairement, nous obtenons les graphiques présentés en figure 3.24. Comme nous pouvons le constater, les événements de forte amplitude sont localisés, après correction, au voisinage des courbes de fissure visible. Dans le cas de l'éprouvette S2, en figure 3.24c, les événements de forte amplitude sont enveloppés par les fissures face avant et face arrière.

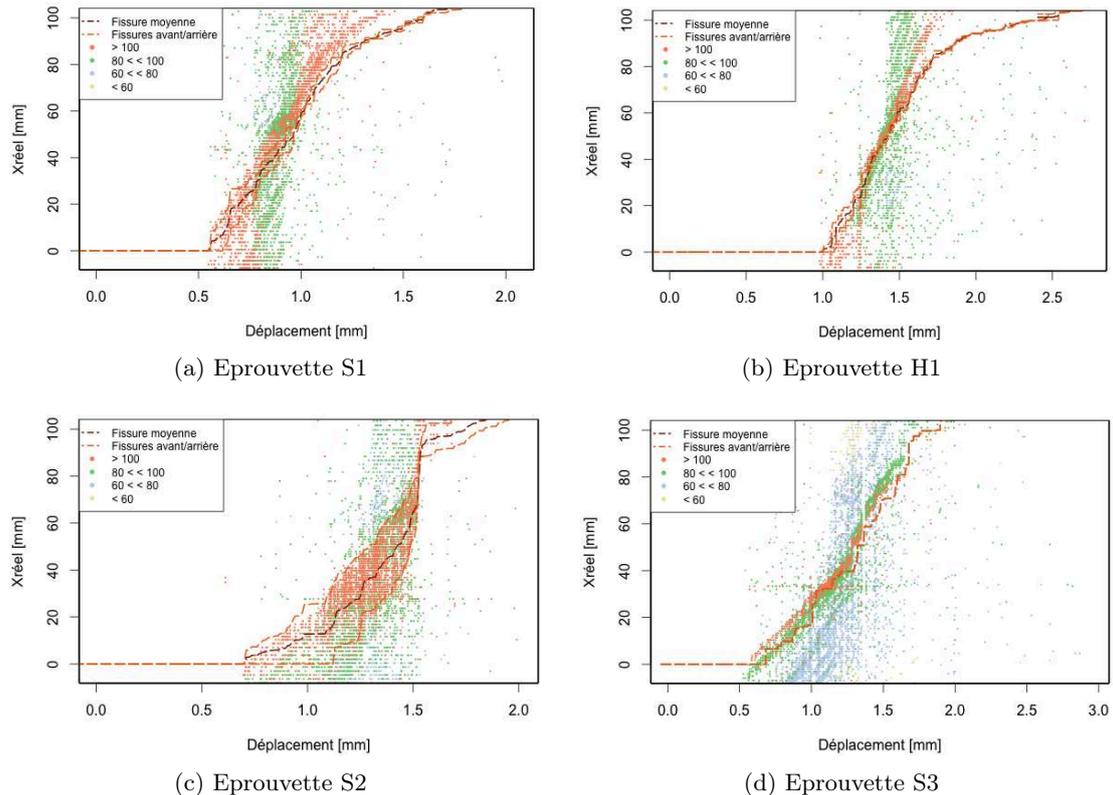


FIGURE 3.24: Courbes d'évènements acoustiques (en fonction de l'amplitude) et de pointes de fissure visible pour les éprouvettes S1, H1, S2 et H2.

4.3 Outils acoustiques de détection de la pointe de fissure

Comme on vient de le voir, l'EA permet de localiser des événements acoustiques. A condition de prendre en compte les courbes de correction de localisation, on a pu constater qu'un grand nombre d'évènements étaient localisés au voisinage des courbes de fissure visible et qu'ils étaient en général de forte amplitude.

On note toutefois une dispersion dans la localisation acoustique pour un déplacement donné (ou une longueur de fissure donnée). Il n'y a pas d'intervalle de temps constant entre chaque évènement enregistré. Il est difficile de corrélérer individuellement la position de chaque évènement avec une valeur de fissure donnée. Il est donc nécessaire d'effectuer

une discrétisation temporelle des données acoustiques sur la base du temps de l'essai. Ainsi, pour chaque Δt , nous avons une somme d'évènements d'amplitude et de position différentes.

Pour un Δt donné, deux besoins apparaissent :

- . Identifier un évènement moyen représentatif de la source de l'activité acoustique principale. Cet évènement moyen peut être obtenu en effectuant une moyenne de la position des évènements ou en pondérant la position de chaque évènement avec son amplitude.
- . Déterminer un profil spatial des évènements dans cet intervalle de temps. Ainsi pour un Δt donné, on divise le profil de fissuration par un pas Δx et chaque Δx sera représenté par un paramètre acoustique. Cela pourra être le nombre d'évènements, le cumul d'amplitude, d'énergie, etc.. Au total, plus de 17 paramètres peuvent être utilisés (voir annexe page 202). Nous avons fait le choix de l'amplitude car il s'agit du seul paramètre corrigé à l'aide des courbes d'étalonnage.

Comme nous souhaitons utiliser ces caractéristiques pour déterminer, *acoustiquement*, la position de la pointe de fissure, plusieurs techniques sont proposées.

Discrétisation temporelle : moyenne des positions et moyenne des positions pondérées de l'amplitude

Cela nous impose d'opérer une discrétisation temporelle Δt . Une moyenne des localisations des évènements présents pendant cet intervalle est effectuée, figure 3.25.

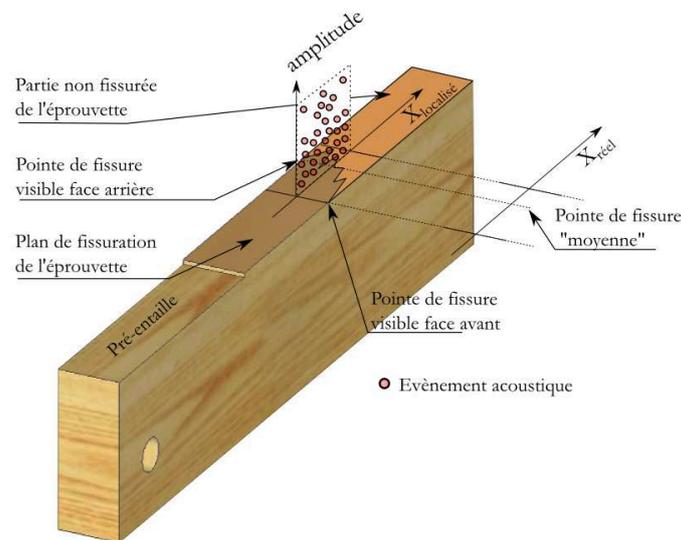


FIGURE 3.25: Répartition des évènements le long d'une pointe de fissure pendant un intervalle de temps Δt

Grâce à cette méthode, il est possible de déterminer une valeur moyenne de la position des évènements. Cette position est tributaire de l'intervalle de temps choisi : une erreur temporelle ou de déplacement est présente.

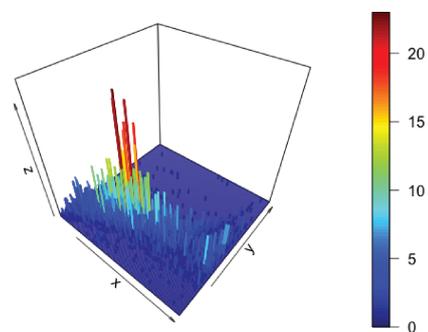
Avec cette façon de procéder, chaque évènement est pris en compte, et ce, indépendamment de son amplitude. Or, nous venons de voir que les évènements de forte amplitude *accompagnaient* la pointe de fissure visible. Cette méthode peut donc être améliorée en pondérant la position de chacun des évènements par son amplitude corrigée. De plus, nous ne retiendrons que les évènements d'amplitude supérieure à 90 [dB_{AE}] pour effectuer notre détection de pointe de fissure par EA.

Discrétisation temporelle et spatiale

Une autre méthode de localisation consiste à opérer, en plus de la discrétisation temporelle (en déplacement), une discrétisation spatiale (selon $X_{réel}$). De cette façon, en fixant intelligemment un nombre d'intervalles, on va pouvoir comptabiliser, pour chaque pas de temps, le nombre d'évènements présents pour un intervalle de $X_{réel}$. De cette façon, on obtient un tableau dans lequel sont comptabilisés les évènements. Une représentation en perspective permet d'avoir un aperçu, figure 3.26. Dans cette dernière vue, l'axe 'y' représente le déplacement, l'axe 'x' celui de la localisation ($X_{réel}$) et l'axe 'z' le nombre d'évènements comptabilisés.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13
1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	2	3
2	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	3	2	1
3	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
4	1	0	0	1	1	0	0	2	0	3	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	1	1	1	0	1	1	4	1	2	0
7	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0
8	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	2	3
9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	2	3
10	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	1	2
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3
13	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) Vue partielle



(b) Représentation en perspective

FIGURE 3.26: Exemple d'un enregistrement des évènements dans un tableau

Pour un intervalle de temps (ou de déplacement) donné et en réalisant une somme cumulée des évènements acoustiques, nous pouvons déterminer, en considérant le fractile à 50%, une position moyenne de la pointe de fissure (figure 3.27).

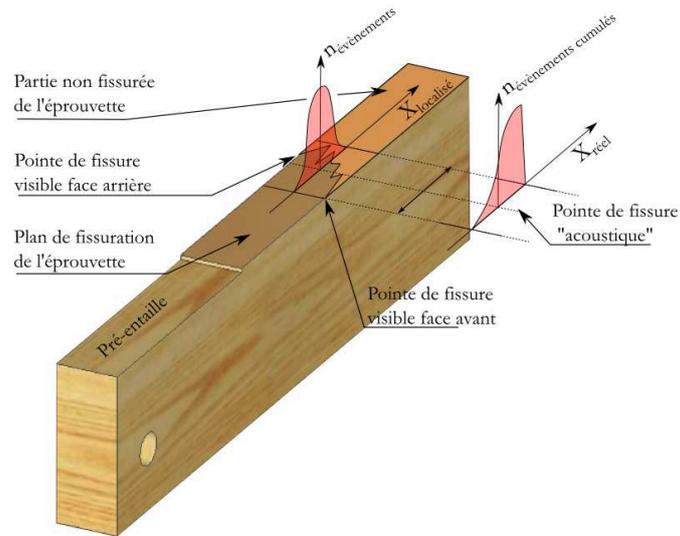


FIGURE 3.27: Répartition des évènements le long d'une pointe de fissure pendant un intervalle de temps Δt et un intervalle spatial Δx

A titre d'exemple, pour l'éprouvette S1, voici la répartition des données que l'on peut obtenir (figure 3.28) pour un intervalle de temps donné et pour un intervalle spatial donné. Dans le cas présent, les intervalles sont les suivants : $\Delta t = 1,78[s]$ et $\Delta x = 0,86[mm]$.

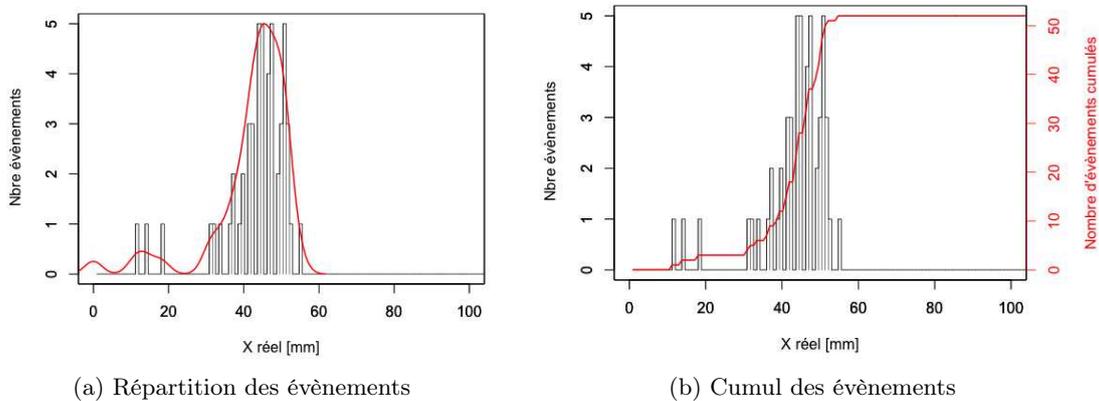


FIGURE 3.28: Répartition des évènements à un instant donné pendant un intervalle de temps Δt pour l'éprouvette S1 (capteurs 1-2)

Quelques remarques sont à formuler dans cette façon de procéder :

- . Elle ne peut fonctionner correctement que si l'on a un nombre suffisant d'évènements disponibles pendant un intervalle de temps Δt .
- . Plus la discrétisation est fine (pas temporel et/ou spatial petits), plus on peut

- espérer avoir un résultat précis, mais plus on risque de se retrouver dans un cas où le nombre d'évènements disponibles est faible (voire nul).
- . Plus la discrétion est large (pas temporel et/ou spatial grands), plus nous aurons d'évènements à prendre en compte pour déterminer une pointe de fissure. Par contre, le passage d'un intervalle de temps à un autre risque d'engendrer des sauts dans l'évolution de la pointe de fissure acoustique.
 - . Tous les évènements comptabilisés dans un même intervalle temporel se voient automatiquement attribuer le même instant (ici : la valeur moyenne de cet intervalle). Une erreur temporelle (et donc de déplacement) est donc systématiquement réalisée.
 - . Tous les évènements comptabilisés dans un même intervalle spatial se voient attribuer la même position (ici : la valeur moyenne de cet intervalle). Une erreur de localisation est donc systématiquement réalisée. Afin d'obtenir une pointe de fissure par EA qui tienne compte de l'incertitude sur la localisation, il est souhaitable de choisir une définition de Δx en fonction de Δt et de la vitesse de propagation de fissure.

$$\Delta x \leq v_{fissure} \cdot \Delta t$$

- Dans notre cas de figure, la vitesse de propagation de fissure est de 1 [mm/s]. Il nous faut une incrément spatial $\Delta x \leq 1,78$ [mm].
- . Les évènements de forte amplitude sont localisés au voisinage des pointes de fissure visible, ils sont regroupés dans des intervalles spatiaux voisins.
 - . Dans le cas présent, tous les évènements retenus dans la localisation ont le même poids. Il est possible d'améliorer la méthode en utilisant un autre paramètre : les amplitudes corrigées.
 - . Des évènements de faible amplitude peuvent être localisés très en dehors de la zone de la pointe de fissure visible. Cette méthode de localisation est donc sensible au « bruit » ou aux signaux mal enregistrés.

Avec la même discrétisation spatiale et temporelle que pour la figure 3.28, nous obtenons des graphiques légèrement modifiés (figure 3.29).

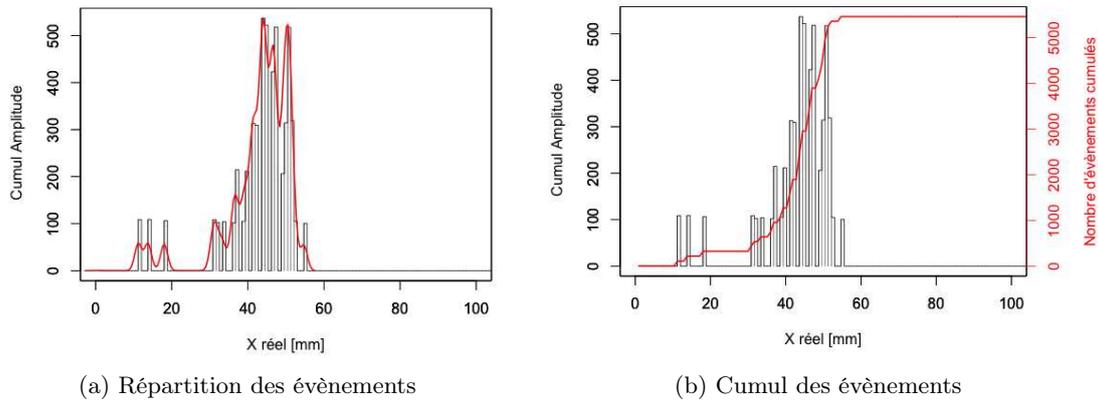


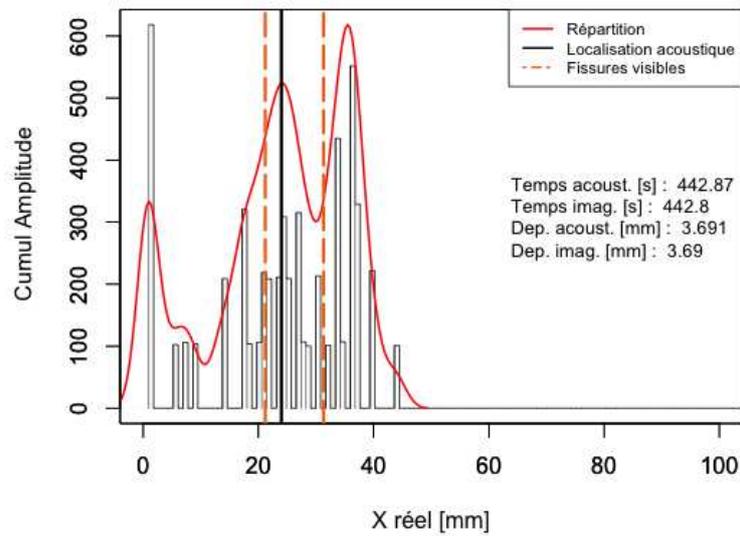
FIGURE 3.29: Répartition des événements, à un instant donné, pondérés de leur amplitude, le long d'une pointe de fissure pendant un intervalle de temps Δt

A la lecture de ces graphiques, nous pourrions être tentés de constater qu'il y a plusieurs pics d'activités : un principal et d'autres, en avance ou en retard. Il faut garder à l'esprit que nous avons là un *cliché* d'une activité acoustique prise sur un intervalle de temps donné. Les événements représentés (pondérés ou non par leur amplitude) n'ont pas forcément eu lieu en même temps. Ce type de graphique ne permet pas de savoir dans quel ordre ils sont réellement apparus. De plus, les *petits* pics présents en avance du pic principal peuvent être les suites d'une activité présente à l'intervalle de temps précédents ou l'annonce d'une activité qui ne sera visible qu'à l'instant d'après.

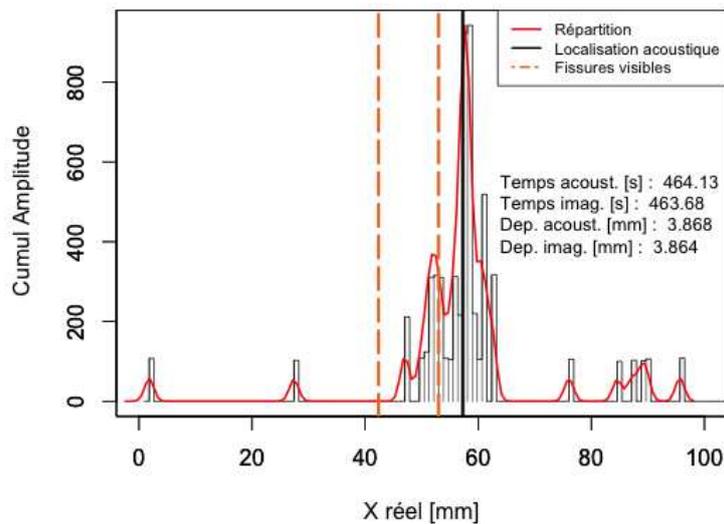
Comparaison des résultats obtenus par EA à ceux obtenus par imagerie

Disposant de quatre méthodes de détermination de la pointe de fissure par EA (moyenne sur discrétisation temporelle, moyenne pondérée par l'amplitude sur discrétisation temporelle, discrétisation temporelle et spatiale, discrétisation temporelle et spatiale pondérée par l'amplitude), regardons l'influence de chacune d'elle sur la qualité des résultats obtenus. Pour illustrer nos propos, regardons les résultats obtenus sur l'éprouvette S1.

Quelle que soit la méthode retenue, nous allons comparer les résultats issus de l'imagerie avec ceux obtenus par EA. A titre d'exemple, en utilisant la discrétisation spatiale et temporelle pondérée de l'amplitude, voici ce que l'on peut obtenir (figure 3.30). Les fissures obtenues par imagerie sont représentées par des traits verticaux en pointillés alors que la position de la pointe de fissure obtenue par EA est représentée par un trait vertical continu.



(a) Répartition des événements



(b) Répartition des événements

FIGURE 3.30: Répartition des événements pendant un intervalle de temps Δt avec pointe de fissure visuelle et acoustique pour l'éprouvette S1

Sur l'ensemble de nos éprouvettes, deux cas de figure sont apparus :

- . Comme on peut le voir sur la figure 3.30a, la position de pointe de fissure obtenue par EA est encadrée par les pointes de fissure obtenues par imagerie. Dans ce cas, on peut estimer que l'EA nous fournit une valeur *moyenne* de la position de la pointe de fissure. Attention, celle-ci n'est pas forcément située au milieu des valeurs obtenues par imagerie.
- . Dans le cas de la figure 3.30b, l'EA semble indiquer que la pointe de fissure serait

en amont de celles obtenues par imagerie.

Si l'on superpose maintenant les courbes obtenues par les quatre méthodes avec les données acoustiques et la fissure moyenne visible, nous obtenons la figure 3.31.

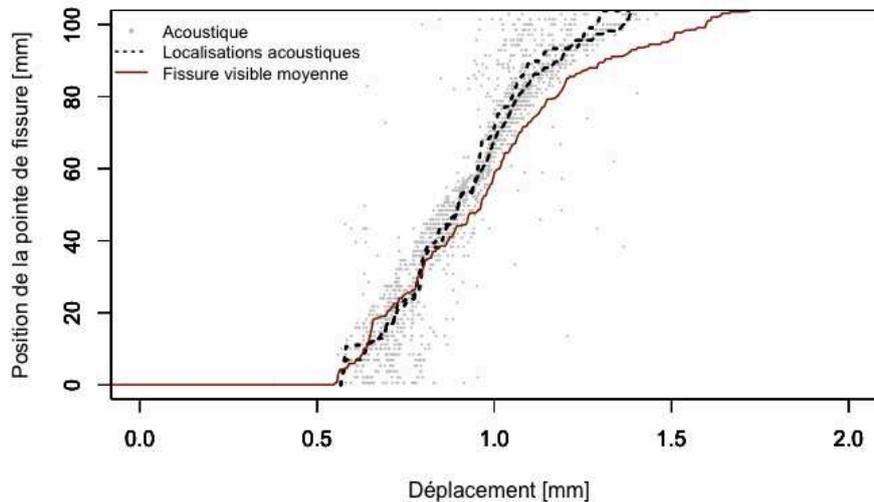


FIGURE 3.31: Superposition des courbes obtenues par différentes méthodes AE pour l'éprouvette S1

Quelle que soit la méthode utilisée, on peut constater que la pointe de fissure déterminée de manière acoustique a la même évolution que les pointes de fissure obtenues par imagerie. Sur la fin de l'essai, l'acoustique est même en avance sur l'imagerie.

Plusieurs remarques sont possibles à la lecture de ces graphiques :

- . On constate qu'il y a un écart entre l'imagerie et l'EA vers la fin de l'essai.
- . Les méthodes utilisées donnent des courbes (en pointillés) très proches les unes des autres (la représentation des quatre courbes ne semble n'en laisser apparaître que deux). Les écarts peuvent être attribués aux pondérations ainsi qu'aux discrétisations spatiales qui ont pu être effectuées.
- . Les sauts visibles sur la courbe de fissure obtenue par EA sont dus à la discrétisation temporelle.

Sur la même base de discrétisation spatiale et temporelle, regardons les résultats obtenus pour les autres éprouvettes. Afin de ne pas surcharger le document, seuls les résultats obtenus par la méthode pondérée sont utilisés et présentés dans la figure 3.32.

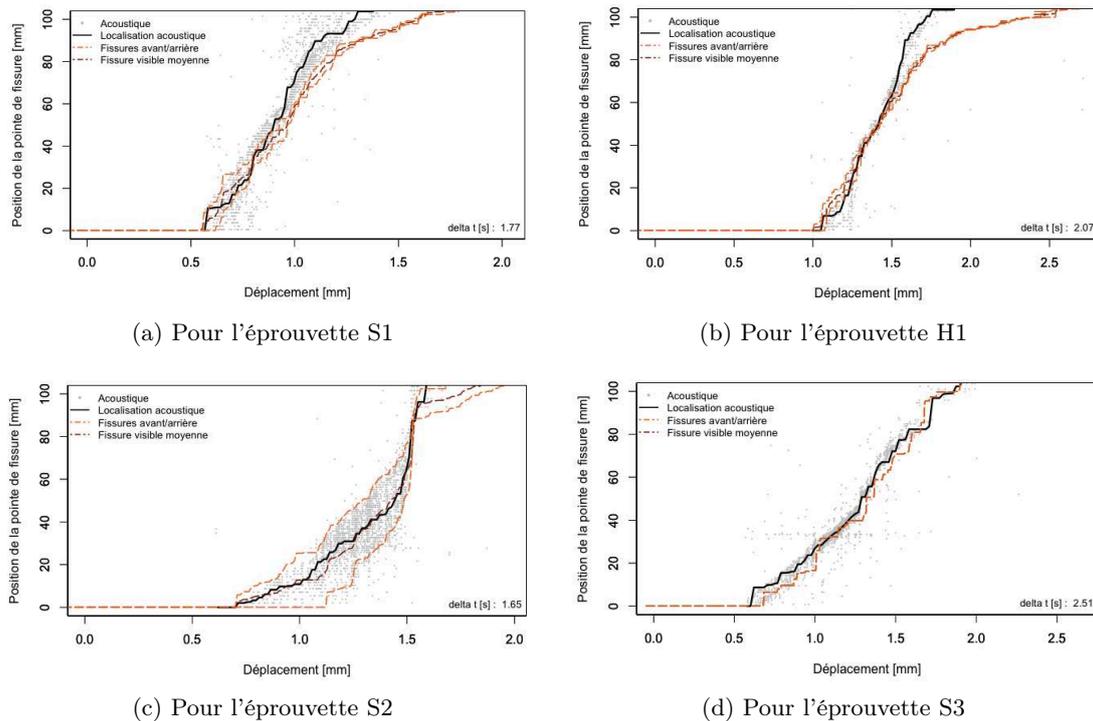


FIGURE 3.32: Utilisation de la méthode par discrétisation temporelle pondérée de l'amplitude pour les éprouvettes S1, H1, S2 et S3.

A la lecture de ces différents graphiques, on peut constater :

- pour les éprouvettes S1 (figure 3.32a) et H1 (figure 3.32b), l'EA montre des événements acoustiques localisés en amont des pointes de fissure visibles à partir de la côte de 50 [mm]. Pourtant, jusqu'à cette valeur, la concordance entre les deux méthodes est bonne.
- que pour les éprouvettes S2 (figure 3.32c) et S3 (figure 3.32d), la concordance entre les deux méthodes est bonne entre les côtes 0 et 100 [mm].

Sur l'ensemble des représentations de cette partie nous pouvons voir que des événements ont lieu en amont ou en aval des pointes de fissure visuelles. Ces événements sont la preuve de l'existence, respectivement, d'une zone d'élaboration et d'une zone de pontage - éléments que nous n'avons pas souhaité développer dans le cadre de cette thèse.

4.4 Calcul du taux de restitution d'énergie moyen G_c par EA

Comme nous l'avons vu au cours de ce chapitre, en mécanique de la rupture, un des intérêts de pouvoir déterminer l'évolution de la position de la pointe de fissure au cours du temps est de pouvoir déterminer le taux de restitution d'énergie. Comparons

les résultats obtenus sur l'éprouvette S1, par imagerie et EA pour le couple de capteurs 1-2, figure 3.33.

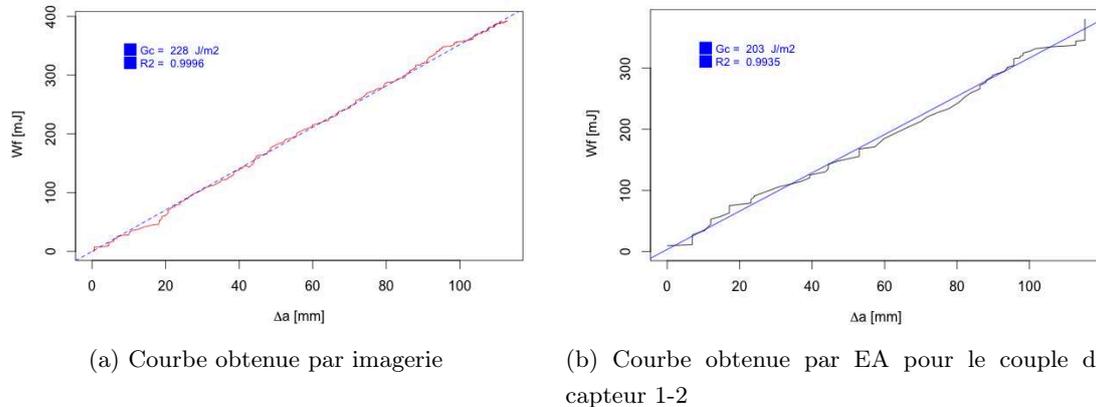


FIGURE 3.33: Détermination du taux de restitution d'énergie G_c par imagerie et par EA pour l'éprouvette S1

Nous avons obtenu, en utilisant la pointe de fissure visible moyenne un taux de restitution d'énergie de $228 [J/m^2]$. A l'aide de l'émission acoustique, selon que l'on travaille avec le couple de capteurs 1-2 ou 3-4, le résultat varie de 216 à 202 $[J/m^2]$. Les résultats obtenus sur les 4 éprouvettes témoins sont consignés dans le tableau 3.12.

Eprouvettes	S1		H1		S2		S3	
	1-2	3-4	1-2	3-4	1-2	3-4	1-2	3-4
$G_C [J/m^2]$	228		359		290		443	
$G_{CEA} [J/m^2]$	216	202	441	336	283	287	444	452

Tableau 3.12: Taux de restitution d'énergie pour diverses éprouvettes obtenues par analyse d'image et par émission acoustique

5 Détection de la pointe de fissure lors d'un essai en fluage sur une éprouvette à inertie variable

Le choix initial a été d'appliquer l'EA à une éprouvette à inertie constante. Comme nous avons pu le voir dans le premier chapitre (paragraphe 3.3) d'autres modèles d'éprouvettes sont utilisés dans le cas de la mécanique de la rupture. L'éprouvette à inertie variable permet, grâce à sa géométrie, d'avoir une stabilité de propagation de fissure lors d'un essai piloté en force. Elle est très utilisée pour mettre en évidence les aspects viscoélastiques ayant lieu dans la zone d'élaboration de la fissure durant les phases de fluage. Nous avons donc décidé d'appliquer ce que nous venons de voir à une éprouvette à inertie variable chargée (figure 1.24b), soumise à un séchage sous force constante pour évaluer la possibilité de localiser la position de la pointe de fissure. Contrairement aux essais à déplacement imposés réalisés précédemment dont la durée n'excédait pas 6 minutes, un essai de fluage peut dans certains cas durer plusieurs heures.

5.1 Conditions expérimentales

Nous avons effectué un essai de fluage sur une éprouvette en Douglas, figure 3.34.

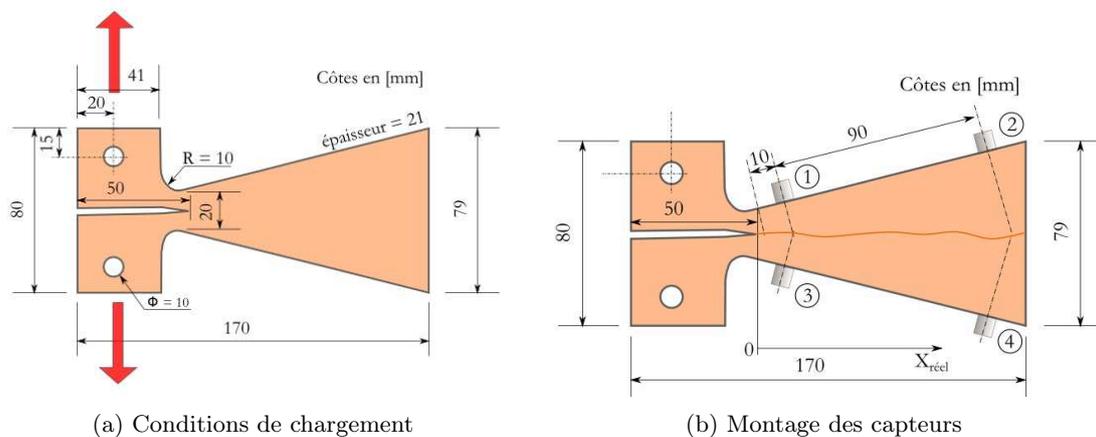


FIGURE 3.34: Mise en place des capteurs sur une éprouvette à inertie variable

L'orientation des cernes a été choisie de la même manière que pour les éprouvettes à inertie constante, figure 3.35.

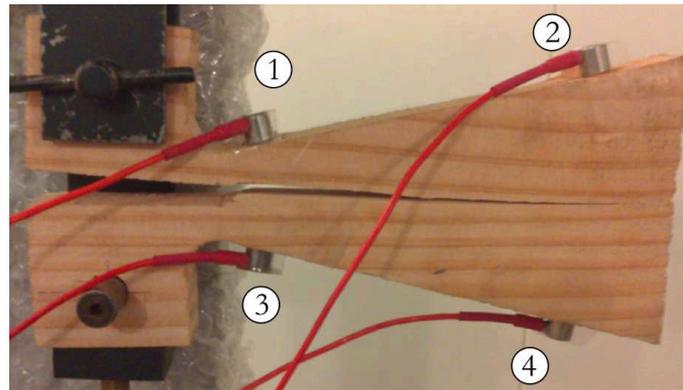


FIGURE 3.35: Cliché de l'éprouvette à inertie variable

Des essais préliminaires de chargement en déplacement ont été réalisés sur des éprouvettes à inertie variable (géométrie et conditionnement identiques à nos essais sur les DCB à inertie constante). La force maximale atteinte variait entre 235 et 300 [N] et la force à laquelle les fissures apparaissaient allait de 185 à 230 [N].

L'échantillon à inertie variable testé a été conditionné à un état humide à 25 [°C] et 90 % d'humidité relative. Ensuite, l'ambiance a été ramenée à une humidité relative de 30 % pendant que l'éprouvette était chargée à 210 [N] (chargement de fluage). L'évolution des conditions de conditionnement sont visibles sur la figure 3.36.

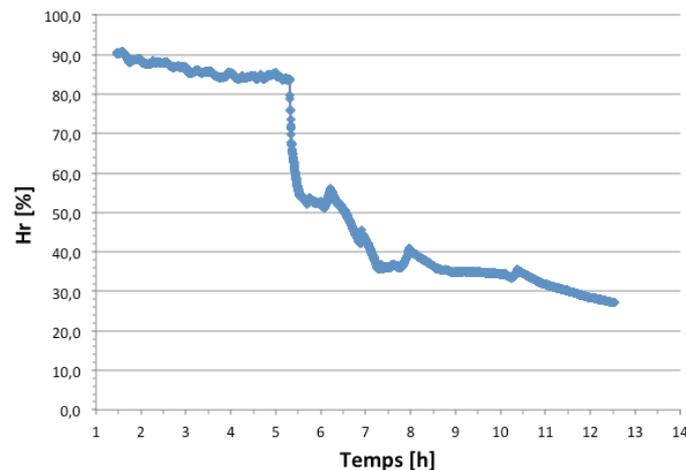


FIGURE 3.36: Conditionnement de l'éprouvette à inertie variable

Pour des raisons de conditions d'utilisation (ambiance trop humide en début d'expérience), il n'a pas été possible de disposer des caméras à l'intérieur de l'enceinte climatique. Les relevés de pointe de fissure ont donc été faits manuellement, à intervalles plus ou moins réguliers. Cela nous a permis de nous placer dans une situation analogue à celle que nous

rencontrons lors d'une surveillance d'ouvrage où les inspections visuelles sont espacées dans le temps. De fait, nous disposons de moins de données que dans le cas des éprouvettes à inertie constante où l'acquisition vidéo avaient été utilisée. La position de la pointe de fissure est représentée en couleur foncée (marqueurs ronds) sur la figure 3.37.

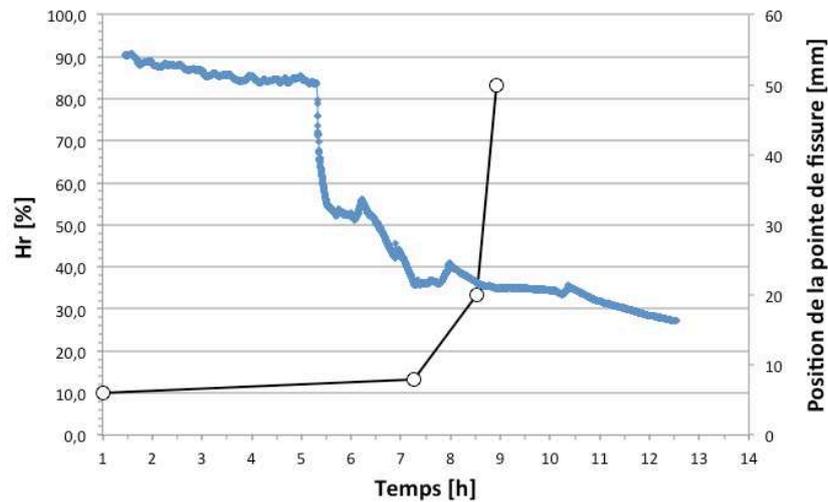


FIGURE 3.37: Superposition de la propagation de fissure et du conditionnement de l'éprouvette à inertie variable

A la lecture de ce graphique, nous pouvons constater :

- . Que la propagation de fissure a démarré lorsque la phase de séchage a commencé vers 5 [h].
- . Que la ruine de l'éprouvette est intervenue après le dernier point de mesure et que le temps à laquelle elle est intervenue nous est inconnu.

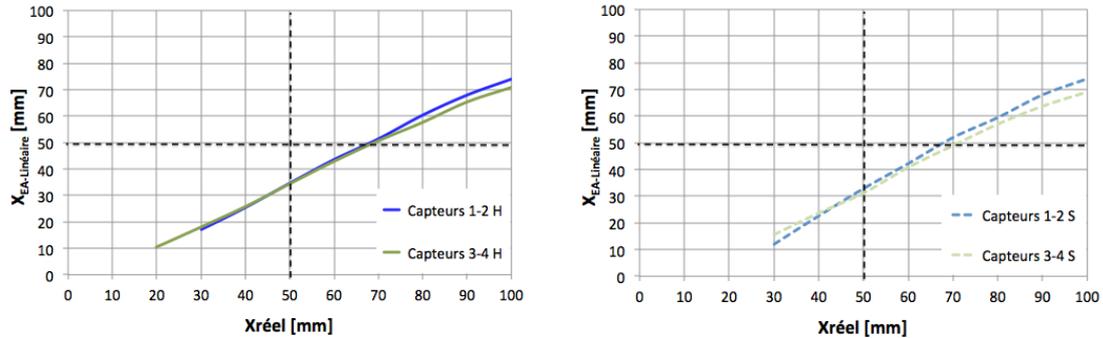
5.2 Courbes d'étalonnage

De la même manière que pour les éprouvettes à inertie constante, nous avons procédé à des courbes d'étalonnage pour la localisation ainsi que pour l'atténuation du signal. Deux mesures ont été faites :

- . Une première, dès que la ruine a été constatée. On considère alors que l'éprouvette est encore à un état humide.
- . Une deuxième, après une période de séchage qui a amené les deux demi éprouvettes à un état que l'on qualifiera de sec. Cette deuxième courbe n'est pas utilisée dans le cadre de la correction de la localisation des événements acoustiques. Elle a été réalisée pour illustrer l'influence de la teneur en eau sur la courbe d'étalonnage.

Correction de la localisation

Les courbes obtenues sont les suivantes (figure 3.38).



(a) Courbes de correction à l'état humide $\omega \simeq 20\%$

(b) Courbes de correction à l'état sec

FIGURE 3.38: Courbes de correction de localisation

Plusieurs constatations sont possibles :

- . L'allure de ces courbes de correction sont similaires à celles que nous avons rencontré dans le cas des éprouvettes à inertie constante (courbe de correction presque linéaire ou faiblement incurvée).
- . Si dans le cas des éprouvettes DCB standard, il n'y avait pas de correction à apporter pour des événements ayant lieu à mi-chemin de chaque capteur, dans le cas présent il y a toujours une correction à apporter. Cela est dû au fait que les deux capteurs ne sont pas tous situés à la même distance de l'axe de l'éprouvette : les capteurs 1 et 3 étant plus proches que les capteurs 2 et 4.
- . Des valeurs de correction sont impossibles à obtenir lorsque les événements acoustiques ont lieu au niveau des capteurs 1 et 3. Le chemin qui permet d'atteindre les capteurs 2 et 4 fait un angle relativement faible avec les fibres du bois. Dans ce cas, les signaux sont fortement perturbés et ne sont donc plus *enregistrés* par ces derniers. Le système d'acquisition sera donc sourd à une partie des événements ayant lieu lors de l'initiation de la fissure.
- . Sur la figure 3.39, on peut constater que les courbes de correction varient peu en fonction de l'humidité. Comme nous avons pu le voir au chapitre précédent, les courbes d'étalonnage dépendent essentiellement de la géométrie de l'éprouvette testée. L'humidité, qui va intervenir sur l'impédance acoustique du bois de printemps et du bois d'été de chaque cerne ne modifiera, éventuellement, que la part due à l'orthotropie du matériau.

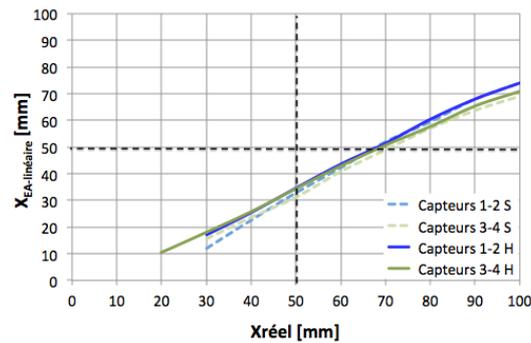
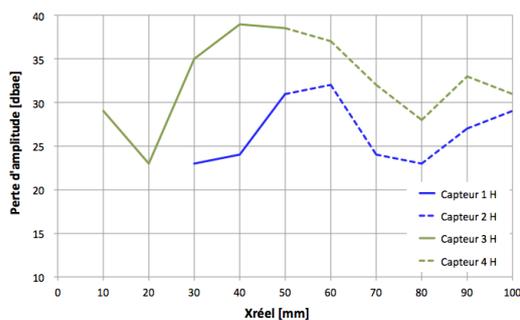


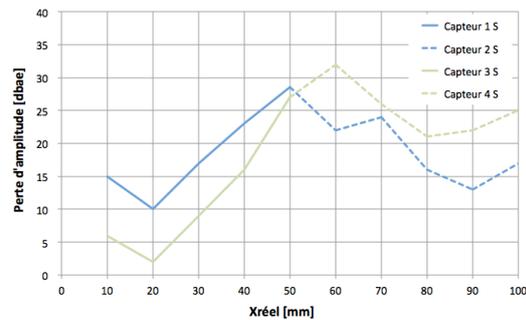
FIGURE 3.39: Superposition des courbes de correction de la localisation

Correction de l'amplitude

Les courbes obtenues sont les suivantes (figure 3.40).



(a) Courbes de correction à l'état humide



(b) Courbes de correction à l'état sec

FIGURE 3.40: Courbes de correction de l'amplitude

Plusieurs constatations sont possibles :

- . Les corrections d'amplitude sont plus élevées dans le cas où l'éprouvette est humide. Avec l'humidité, les signaux sont plus atténués.
- . Les courbes de correction sont très différentes d'un couple de capteur à l'autre et leur allure varie énormément en fonction de l'humidité.
- . De la même façon que pour les courbes de localisation, le système d'acquisition est sourd aux événements pouvant survenir au voisinage de l'entaille.

5.3 Cinétique de fissuration

Comme nous l'avons vu précédemment (chapitre 2, paragraphe 4.2), il est possible d'utiliser les données de l'EA pour effectuer une localisation des événements acoustiques et d'estimer une position de la pointe de la fissure.

Activité acoustique, évènements et pointes de fissure

Avant d'effectuer une localisation, regardons ce qui se passe du point de vue de l'activité acoustique pour chaque capteur. Sur la figure 3.41 sont représentés, de couleur claire, l'évolution de l'hygrométrie dans l'enceinte, et, à l'aide d'une échelle logarithmique, l'activité de deux capteurs.

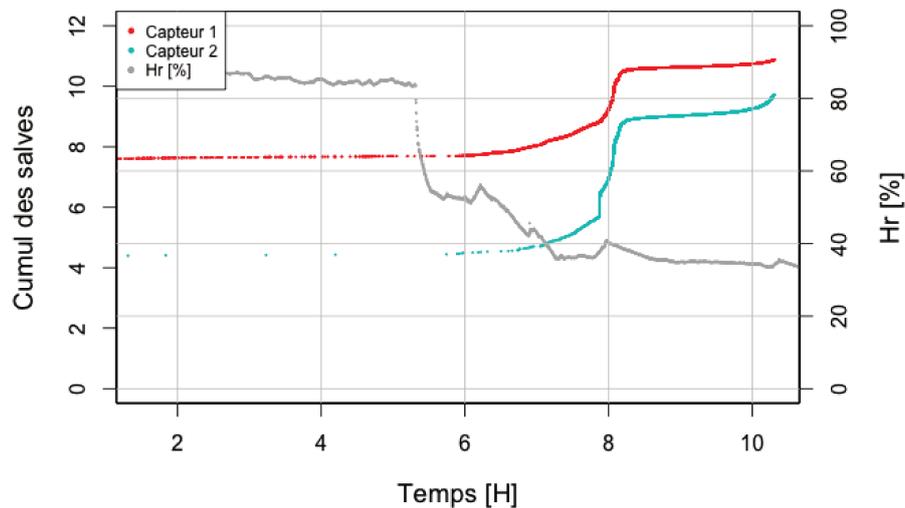


FIGURE 3.41: Activité acoustique (échelle logarithmique) et hygrométrie pour le couple de capteurs 1-2

Plusieurs observations sont à noter :

- . L'hygrométrie reste à peu près constante pendant les 5 premières heures de l'essai. Ce n'est qu'au bout de 5h30 que l'humidité chute réellement et que la phase d'assèchement de l'ambiance et de l'éprouvette commence.
- . L'éprouvette a été chargée dès le début de l'essai. Le capteur 1 enregistre une activité dès le chargement alors que le capteur 2 n'enregistre presque rien.
- . Dès que l'hygrométrie diminue, l'activité acoustique augmente et est enregistrée par les deux capteurs.

Sur la figure 3.42 sont représentées, sur la même base de temps, l'évolution de l'activité acoustique (évènements), les conditions hygrométriques dans l'enceinte durant l'essai et la propagation de fissure.

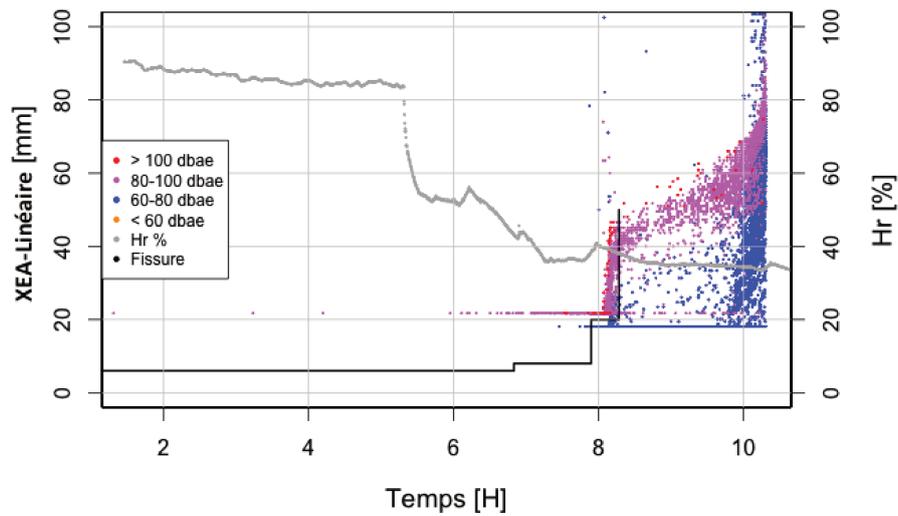


FIGURE 3.42: Localisation des événements acoustiques (capteur 1-2), hygrométrie et fissure visuelle

En ce qui concerne les courbes, nous pouvons constater que :

- . Même si une activité acoustique est enregistrée par le capteur 1 dès le début de l'essai, peu d'évènements sont réellement localisés. L'activité liée aux évènements ne commence qu'au bout de 6 heures, soit environ 1 heure après le début de l'assèchement de l'ambiance.
- . La dernière mesure a été réalisée manuellement peu après 08H. Le relevé suivant a été effectué bien après la ruine de l'éprouvette. Il existe donc une incertitude sur le moment exact où elle est arrivée.
- . L'activité acoustique prend fin au bout de 10H30 (5 heures après le début de l'assèchement de l'ambiance), temps auquel on peut estimer que l'éprouvette était ruinée et séparée en deux.
- . La propagation de fissure commence à partir de 0 [mm]. L'EA, quant à elle, n'indique des évènements qu'à partir de 20 [mm]. Comme nous avons pu le constater sur les courbes de correction de localisation (figure 3.39) et de l'amplitude (figure 3.40), le système d'EA, est sourd aux évènements ayant lieu au voisinage de l'entaille ($x \leq 20$ [mm]).
- . L'EA nous donne une information sur la façon dont a pu évoluer la pointe de fissure après le dernier relevé visuel.

Pointes de fissure par EA et cinétique de fissuration

En prenant une méthode de localisation moyenne, pondérée sur l'amplitude des évènements, nous obtenons la figure 3.43.

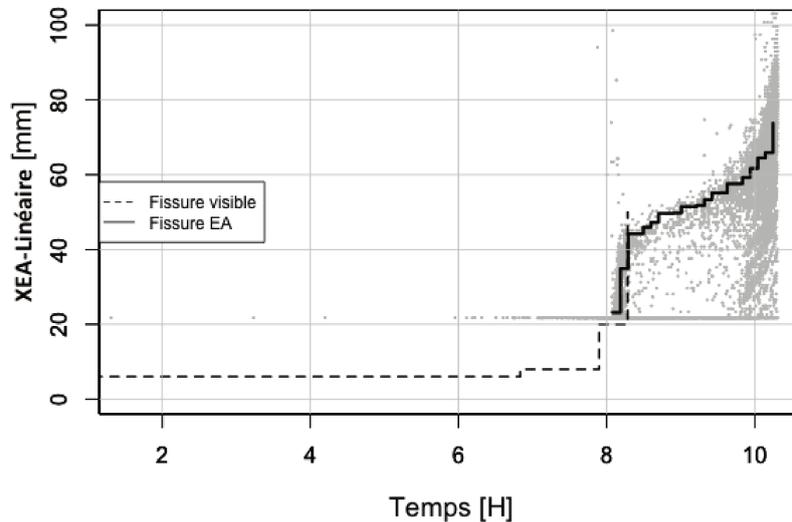


FIGURE 3.43: Activité acoustique et fissuration pour le couple de capteurs 1-2

Nous pouvons constater que :

- . La détection de la pointe de fissure par EA est inefficace en deçà de 20 [mm]. Si nous souhaitons accéder à ce qui se passe au début de l'initiation de la pointe de fissure, il faut envisager une autre disposition des capteurs.
- . La détection de la pointe de fissure par EA nous donne une évaluation de la propagation de fissure entre le dernier point de mesure effectué et la ruine. Nous pouvons voir qu'il y a une continuité entre la fin de la courbe de fissuration obtenue visuellement et le début de la courbe obtenue par EA.
- . Comme nous l'avons vu précédemment, cette méthode est tributaire du choix des niveaux d'amplitudes des évènements retenus pour effectuer cette détection de pointe de fissure.

6 Conclusion

Le traitement statistique des données issues des essais instantanés sur éprouvettes DCB à inertie constante a permis de mettre en avant une bonne corrélation entre l'énergie acoustique enregistrée par les capteurs acoustiques et l'énergie dissipée par fissuration. De même, la méthode employée permet une bonne localisation des événements acoustiques permettant une détermination pertinente de la pointe de fissure, que ce soit pour une éprouvette DCB à inertie constante que variable.

Cependant, plusieurs points restent en suspend et doivent être discutés par la suite :

- . Une calibration est nécessaire pour déterminer une vitesse effective de propagation des ondes dans le matériau testé.
- . La localisation n'est possible que grâce à l'emploi de courbes d'étalonnage, qui sont établies le long du chemin de fissuration.
- . Les courbes d'étalonnage sont principalement représentatives de la géométrie des éprouvettes et, pour une moindre part, de l'orthotropie du matériau utilisé.
- . La disposition des capteurs influence les enregistrements qui vont être effectués.
- . Leur position ainsi que leur orientation ne seront pas les mêmes si l'on s'intéresse à l'initiation de la fissure ou à la cinétique de propagation de fissure.

Enfin, si la détermination de la position de la pointe de fissure par EA est intéressante à réaliser en laboratoire pour compléter des informations obtenues par imagerie, son application in situ est discutable. Pour obtenir les courbes, nous avons dû filtrer les données et ne retenir que les événements de forte amplitude. Cette filtration ne s'est faite qu'une fois l'enregistrement terminé. Enfin, dans le cadre d'un contrôle non destructif, ce sont la nature des mécanismes à l'origine des sources d'EA et leurs évolutions respectives qui vont donner une indication sur l'état de santé d'un ouvrage. Voilà pourquoi il faut s'intéresser à la détection et à l'identification de ces mécanismes.

Chapitre 4

Identification des mécanismes de fissuration

Sommaire

1	Introduction	167
2	Traitement avancé des données acoustiques	167
2.1	Principe de classification	167
2.2	Filtrage des données des essais sur DCB	170
2.3	Classification des données des essais sur DCB	176
3	Méthodes d'identifications comparées des mécanismes de fissuration	178
3.1	Observation de plans de fissuration par imagerie	178
3.2	Essais à modes de ruines choisis	181
4	Identification des mécanismes de fissuration pour les essais DCB	190
4.1	Identification de chaque famille	190
4.2	Analyse statistique	194
5	Conclusion	196

1 Introduction

Pour répondre aux enjeux de l'utilisation de l'émission acoustique dans les structures en bois, il est possible d'effectuer une analyse des signaux enregistrés pour des mécanismes de ruine et les signatures acoustiques leur correspondant. En effectuant un parallèle avec les méthodes développées dans les matériaux composites, le bois pouvant y être assimilé par certains aspects, nous avons pu, par une utilisation conjointe des outils statistiques, de l'imagerie électronique (MEB) et de l'analyse des formes d'ondes, identifier les mécanismes de ruine présents lors des essais.

Ce chapitre est donc consacré à la démarche qui a conduit à l'identification des mécanismes de fissuration. Dans un premier temps, sur la base de données obtenues sur des essais à mode de ruine choisi (traction, flexion et cisaillement), quatre familles d'évènements sont mis en évidence.

Par l'étude de leurs formes d'ondes respectives, ces familles sont associées à de la rupture de fibre, de la fissuration de matrice, de la décohésion et du délaminage telles qu'on les retrouve dans les matériaux composites. L'étude au MEB des plans de fissuration de nos éprouvettes confirme qu'une multitude de mécanismes sont présents et la vraisemblance des résultats obtenus.

2 Traitement avancé des données acoustiques

2.1 Principe de classification

Dans le chapitre 1 (page 56) et le chapitre 3 (page 141), nous avons vu que les cercles de corrélation et les dendrogrammes permettaient de visualiser les corrélations entre variables. Dans ce chapitre, nous allons les utiliser pour choisir les variables les plus représentatives des individus que nous allons tenter de classer.

En effet, avec un nombre de données et de variables importantes, il est utile de ne garder que l'essentiel. Le choix du nombre de variables à étudier peut se faire par une ACP. Pratiquer une ACP consiste à remplacer une famille de variables par de nouvelles variables de variance maximale, non corrélées deux à deux et qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine. Les nouvelles variables ainsi obtenues sont appelées composantes principales. Elles représentent les vecteurs propres de la matrice

de données X et servent de base à une représentation graphique (2D ou 3D) des variables initiales.

En général, on se limite aux deux ou trois premiers plans factoriels pour peu que ceux-ci soient représentatifs de la majorité des variables d'origine et permettent de représenter une grande partie des individus étudiés. Comme on travaille avec des données de nature (et donc de grandeur) différente, on va devoir centrer et normer celles-ci. Dans le cas d'une ACP normée, les variables projetées sur chaque plan factoriel se trouvent à l'intérieur d'un cercle de rayon unité.

Quelques règles sont à prendre en compte pour choisir les descripteurs statistiques pertinents (figure 4.1) :

- . Plus une variable est projetée vers le bord du cercle, plus elle est représentative.
- . Deux variables bien représentées et proches l'une de l'autre sont corrélées positivement tandis que deux variables qui s'opposent sont corrélées négativement.
- . Une orthogonalité entre deux variables traduit l'absence de corrélation linéaire.
- . Une variable proche du centre est peu représentée et peu donc être écartée dans la suite de l'analyse.

Notons que l'ACP ne mesure que des liens linéaires entre variables.

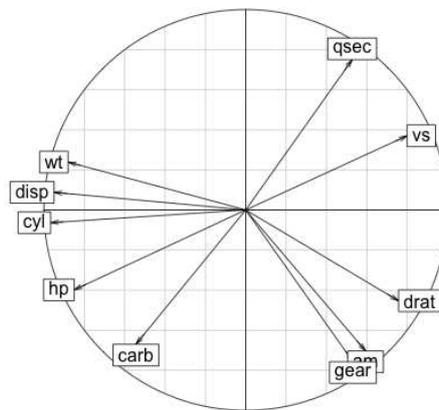


FIGURE 4.1: Cercle de corrélation appliqué aux données mtcars - Extension R

Par la suite, il faut employer une méthode statistique qui permette de regrouper les individus entre eux. La Classification Ascendante Hiérarchique est une méthode de classification automatique, utilisée en analyse de données. Elle permet de regrouper un ensemble d'individus décrits par des caractéristiques (aussi appelées variables). Cette méthode suppose que l'on puisse mesurer des ressemblances (et des dissimilarités) qui permettent de regrouper (ou au contraire de dissocier) des individus entre eux. L'algorithme procède par regroupements (agrégations) successifs en commençant par le plus

petit regroupement possible (l'individu) et en finissant par le plus grand regroupement possible (tous les individus).

Les principales méthodes d'agrégation utilisées sont les suivantes :

. La stratégie du saut minimum (single linkage). Il s'agit de faire en sorte que la distance entre deux groupes soit égale à la plus petite distance des éléments de chacun des groupes.

$$\Delta(A, B) = \min_{i \in A, j \in B} d(i, j) \quad (4.1)$$

. La stratégie du saut maximum (stratégie du diamètre – complete linkage). Il s'agit de faire en sorte que la distance entre parties corresponde à la plus grande distance entre éléments des deux parties.

$$\Delta(A, B) = \max_{i \in A, j \in B} d(i, j) \quad (4.2)$$

. La méthode du saut de Ward. A chaque intégration, on réalise une agrégation de manière à avoir un gain minimum d'inertie intra-classe.

$$\Delta(A, B) = \frac{P_A \cdot P_B}{P_A + P_B} \cdot d^2(G_A, G_B) \quad (4.3)$$

La stratégie du saut minimum occasionne des problèmes d'agglomération. Il n'est pas rare d'obtenir un groupe énorme et plusieurs petits groupes autour.

La stratégie du saut maximum corrige ce problème. Néanmoins, elle est très sensible aux points aberrants ('outsiders'). C'est une des raisons pour laquelle elle est peu utilisée.

La méthode de Ward constitue une méthode qui ne dépend pas d'un choix initial. C'est une des raisons de sa popularité. Par contre, elle a le désavantage de tourner lentement et d'être sensible aux valeurs extrêmes. C'est une des raisons pour laquelle les données étudiées doivent avoir été préalablement filtrées.

Cette méthode propose une série de partitions emboîtées, partitions qui sont représentées sous forme d'arbres appelés dendrogrammes (figure 4.2). Le principal avantage de la Classification Ascendante Hiérarchique est qu'elle présente les résultats sous forme d'arbre qui permet de mettre en évidence une augmentation de la dispersion entre les groupes lorsque l'on passe d'une agrégation à une autre. Visuellement, nous pouvons juger du nombre de classes qu'il faut constituer.

Dans l'exemple (figure 4.2), nous voyons que nous pouvons effectuer, d'un point de vue statistique, 3 familles. Cette coupure se fait, en général, au niveau d'un saut (branche verticale la plus grande). Pour l'ensemble des essais qui ont été effectués, nous avons utilisé toutes les méthodes d'agrégations mises à notre disposition et avons retenu comme nombre de partitions celui qui apparaissait le plus souvent.

bien les distinguer. Aucun risque de superposition dans les enregistrements.

Dans la réalité, plusieurs évènements, de nature différente, peuvent avoir lieu en même temps et se retrouver enregistrés en même temps.

Si l'on effectue une analyse globale, l'étude de tous les signaux, sans nettoyage, peu s'avérer satisfaisante. Par contre, si l'on recherche une certaine intelligibilité dans les signaux enregistrés, nous allons devoir, malgré tout, filtrer ces derniers. A titre d'exemple, voici des formes d'onde qui ont été enregistrées lors d'un essai mécanique d'une éprouvette de Douglas. La figure 4.3 représente une forme d'onde d'un signal que l'on peut qualifier de *propre*. Ce type d'enregistrement est la marque d'une seule source et donc d'un seul mécanisme d'endommagement. La figure 4.4 représente la forme d'onde de plusieurs signaux. Ce type d'enregistrement est la marque de plusieurs sources. Plusieurs mécanismes se retrouvent donc sur le même enregistrement.

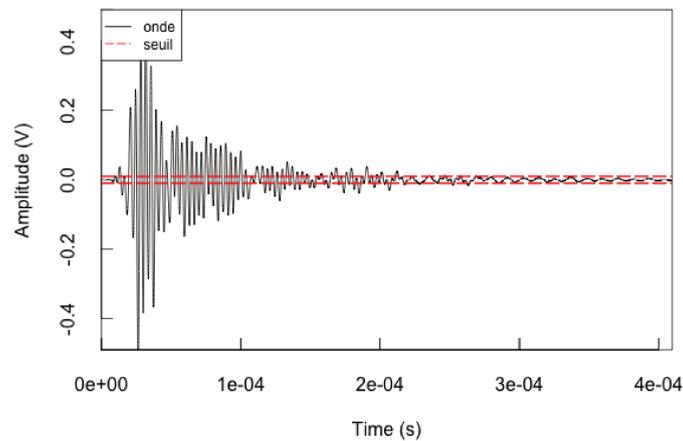


FIGURE 4.3: Un seul signal enregistré

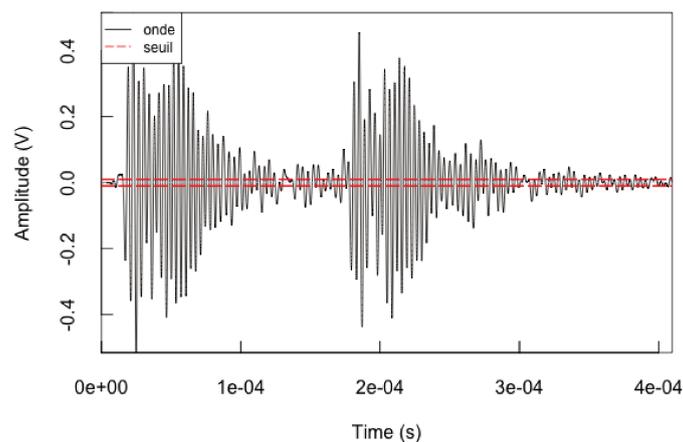


FIGURE 4.4: Plusieurs signaux dans un seul enregistrement

Avant d'effectuer la moindre classification, il faut préparer les données et sélectionner les variables. La préparation des données passe par leur nettoyage : il s'agit d'identifier tout élément qui peut paraître aberrant ou atypique.

Pour effectuer cette préparation des données, quelques représentations graphiques vont nous permettre de mettre en évidence des éléments visiblement incohérents. En général, il est convenu de travailler sur différentes variables : l'énergie, l'amplitude, la durée, le temps de montée, les coups, etc.

Filtrage des évènements sur les coups

Les individus, présentant un nombre de coups (passages au dessus du seuil) faibles, sont le signe d'un mauvais enregistrement. Il s'agit de signaux trop courts pour être compatibles avec des mécanismes d'endommagement. Les signaux dont la valeur est inférieure à 10 ont été retirés. Le choix de cette valeur vient de l'étude de la figure 4.5. En deçà de cette valeur, nous sommes en présence de *fins de signaux* qui sont considérées comme des phénomènes indéterminés en EA.

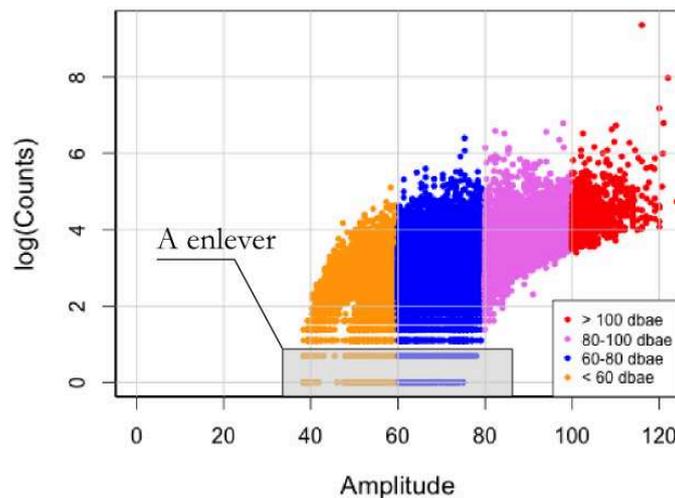


FIGURE 4.5: Exemple de travail de filtration sur les coups pour l'éprouvette S1, capteurs 1-2

A l'issue de ce filtrage, 20 % des individus (évènements) initialement enregistrés ont été retirés. A titre d'exemple, voici une illustration des évènements qui ont été retirés (figure 4.6).

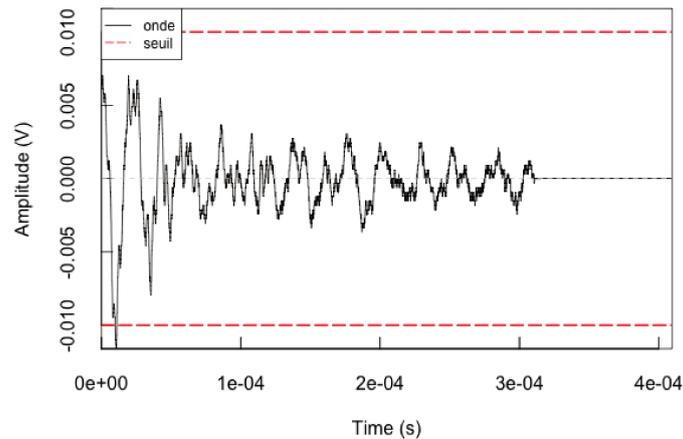


FIGURE 4.6: Exemple d'une forme d'onde d'un évènement à nombre de coups trop faible

Filtrage des évènements sur l'énergie et la durée

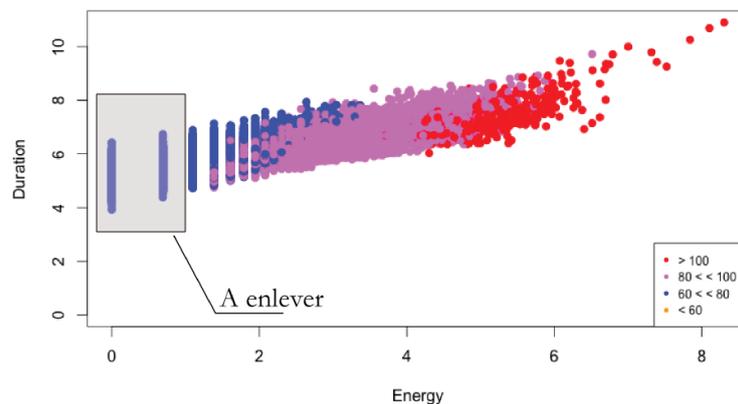


FIGURE 4.7: Exemple de travail de filtration sur l'énergie et la durée (échelle logarithmique) pour l'éprouvette S1, capteurs 1-2

De la même façon que pour le filtrage effectué sur le nombre de coups, les individus regroupés en *trainées* sont retirés. Les signaux dont l'énergie est inférieure à 10 [aJ] sont éliminés. Enfin, lorsque l'on souhaite effectuer des regroupements ou des classifications, il convient de retirer les évènements *hors norme* (*outliers*). Comme on peut le voir sur la figure 4.7 les éléments de longue durée doivent être retirés. Correspondant à l'enregistrement simultané de plusieurs signaux, ils vont créer des *discontinuités* qui vont venir perturber les algorithmes de classification.

A l'issue de ces filtrations, 75 % des individus (évènements) encore présents ont été retirés. A titre d'exemple, voici une illustration des évènements qui ont été retirés (figure 4.8).

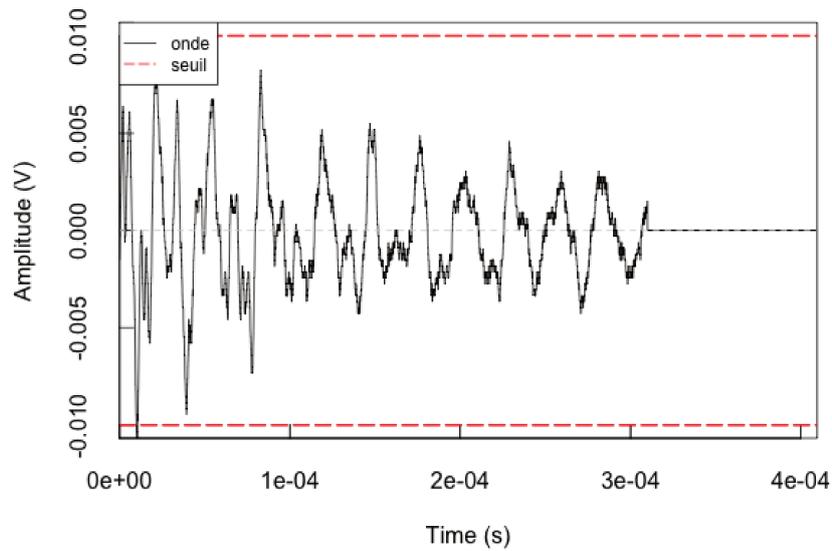
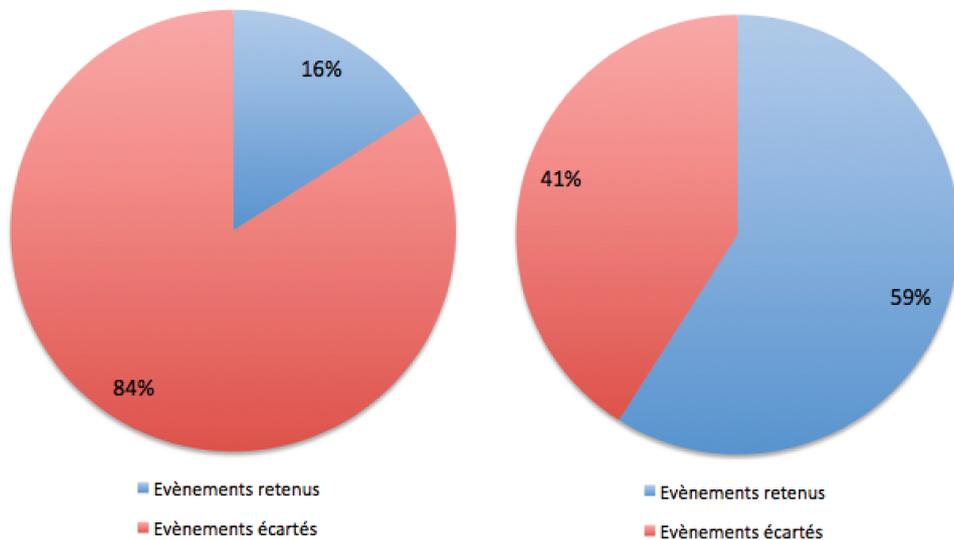


FIGURE 4.8: Exemple d'une forme d'onde d'un évènement à énergie trop faible

Sur l'ensemble des éprouvettes qui ont été testées, les données récupérées après les diverses filtrations sont représentées à les figures 4.9a et 4.9b. Si, en moyenne, le nombre d'évènements retenus est de l'ordre de 16%, ils représentent 59% de l'énergie acoustique enregistrée par les capteurs.



(a) Part des évènements retenus par la classification
 (b) Part de l'énergie des évènements retenus par la classification

FIGURE 4.9: Part des évènements retenus

Filtration des évènements sur l'amplitude

Dans des essais réalisés sur des matériaux composites à base de chanvre ([Bonnafous et al., 2009](#)), différents modes de ruine ont été identifiés. Leurs amplitudes caractéristiques ont été consignées dans le tableau (4.1).

Matériau	Mode [dB]	Gamme [dB]	Mécanisme d'endommagement dominant
Fil de chanvre seul	65	52-78	Endommagement et rupture de fibre
Résine seule	49	32-65	Fissuration
Composites [0/90] chanvre/époxy	53	50-57	Fissuration de la matrice
	59	54-64	Rupture de l'interface renfort/matrice, déchaussement
	68	64-72	Endommagement et rupture des renforts

Tableau 4.1: Corrélation entre les amplitudes des évènements d'émission acoustique de chaque matériau et les mécanismes d'endommagement d'après ([Bonnafous et al., 2009](#))

Si ces données fournissent une première indication sur le niveau d'amplitude des signaux que nous cherchons, une représentation adaptée permet de mettre en évidence des évènements hors norme. Les individus de faible amplitude sont parfois des enregistrements d'échos – donc de signaux fortement déformés.

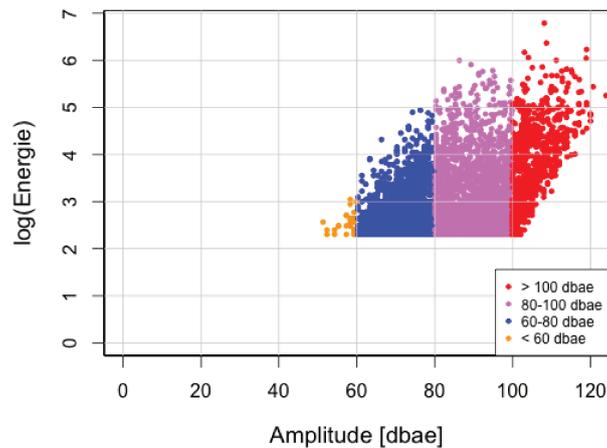


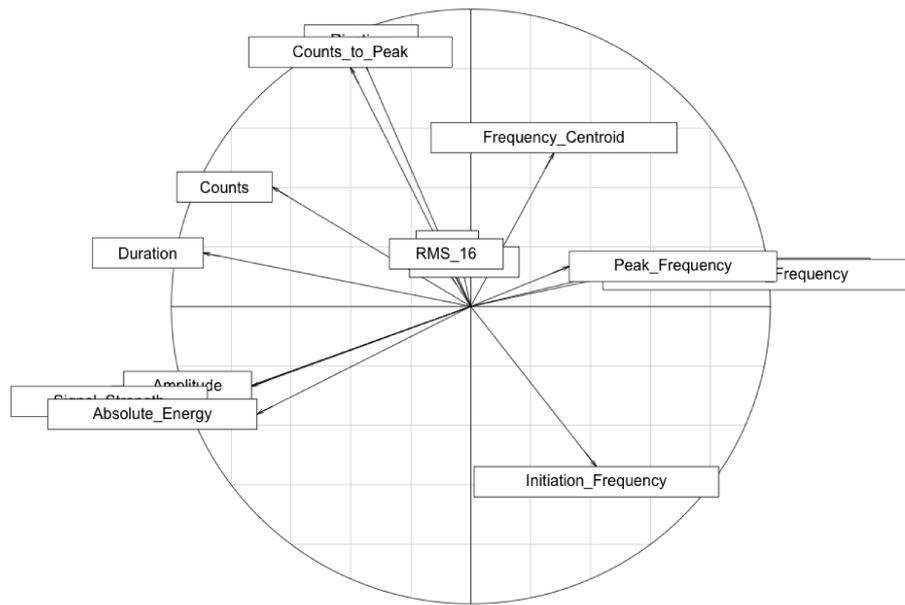
FIGURE 4.10: Nettoyage des données sur l'amplitude - représentation en échelle logarithmique

Comme on peut le voir sur la figure 4.10, suite aux filtrations déjà effectuées, les signaux dont l'amplitude à la source est inférieure à 50 [dB] ont été éliminés.

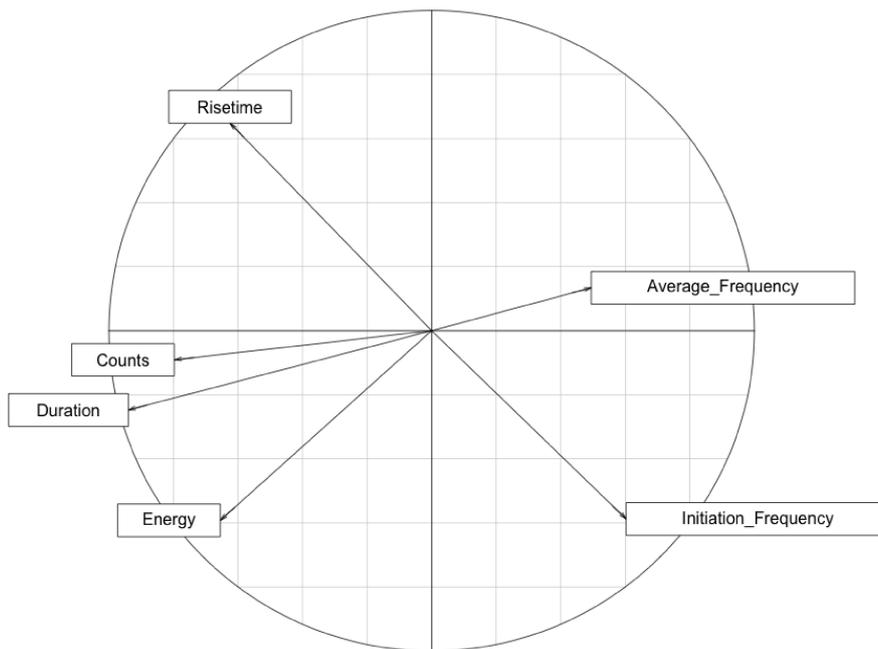
2.3 Classification des données des essais sur DCB

A la lecture des précédents graphiques, nous pouvons remarquer que les données présentées sur la figure 4.10, ne représentent (éprouvette S1) que 20% des individus initialement présents.

Comme nous l'avons vu précédemment, il est possible de réaliser une classification statistique de nos événements grâce à une ACP. On va donc pouvoir établir des liens linéaires entre variables. En établissant un cercle de corrélation sur l'ensemble de nos variables (figures 4.11a), on peut constater que plusieurs d'entre elles sont fortement corrélées. On peut donc n'en retenir qu'un nombre restreint, pour peu qu'elles soient représentatives de l'ensembles des données étudiées (figures 4.11b).



(a) Cercle de corrélation avec toutes les variables



(b) Cercle de corrélation avec les variables retenues

FIGURE 4.11: Cercles de corrélation sur l'éprouvette S1

3 Méthodes d'identifications comparées des mécanismes de fissuration

Afin d'associer les familles issues de la CAH à des mécanismes, nous pouvons procéder de plusieurs façons.

Dans une première partie, on compare le nombre de familles « statistiques » avec le type d'endommagements que l'on peut observer sur des éprouvettes.

Sur deux éprouvettes (une sèche et une humide), deux échantillons ont été prélevés sur les plans de fissurations et examinés au microscope électronique à balayage¹. Notons au passage, que les échantillons doivent être exempts de toute souillure et secs pour pouvoir être conditionnés et examinés. Les éprouvettes utilisées dans la cas présent n'ont pas été suivies par EA. En effet, comme on peut le constater sur la figure 2.53, la procédure de calibration par AST nécessite l'emploi d'un couplant qui vient *polluer* la surface du matériau.

Dans une deuxième partie, à l'aide d'essais de fissuration spécifiques, on compare les formes d'ondes et les caractéristiques moyennes des familles réalisées à celles déjà obtenues dans les matériaux composites. Le bois étant lui-même un matériau composite, nous retrouvons des similarités.

3.1 Observation de plans de fissuration par imagerie

Dans une première approche, nous avons tenté de savoir ce qui s'était réellement passé dans nos éprouvettes lors des essais de traction en mode I. Deux éprouvettes à des taux d'humidité différents ont été testées. Ensuite, leur plan de fissuration a été ausculté au microscope électronique à balayage. A l'aide de la figure 1.5, nous allons pouvoir identifier les différents éléments présents dans les figures 4.13 à 4.15.

1. MEB Philips XL30 - Microscope électronique à balayage conventionnel équipé d'un système de microanalyse X (Oxford Instrument) – Université de Limoges

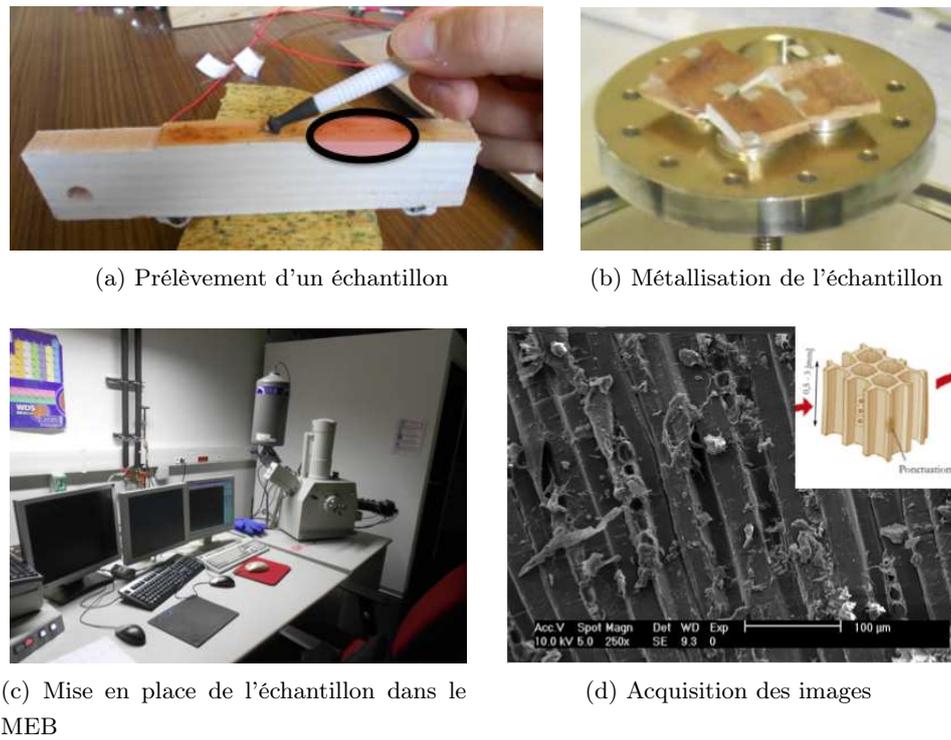


FIGURE 4.12: Procédure d'analyse d'un échantillon au MEB

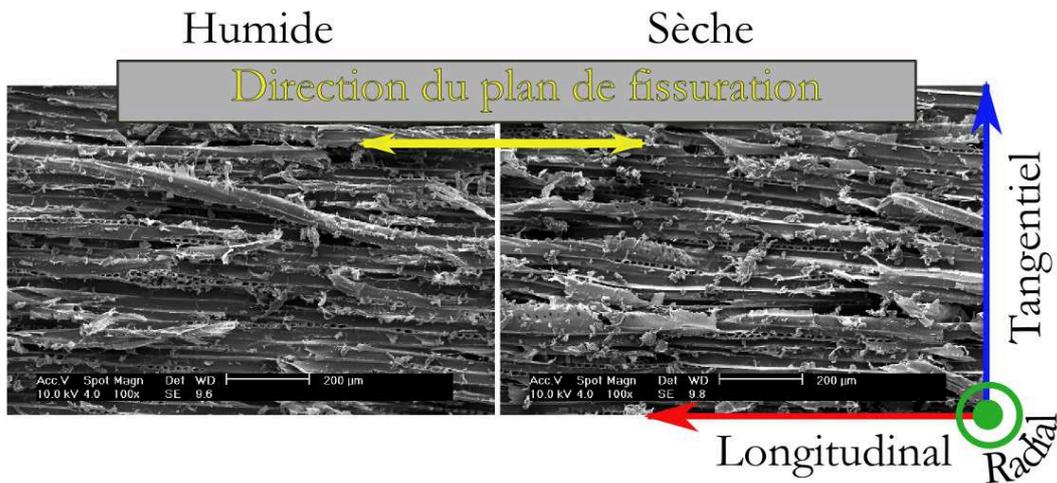


FIGURE 4.13: Plan de fissuration d'une éprouvette - Grossissement x 100

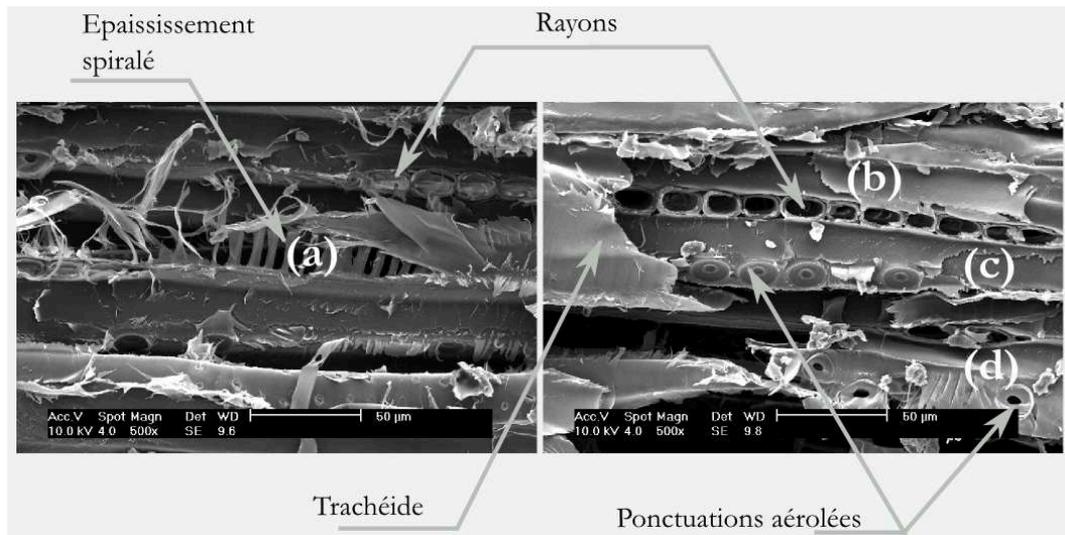


FIGURE 4.14: Faciès de rupture pour une éprouvette humide (à gauche) et sèche (à droite) - grossissement x500

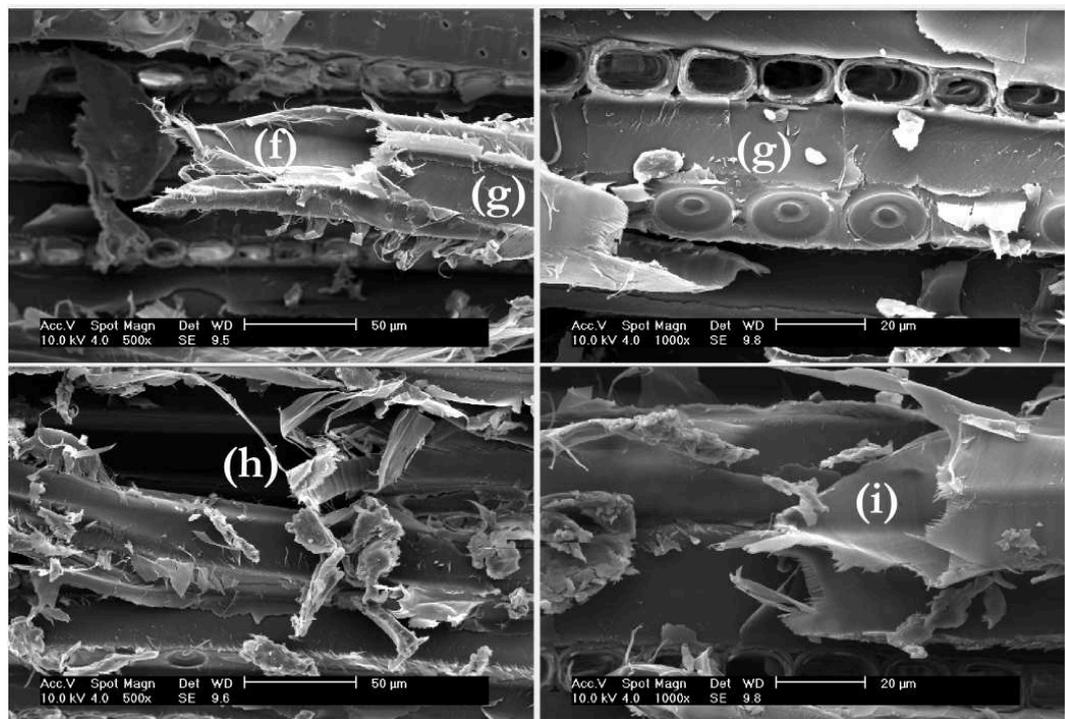


FIGURE 4.15: Faciès de rupture pour une éprouvette humide (à gauche) et sèche (à droite) - grossissement x500 pour les photos de gauche et - grossissement x1000 pour les photos de droite

L'examen des clichés ci-dessus (figures 4.13 à 4.15) nous permet de faire quelques constatations. Que nous soyons dans le cas d'une éprouvette humide ou sèche, nous pouvons déceler plusieurs types d'endommagements au niveau des cellules du bois :

- . Des arrachements de fibres, trachéide sectionnée (repères f et i).
- . Des décollements au niveau de la paroi cellulaire (repères d et g).
- . Une déstructuration de la paroi cellulaire (repères a et h).
- . Un déchirement perpendiculaire et longitudinal dans la trachéide (repère c).
- . Un sectionnement des rayons (repère b)

Il s'agit de quelques clichés, pris sur une petite zone du plan de fissuration de deux éprouvettes. A défaut d'avoir pu réaliser une cartographie complète de chacune des éprouvettes, celles-ci nous donnent des indications sur ce que nous devrions entendre par la suite :

- . De la délamination et de la décohésion (lorsque des fibres apparaissent séparées du reste de la structure).
- . De la rupture de fibre (lorsque des fibres apparaissent sectionnées).
- . De la rupture de parois (primaire, secondaire ?) (lorsque des fissures sont présentes sur les parois des cellules).

3.2 Essais à modes de ruines choisis

Nous proposons de générer des modes de ruptures préférentiels pour obtenir les caractéristiques (valeurs moyennes et formes d'onde) de certains types d'endommagement. Nous avons donc réalisé les essais de chargement mécanique suivants.

- . Des essais de traction, dans le sens longitudinal, devraient générer principalement des phénomènes de rupture de fibres (arrachement aux extrémités des fibres et déchirement dans les fibres).
- . Des essais de cisaillement devraient générer majoritairement des phénomènes de décohésion fibre/matrice (glissements entre fibres), phénomènes touchant la paroi primaire.
- . Enfin, des essais de flexion devraient nous permettre d'avoir un ensemble de tous ces phénomènes.

Trois essais ont été réalisés : traction (figure 4.16), cisaillement (figure 4.17) et flexion (figure 4.18). Dans chacun des cas, trois éprouvettes sèches ont été instrumentées.

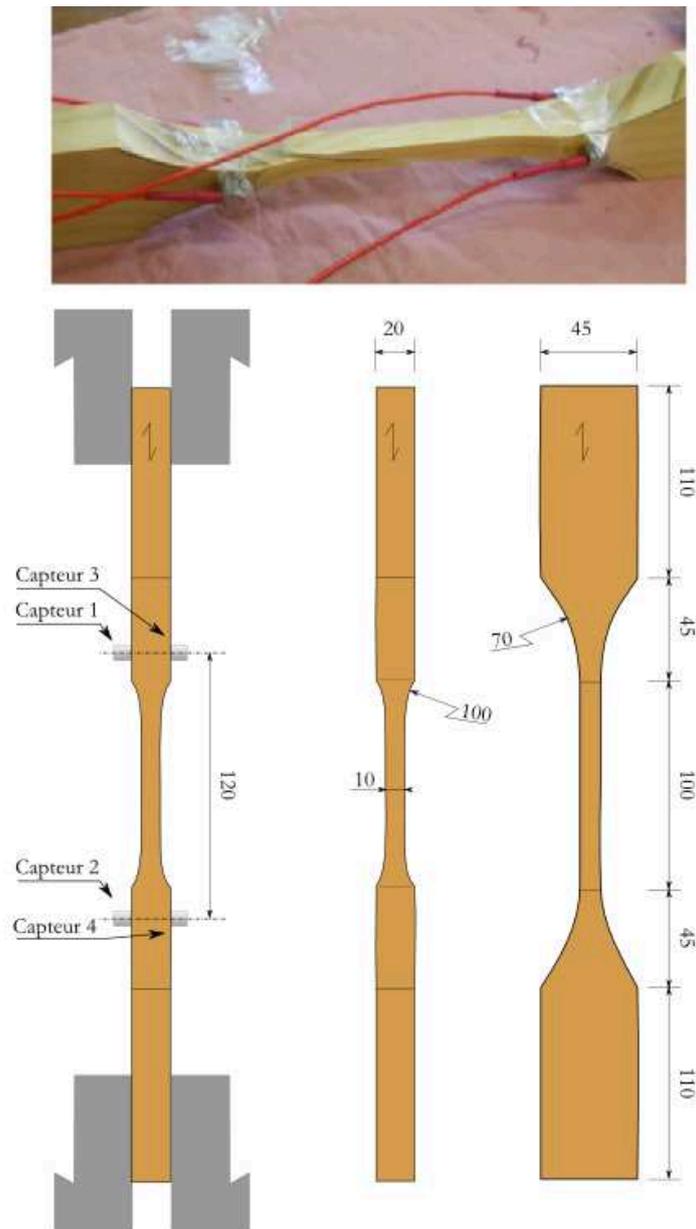


FIGURE 4.16: Essai de traction et éprouvette instrumentée

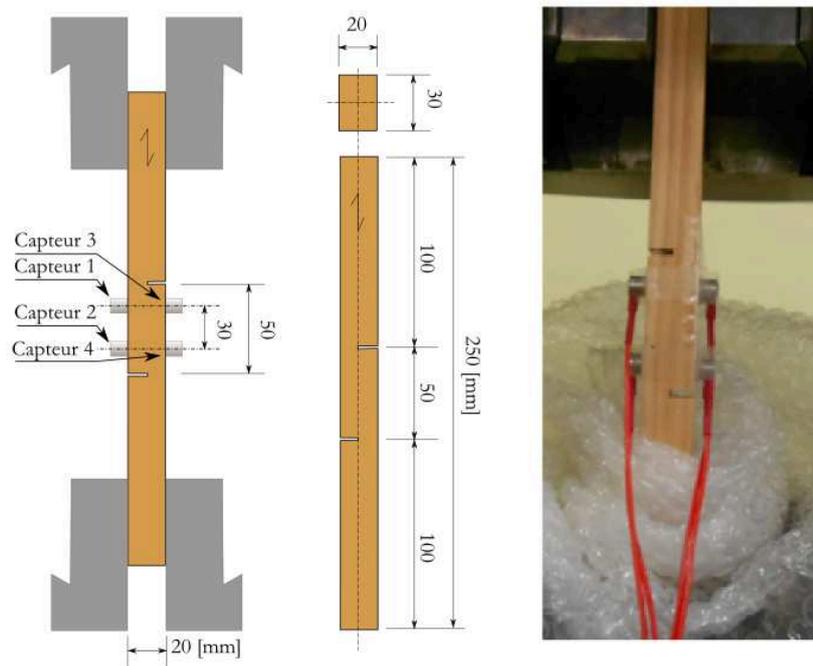


FIGURE 4.17: Essai de cisaillement et éprouvette instrumentée

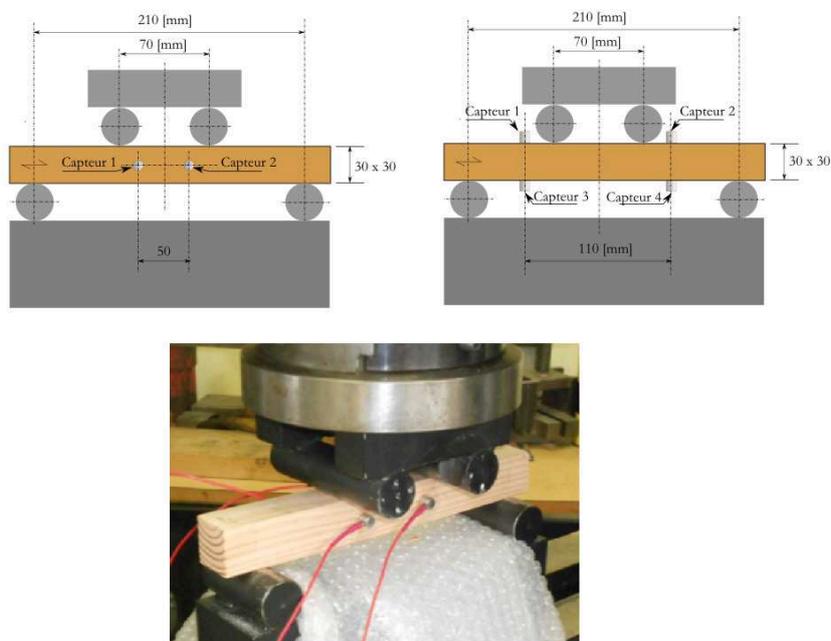


FIGURE 4.18: Essai de flexion et éprouvette instrumentée

Après analyse des résultats des évènements acoustiques enregistrés et application de l'algorithme de classification comme décrit au paragraphe 2.1 de ce chapitre, page 167, quatre familles ont été identifiées.

Familles	1	2	3	4
Risetime	123	723	401	127
Counts	70	97	121	53
Energy [<i>aJ</i>]	29	44	36	66
Duration [μs]	808	1608	2399	1002
Average frequency [<i>kHz</i>]	95	61	51	51
Initiation frequency [<i>kHz</i>]	190	70	134	151
Part des évènements [%]	82	12	5	1

Tableau 4.2: Valeurs moyennes de quelques caractéristiques de chaque famille pour l'ensemble des essais de traction

Familles	1	2	3	4
Risetime	116	724	264	
Counts	63	116	144	
Energy [<i>aJ</i>]	24	76	1266	
Duration [μs]	742	1724	2612	
Average frequency [<i>kHz</i>]	98	68	58	
Initiation frequency [<i>kHz</i>]	217	81	157	
Part des évènements [%]	73	26	1	

Tableau 4.3: Valeurs moyennes de quelques caractéristiques de chaque famille pour l'ensemble des essais de cisaillement

Familles	1	2	3	4
Risetime	71	651		222
Counts	54	90		102
Energy [<i>aJ</i>]	21	39		102
Duration [μs]	644	1474		1580
Average frequency [<i>kHz</i>]	90	62		58
Initiation frequency [<i>kHz</i>]	215	70		140
Part des évènements [%]	64	12		24

Tableau 4.4: Valeurs moyennes de quelques caractéristiques de chaque famille pour l'ensemble des essais de flexion

Pour chaque essai, les valeurs moyennes des caractéristiques qui ont été retenues pour effectuer la classification sont fournies dans les tableaux 4.2 à 4.4.

Sur la base des classifications statistiques, nous pouvons voir que pour chaque type d'essai, la famille n°1 est celle qui est la plus représentée. Elle représente plus de 60 % des événements classés. La famille n°2, quant à elle, représente entre 10 et 25 % des événements. Les familles 3 et 4 sont, selon le type d'essai réalisé, présentes ou non, et ce, dans des proportions qui varient de quelques % à près d'un quart des événements classés. Malgré cette classification, il n'est pas aisé de déterminer la nature du phénomène étudié. Procédons maintenant à une étude des formes d'ondes des événements que nous allons trouver dans chacune des familles.

Concernant la famille n°1, un événement représentatif est proposé à titre d'illustration sous sa forme d'onde, son spectrogramme et son analyse des pics de fréquences issues d'une FFT (figures 4.19 et 4.20).

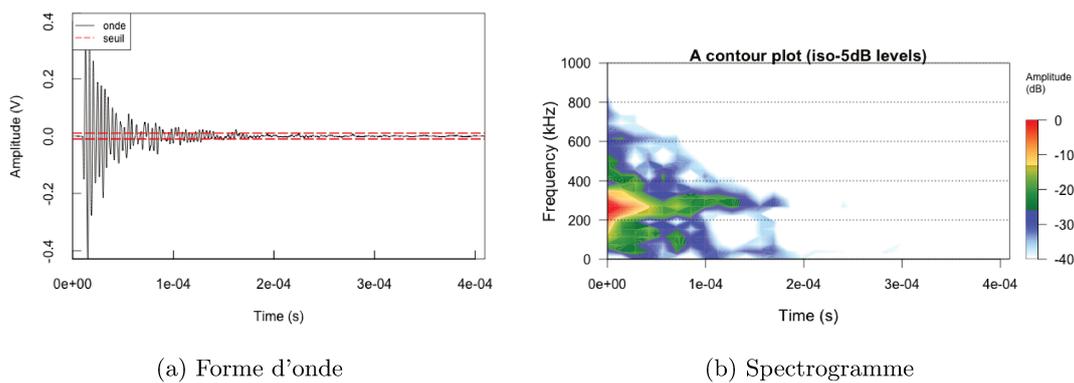


FIGURE 4.19: Forme d'onde et spectrogramme pour un événement de la famille 1

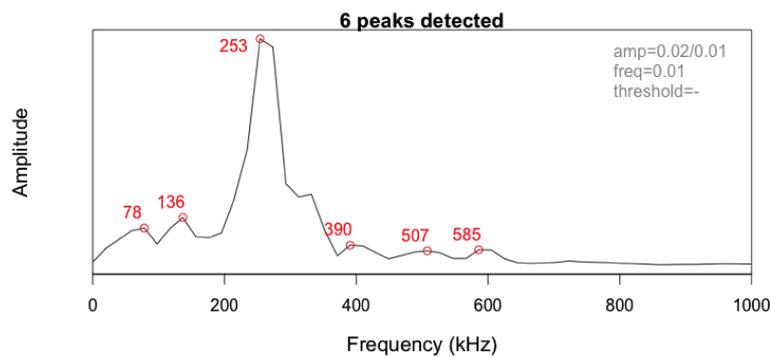


FIGURE 4.20: Analyse des pics de fréquence pour un événement de la famille 1

Les évènements acoustiques classés dans cette famille sont courts, de type impulsionnel avec un temps de montée très court. L'analyse fréquentielle montre un pic d'activité vers 253 [kHz]

Concernant la famille n°2, un évènement représentatif est proposé à titre d'illustration sous sa forme d'onde, son spectrogramme et son analyse des pics de fréquences issues d'une FFT (figures 4.21 et 4.22).

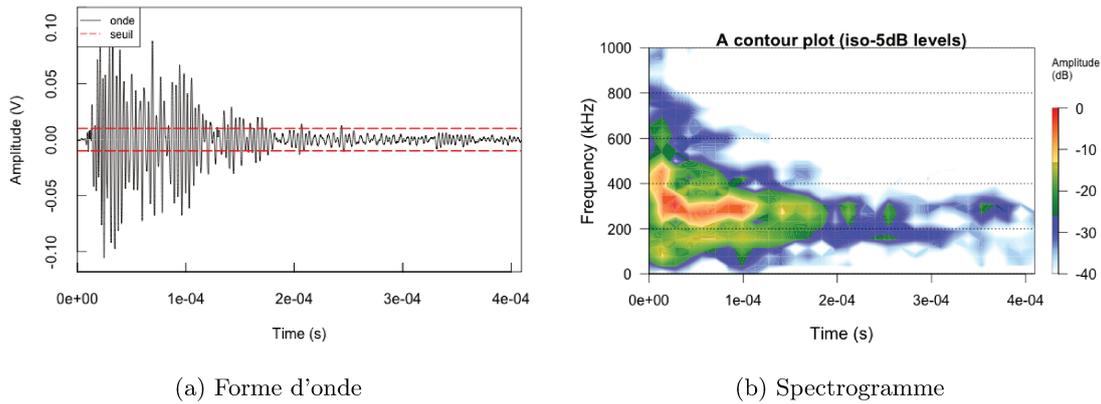


FIGURE 4.21: Forme d'onde et spectrogramme pour un évènement de la famille 2

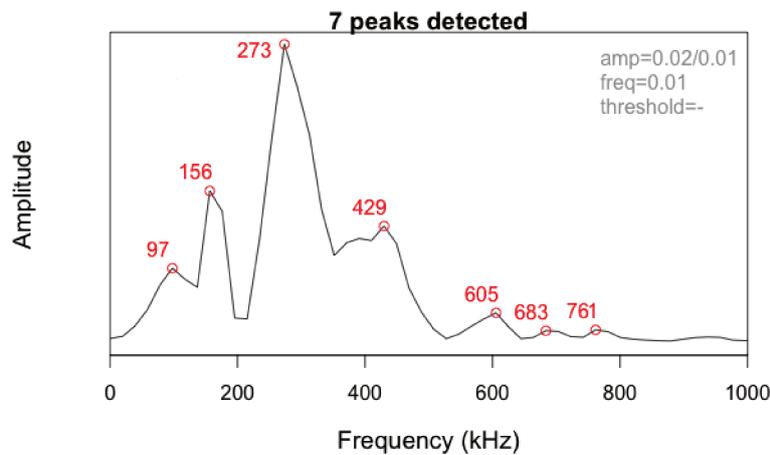


FIGURE 4.22: Analyse des pics de fréquence pour un évènement de la famille 2

Nous pouvons constater que ces évènements sont d'une durée moyenne, de type résonnant avec un temps de montée (Risetime) moyen. L'analyse fréquentielle montre des pics d'activité vers 156 et 273 [kHz].

Concernant la famille n°3, un évènement représentatif est proposé à titre d'illustration sous sa forme d'onde, son spectrogramme et son analyse des pics de fréquences issues d'une FFT (figures 4.23 et 4.24).

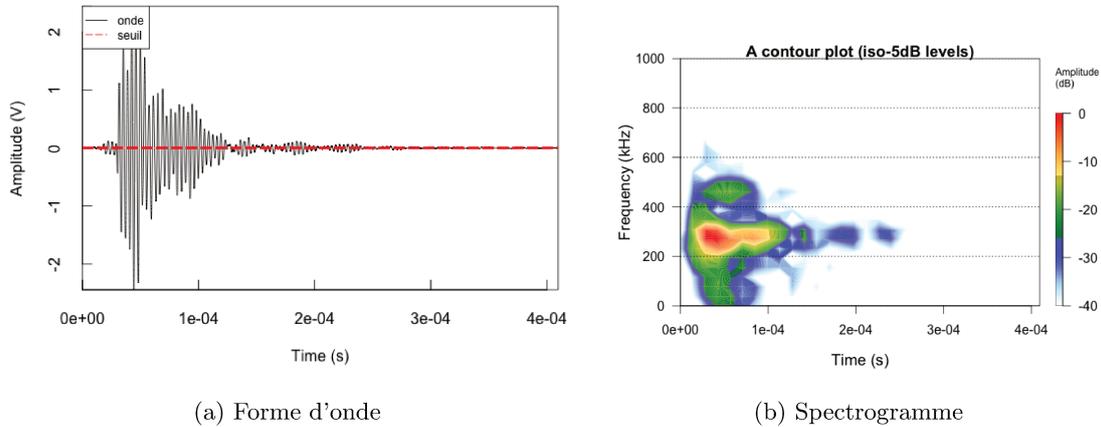


FIGURE 4.23: Forme d'onde et spectrogramme pour un évènement de la famille 3

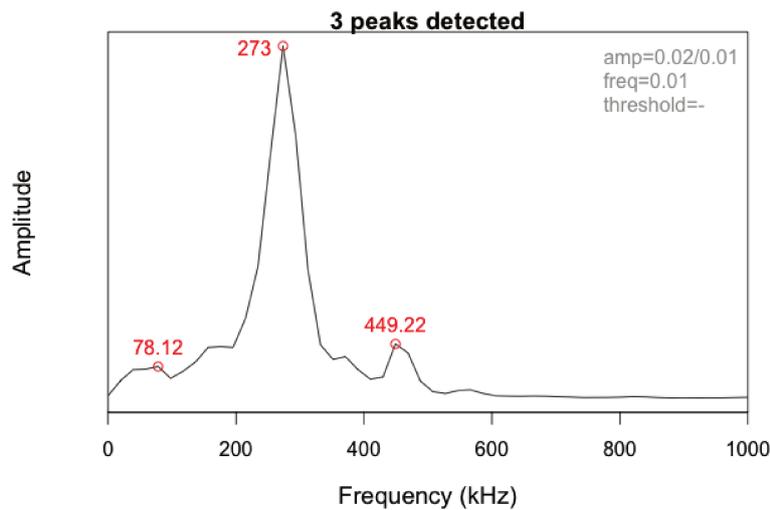


FIGURE 4.24: Analyse des pics de fréquence pour un évènement de la famille 3

Nous pouvons constater que ces évènements sont d'une durée courte, de type résonnant avec un temps de montée (Risetime) court. L'analyse fréquentielle montre un pic d'activité vers 273 [kHz].

Concernant la famille n°4, un évènement représentatif est proposé à titre d'illustration sous sa forme d'onde, son spectrogramme et son analyse des pics de fréquences issues d'une FFT (figures 4.25 et 4.26).

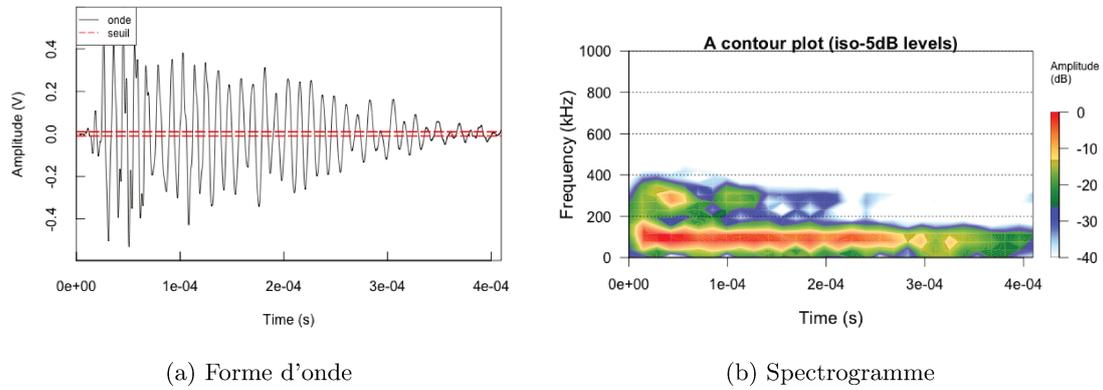


FIGURE 4.25: Forme d'onde et spectrogramme pour un évènement de la famille 4

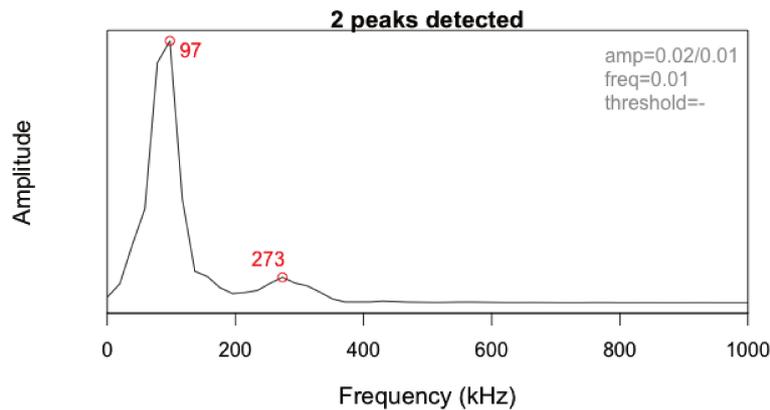


FIGURE 4.26: Analyse des pics de fréquence pour un évènement de la famille 4

Nous pouvons constater que ces évènements sont d'une durée moyenne, de type résonnant avec un temps de montée (Risetime) court. L'analyse fréquentielle montre un pic d'activité vers 97 [kHz].

Si l'on reprend les travaux réalisés par (Godin et al., 2005) et (Hamdi, 2013) sur les matériaux composites, quatre types d'endommagements ont été recensés et identifiés. Une signature acoustique a été fournie pour chacun d'eux.

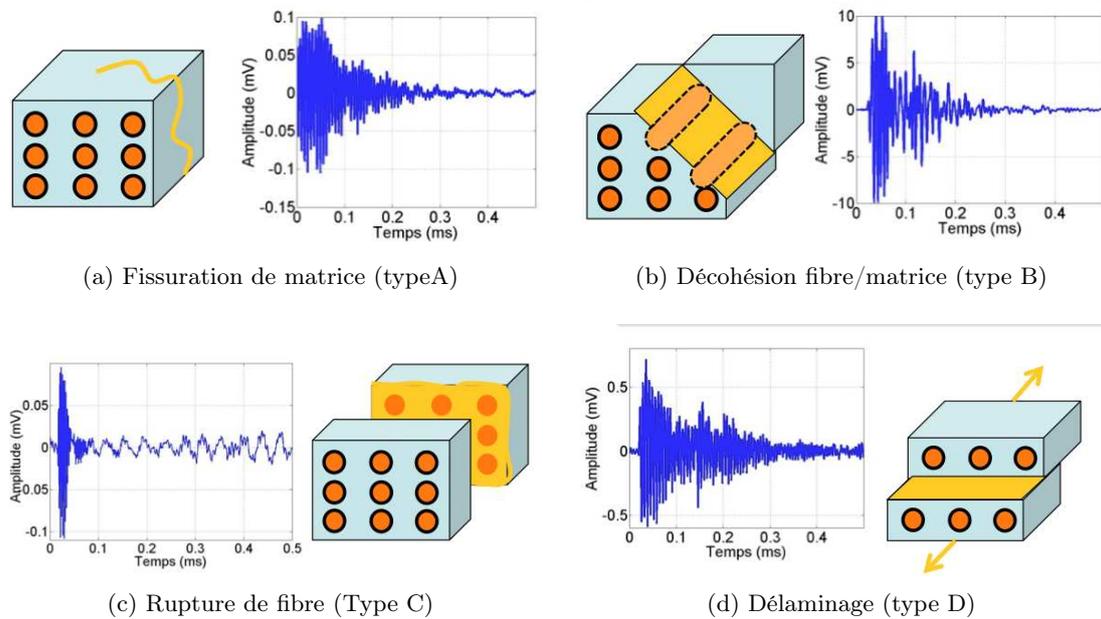


FIGURE 4.27: Différents types de modes de ruine d'après (Hamdi, 2013)

Par analogie avec les formes d'onde que nous avons obtenues, nous pouvons en déduire que :

- . La famille n°1 pourrait être associée à de la rupture de fibre.
- . La famille n°2 pourrait être associée à de la fissuration de matrice (rupture de la paroi primaire).
- . La famille n°3 pourrait être associée à de la décohésion entre les fibres et la paroi primaire.
- . La famille n°4 pourrait être associée à du délaminage (décollement de la paroi primaire des cellules sur un plan).

Suite à nos essais, nous pouvons constater que la rupture de fibre (famille 1) est la plus représentée dans nos essais suivie par la fissuration de matrice (famille 2). Ensuite, selon le type d'essai (traction et cisaillement), les deux autres familles apparaissent ... avec un nombre de représentants qui les rendent quasi négligeables.

4 Identification des mécanismes de fissuration pour les essais DCB

Il est possible d'appliquer cette méthode de classification à chacun de nos essais et d'affecter des évènements acoustiques à un mode de ruine supposé.

4.1 Identification de chaque famille

Étudions maintenant les résultats obtenus sur une éprouvette sèche (S1) (tableaux 4.5 et 4.6) et une éprouvette humide (H1) (tableaux 4.7 et 4.8).

Ruine supposée	Rupture de fibres	Rupture matricielle
Risetime [μs]	76	437
Counts	44	84
Energy [aJ]	22	61
Duration [μs]	643	1395
Average frequency [kHz]	70	60
Initiation frequency [kHz]	173	95
Nombre d'évènements	4974	1094

Tableau 4.5: Résultats de la classification pour l'éprouvette S1 - capteurs 1 - 2

Ruine supposée	Rupture de fibres	Rupture matricielle	Délaminage
Risetime [μs]	51	543	70
Counts	48	78	91
Energy [aJ]	18	29	65
Duration [μs]	675	1263	1500
Average frequency [kHz]	73	62	60
Initiation frequency [kHz]	281	71	238
Nombre d'évènements	2819	767	359

Tableau 4.6: Résultats de la classification pour l'éprouvette S1 - capteurs 3 - 4

Quel que soit le couple de capteurs utilisés, il apparaît que 2 modes de ruine se dégagent de l'analyse statistique : la rupture de fibre (principalement) et la rupture matricielle. Ce dernier mode de ruine correspond à une rupture apparue dans la paroi

primaire entre les cellules. Par contre, une dissymétrie existe : sur le nombre d'évènements « reconnus » par l'algorithme de classification et par le fait qu'un couple de capteurs reconnaît une troisième famille semblant correspondre à un délaminage.

Ruine supposée	Rupture de fibres	Rupture matricielle	Délaminage
Risetime [μs]	75	59	849
Counts	48	38	55
Energy [aJ]	17	16	16
Duration [μs]	1223	465	1511
Average frequency [kHz]	44	84	39
Initiation frequency [kHz]	152	146	30
Nombre d'évènements	124	152	67

Tableau 4.7: Résultats de la classification pour l'éprouvette H1 - capteurs 1 - 2

Ruine supposée	Rupture de fibres	Rupture matricielle	Délaminage
Risetime [μs]	28	86	147
Counts	46	53	267
Energy [aJ]	14	20	95
Duration [μs]	362	530	2526
Average frequency [kHz]	129	100	107
Initiation frequency [kHz]	351	191	179
Nombre d'évènements	166	156	2

Tableau 4.8: Résultats de la classification pour l'éprouvette H1 - capteurs 3 - 4

En ce qui concerne l'éprouvette humide, le nombre de mécanismes détectés et le nombre d'évènements dans chacun de ces mécanismes est le même pour les deux jeux de capteurs. Notons toutefois que l'identification des mécanismes s'est faite sur un nombre d'évènements plus restreint.

Sur la base des éprouvettes qui nous servent d'illustration depuis le début de ce manuscrit, regardons la répartition des différentes familles par rapport aux fissures visibles et acoustiques.

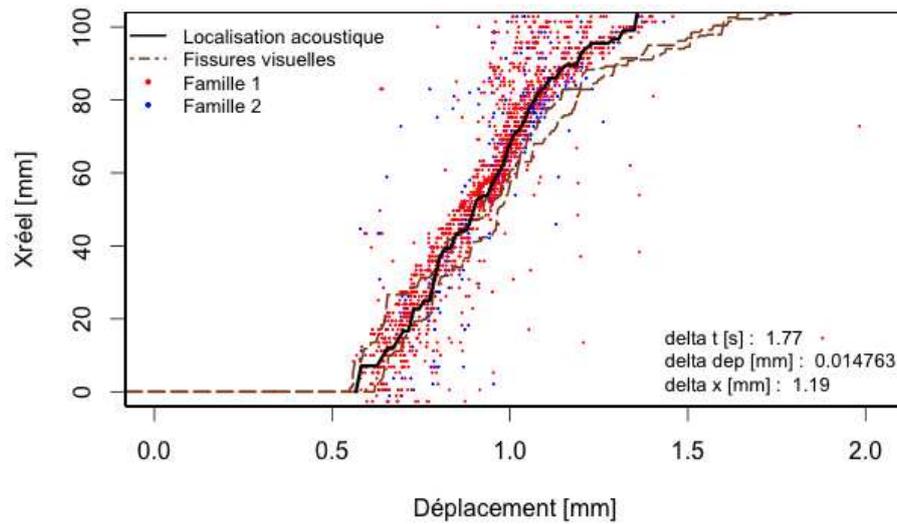


FIGURE 4.28: Eprouvette S1, capteurs 1-2

Sur la figure 4.28, sont représentées les deux familles qui ont été identifiées pour l'éprouvette S1 (couple de capteur 1-2). La famille 1 correspond à de la rupture de fibre et la famille 2 à de la fissuration matricielle.

Nous pouvons constater que les deux familles sont majoritairement présentes au voisinage (de part et d'autre) de la pointe de fissure acoustique. Compte tenu de la représentation des familles, il n'est pas possible de clairement les distinguer. Celles-ci donnent l'impression d'être concomitantes.

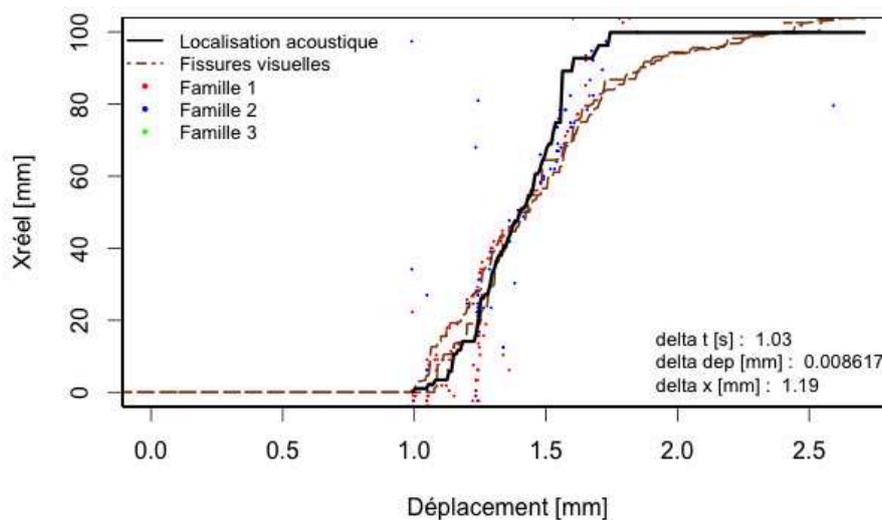


FIGURE 4.29: Eprouvette H1, capteurs 3-4

Sur la figure 4.29, nous observons la même chose que pour l'éprouvette S1 à ceci près que le nombre d'individus classés est moindre. Cette différence sur le nombre d'individus entre les éprouvettes sèches et humides est visible dans les tableaux 4.5 et 4.8.

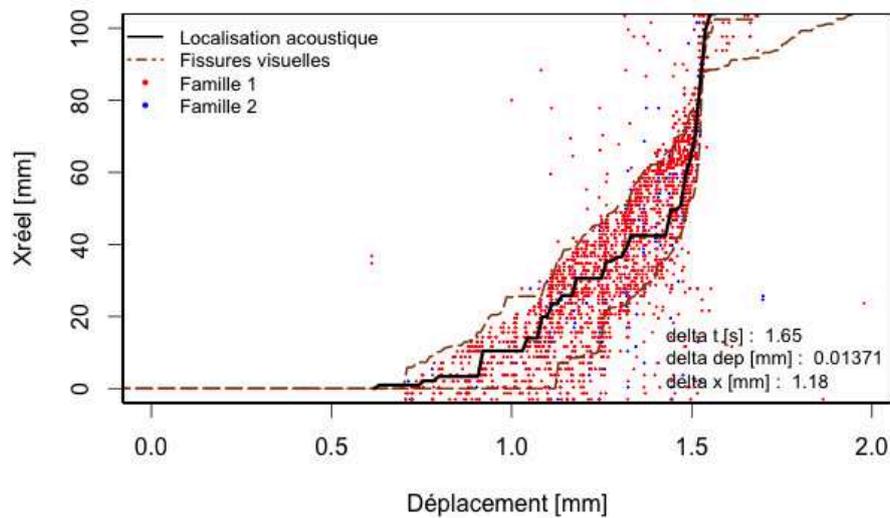


FIGURE 4.30: Epreuve S2 - capteurs 3-4

Sur la figure 4.30, deux familles ont été identifiées. La famille 1 correspond à de la rupture de fibre et la famille 2 à de la fissuration matricielle. Les événements identifiés et classés sont enveloppés par les fissures obtenues visuellement.

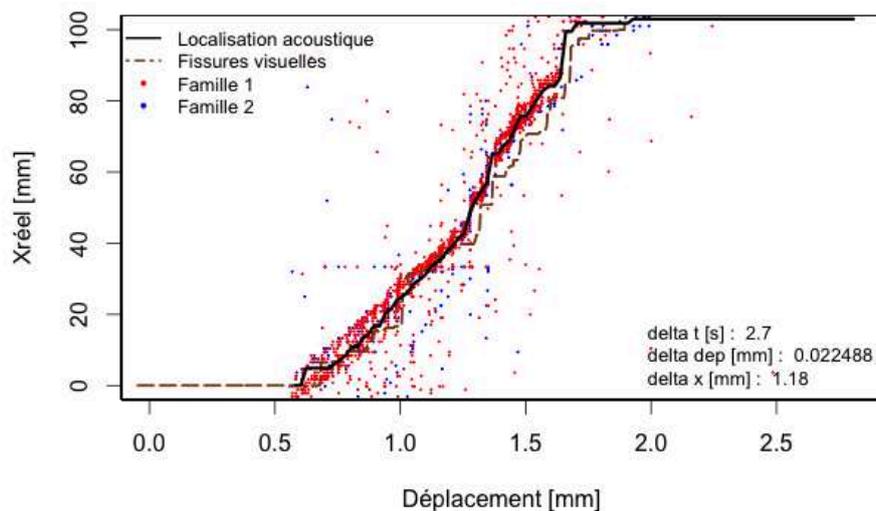


FIGURE 4.31: Epreuve S3 - capteurs 1-2

Dans le cas de l'éprouvette S3 (figure 4.31), cas de figure où finalement il y a peu de différence entre la fissure obtenue visuellement et celle obtenue par émission acoustique, nous pouvons voir que les évènements identifiés (toujours les deux mêmes familles) sont regroupés sur une petite zone autour de la pointe de fissure acoustique. Compte tenu de la discrétisation spatiale (Δx de 1,18 [mm]), la largeur de cette bande correspond, peu ou prou, à l'incertitude de localisation due à notre algorithme de détermination de la pointe de fissure acoustique.

4.2 Analyse statistique

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, nous pouvons effectuer une analyse statistique des données pour en déduire d'éventuelles corrélations. De nouvelles données ont été ajoutées : le nombre d'évènements traités par CAH et leur répartition dans chacune des familles constituées. Les résultats sont consignés dans la figure 4.32.

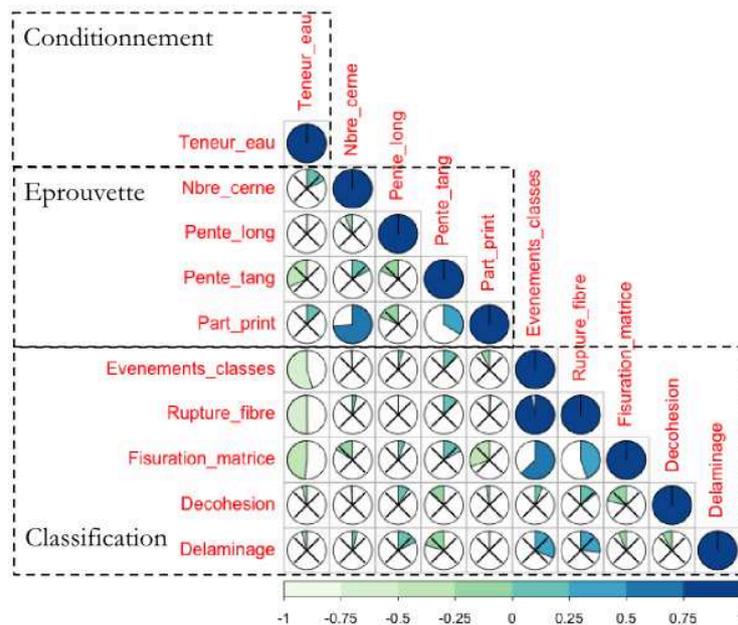


FIGURE 4.32: Corrélogramme sur les individus de chaque famille obtenue

Sur la base de nos essais, on peut affirmer de manière significative, pour la classification, que :

- . Le nombre d'évènements « classés » (Evenements_classes) est corrélé négativement à la teneur en eau. Nous avons là une preuve que l'EA est très sensible à l'état hydrique du matériau.
- . Le nombre d'évènements « classés » dans les ruptures de fibres (Rupture_fibre) et la

fissuration matricielle (Fissuration_matrice) sont corrélés négativement à la teneur en eau.

Malgré l'apparence significativité du résultat, on se doit de faire attention au fait qu'avec l'humidité le système d'EA enregistre moins facilement les salves et les évènements acoustiques. Il suffit pour cela de regarder la corrélation entre le nombre d'évènements dans les ruptures de fibres (Rupture_fibre) et la fissuration matricielle (Fissuration_matrice) avec le nombre d'évènements « classés » (Evenements_classes). Cette corrélation est positive, très élevée et significative. Il y a moins d'évènements dans chaque famille parce qu'il y a moins d'évènements enregistrés.

Une autre façon de voir l'influence de certains paramètres est d'analyser l'évolution de l'importance de la part de chacune des familles. Les résultats sont consignés dans la figure 4.33.

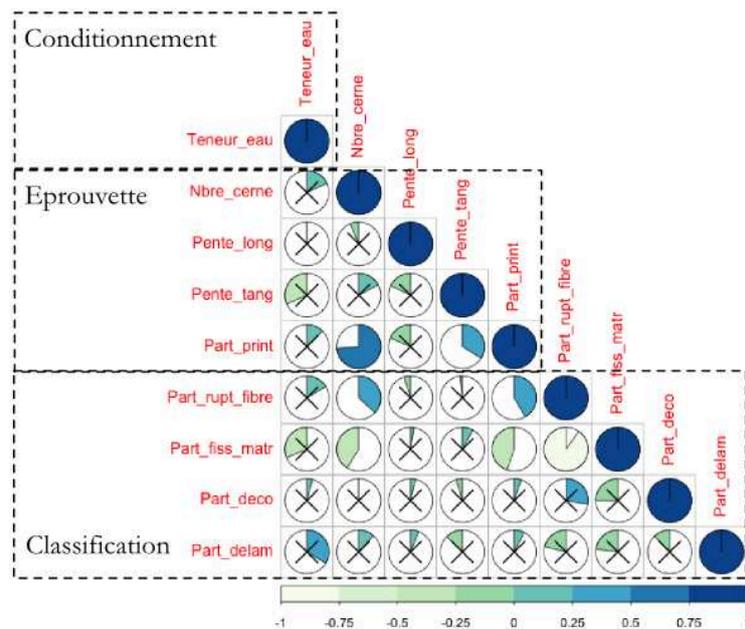


FIGURE 4.33: Corrélogramme sur la part de chaque famille obtenue

Sur la base de nos essais, on peut affirmer de manière significative, pour la classification, que :

- La part des évènements « classés » dans les ruptures de fibres (Part_rupture_fibre) est corrélée positivement avec le nombre de cernes présents dans chaque demi éprouvette.
- La part des évènements « classés » dans la fissuration matricielle (Part_fiss_matr) est corrélée avec le nombre de cernes présents dans chaque demi éprouvette.

Par contre, les corrélations avec la teneur en eau ne semblent pas significatives.

5 Conclusion

L'identification des mécanismes de ruine dans le bois n'est pas aisée compte tenu de son caractère naturel et de sa structure orthotrope. Afin de tenter d'identifier ces mécanismes, nous avons utilisé l'imagerie (MEB) pour les visualiser (les identifier) et les outils statistiques pour les caractériser et les quantifier.

L'utilisation du MEB nous a permis de voir qu'il existait plusieurs types de ruine et qu'ils étaient tous présents sur les faciès de rupture examinés, et ce, quel que soit le conditionnement considéré. A l'aide de l'outil statistique appliqué à des éprouvettes chargées différemment (traction, cisaillement, flexion), plusieurs familles ont été identifiées. Ensuite, ce même outil a été appliqué à l'ensemble de nos éprouvettes.

A l'aide des caractéristiques de ces familles et de la forme d'onde de leurs individus les plus représentatifs, par analogie avec les résultats obtenus sur les matériaux composites, un mécanisme de rupture a pu être associé à chacune d'elles.

Si les résultats obtenus semblent prometteurs, les méthodes utilisées pour l'identification des mécanismes de ruine sont basées sur des outils statistiques. Il ne s'agit que de statistique. Il convient donc d'être prudent sur les conclusions qui peuvent être retirées des résultats qu'elles fournissent.

De plus, comme nous avons pu le voir sur nos corrélogrammes, un certain nombre de corrélations sont non significatives. En réalisant un plus grand nombre d'essais, nous arriverions, dans certain cas, à trancher sur certaines significativités proches de 5%.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de ce travail de thèse a été d'envisager les apports de l'EA en tant qu'outil de diagnostic et de surveillance des structures et des ouvrages en bois. Nous avons appliqué cet outil et développé des méthodes de suivi de la fissuration. Si l'objectif affiché est l'utilisation de l'EA pour de la surveillance in-situ, un passage par des manipulations en laboratoire a été nécessaire pour valider les méthodes mises en œuvre. Des essais de chargement à déplacement imposé ont été réalisés sur des éprouvettes de Douglas (DCB à inertie constante) soumises à un chargement en mode I, pour deux teneurs en eaux distinctes. En parallèle du système d'acquisition acoustique, un système d'acquisition d'images a été utilisé pour suivre l'évolution de la fissuration sur les faces principales des éprouvettes.

Dans un premier temps, nous avons constaté que la cinétique de fissuration était corrélée à l'énergie acoustique des signaux enregistrés. Une écoute globale, sans filtration des données, fournit une indication sur l'évolution de l'endommagement d'une structure. De la même manière, nous avons pu voir qu'il existait une bonne corrélation entre l'énergie acoustique des signaux enregistrés et l'énergie mécanique dissipée.

Quelques questions restent en suspens :

- . Quelle est l'origine de cette corrélation ? Nous avons supposé en première approximation que toute l'énergie dissipée était impliquée dans la fissuration de l'éprouvette. Il semblerait qu'il y ait autre chose.
- . Comment peut-on expliquer le rapport dans les unités entre l'énergie mécanique dissipée ($[mJ]$) et l'énergie acoustique ($[aJ]$) ?

En nous focalisant sur les événements acoustiques, et en choisissant de positionner les capteurs sur le chant des éprouvettes, nous avons pu montrer qu'il était possible de localiser, avec une bonne précision, les événements le long du chemin de fissuration. Cette localisation a été rendue possible grâce à l'emploi de courbes de correction. Une étude sur des matériaux homogènes (aluminium et pvc) et hétérogènes (Douglas) a montré que ces courbes reflétaient, pour une grande part, la géométrie de l'éprouvette, et, dans une moindre mesure, l'orthotropie du matériaux.

Les courbes de correction d'amplitude nous ont permis de remonter jusqu'à l'amplitude à la source. Cette correction englobe les effets d'atténuation dus au matériau ainsi qu'à la chaîne d'acquisition du système d'EA (couplage, réponse des capteurs, etc.). Toutefois, la connaissance des effets de chacun des éléments de la chaîne d'acquisition ne pourra se faire que par leur modélisation. De cette façon nous pourrions déterminer la fonction de transfert qui permet de passer du signal enregistré au signal source.

Par la suite, nous avons utilisé la méthode de détection de pointe de fissure par EA sur

une DCB à inertie variable lors d'un essai de fluage. Il est apparu qu'elle était tout à fait transposable à d'autres géométries d'éprouvettes sur des durées de mesure importants. Cela ouvre des perspectives à plusieurs niveaux :

- . A l'échelle du laboratoire, l'EA peut fournir des données complémentaires dans l'étude des zones cohésives.
- . A l'échelle d'une structure, l'EA peut répondre à un besoin de surveillance d'ouvrage (essais de fluage, surveillance de longue durée).

Dans un deuxième temps, en effectuant un parallèle avec les méthodes développées dans les matériaux composites, le bois pouvant y être assimilé par certains aspects, nous avons pu, par une utilisation conjointe des outils statistiques, de l'imagerie électronique (MEB) et de l'analyse des formes d'ondes, identifier les mécanismes de ruine présents lors des essais.

Après un travail de filtration des données obtenues sur des essais à mode de ruine choisi (traction, flexion et cisaillement), quatre familles d'évènements ont pu être mis en évidence. Par l'étude de leurs formes d'ondes respectives, ces familles ont pu être associées à de la rupture de fibre, de la fissuration de matrice, de la décohésion et du délaminage telles qu'on les retrouve dans les matériaux composites. L'étude au MEB a confirmé une multitude de mécanismes présents sur les plans de fissuration des éprouvettes et la vraisemblance des résultats obtenus. D'un point de vue quantitatif, deux mécanismes de ruine principaux ressortent : la rupture de fibres et la fissuration matricielle. Il s'agit là d'indicateurs dont l'évolution peut constituer un indicateur, précurseur à la ruine d'un ouvrage.

Plusieurs développements peuvent être donnés à ces résultats :

- . Effectuer une classification supervisée grâce au système d'EA.
- . Utiliser les deux principales familles comme des indicateurs d'un endommagement en cours sur des ouvrages réels. De cette façon, l'EA aurait un rôle à jouer au sein des outils de surveillance.
- . Permettre dans le cas de la mécanique de la rupture d'étudier à l'échelle du laboratoire le phénomène de pontage, la zone d'élaboration.
- . D'une manière plus générale, la compréhension des mécanismes d'endommagement passera aussi nécessairement par une modélisation et par une meilleure compréhension de la fonction de transfert entre la source d'EA et le capteur. De cette façon, nous serons plus à même de quantifier les modifications apportées par le bois sur les ondes sonores et trouver de nouveaux descripteurs pour identifier les mécanismes d'endommagement en direct.

Il reste toutefois un verrou technologique à surmonter avant que l'EA ne s'impose comme un outil de choix dans la surveillance des ouvrages : l'autonomie du système d'acquisition. En effet, l'EA est un outil gourmand en ressources (électrique, mémoire, processeur pour le traitement des données, etc.). Selon la stratégie de surveillance adoptée, plusieurs de ces points devront être pris en compte dans le choix du matériel à utiliser. Et ainsi pourrons-nous considérer que *l'émission acoustique nous permettra d'entrevoir ce que l'imagerie ne saurait nous faire entendre.*

Annexes

Annexe A

Emission acoustique - Rappels généraux

1 Définitions normalisées

Selon la norme NF A 09-350, l'EA est définie comme un phénomène de création d'ondes élastiques transitoires, au sein d'un matériau soumis à des sollicitations (Nechad, 2004; Deschanel, 2005; Sibil, 2011; Baensch, 2015). Par analogie, on compare souvent cette libération d'énergie à celle que l'on rencontre lors d'un séisme (Roget, 1990), libération d'énergie qui est la signature d'une activité terrestre et d'une libération d'une accumulation de contrainte (et/ou d'une rupture) au sein de l'écorce terrestre. Il n'est donc pas étrange que la technique de l'EA se soit développée avec la sismologie.

Selon l'ASTM International (E 1316), l'EA est définie comme « une famille de phénomènes par lesquels des ondes élastiques transitoires sont produites par une rapide libération d'énergie provenant de sources localisées à l'intérieur d'un matériau, et par extension les ondes élastiques transitoires ainsi générées ».

2 Bref historique

Ainsi, à l'aide de la sismogénèse, discipline qui étudie les tremblements de terre, se sont développées des techniques de localisation de la nucléation (aussi connue sous le nom de foyer ou hypocentre). Ces techniques ont contribué au développement d'algorithmes de calcul que l'on retrouve maintenant dans les logiciels d'émission acoustique. La compréhension de la source sismique doit permettre de pouvoir, un jour, prévoir l'apparition des séismes. L'utilisation de l'EA dans la mécanique de la rupture et de l'endommagement

relève du même désir de pouvoir caractériser, quantifier et aussi prévoir l'endommagement et la rupture.

A l'aide de la sismologie globale, science qui étudie la structure globale de la Terre, s'est développée toute une partie de l'étude des ondes produites par les séismes. Sur de longues distances, celles-ci peuvent être enregistrées et analysées. C'est ainsi que s'est développée l'étude des ondes de volume (primaires et secondaires : ondes P, dites de compression et ondes S, dites de cisaillement). Les ondes de volumes ne sont pas les seules à être présentes lors d'un tremblement de terre : il y a aussi des ondes de surfaces. Ces ondes, de par leurs caractéristiques, sont utiles pour l'analyse et la compréhension de la structure de la Terre dans les premières centaines de kilomètres de profondeur.

L'histoire de l'émission acoustique remonte assez loin (le « cri de l'étain » en est un exemple). Mais c'est au siècle dernier que s'est réellement développée cette technique (Roget, 1990). Les premières applications techniques datent de 1964 avec le contrôle des réservoirs des fusées Polaris. En France, c'est dans les années 70 que sont réalisés, pour le compte de la Marine Nationale, des contrôles des capacités de pression. A la fin des années 70, la technique de l'émission acoustique est homologuée par l'Autorité de Sécurité Nucléaire pour la surveillance de l'étanchéité du circuit primaire des centrales nucléaires françaises lors des épreuves hydrauliques réglementaires.

A partir des années 80, la technique de l'EA a été appliquée aux matériaux métalliques et aux matériaux composites. Cette technique s'est ensuite étendue à d'autres domaines (Roget, 1990; Sibil, 2011) :

- . L'investigation des matériaux.
- . La surveillance des réservoirs sous pression et en service.
- . La surveillance des matériaux lors de la fabrication et de l'usinage.
- . La surveillance des machines tournantes.
- . Le contrôle et l'évaluation des matériaux composites.

C'est sur ce dernier point que nous avons fondé notre étude, qui par analogie, va nous permettre de nous intéresser à ce qui se passe à l'intérieur de nos éprouvettes en bois, lors d'essais de chargement.

3 Un outil pour le Contrôle Non Destructif

Le phénomène d'EA correspond à une libération d'énergie qui va se manifester sous forme d'une onde acoustique élastique transitoire dont la source se trouve au sein d'un

matériau. Ceci est la caractérisation d'un processus évolutif au sein du dit matériau. Cette activité est la signature d'une modification structurale.

L'ensemble des ondes sonores concernées par l'émission acoustique s'étend dans une plage de fréquences allant de 50 [kHz] à 5 [MHz]. Cette plage de fréquences correspond au domaine des ondes ultrasonores. Ce phénomène vibratoire est utilisé pour suivre les propagations des défauts dans des structures soumises à des contraintes mécaniques, chimiques, thermiques, hydriques ou d'un autre type. C'est grâce à l'émission acoustique que peuvent maintenant être détectées et parfois localisées un grand nombre de dégradations affectant les matériaux et structures :

- . La propagation de fissures (sous forme de salves discrètes, de courte durée).
- . Les déformations plastiques.
- . La corrosion.
- . Les fuites (l'émission est alors généralement de type continu).

Une des principales limitations du Contrôle Non Destructif (CND) par EA vient du fait qu'il s'agit d'une technique passive. Elle n'est donc sensible qu'aux processus qui sont actifs lors des mesures et essais. Certaines modifications de structures ne sont donc pas forcément décelables par cette méthode ([Ativitavas, 2002](#)).

Nous distinguerons deux modes d'acquisition des données en émission acoustique : l'acquisition continue et l'acquisition discrète par salves (hits).

L'acquisition continue enregistre des signaux provenant d'une multitude de sources. Ces sources sonores prenant naissance en des lieux différents mais parfois à des instants très proches les uns des autres, il arrive que le signal devienne inexploitable : les signaux sont superposés. Ce type d'émission est associé, en général, aux mécanismes accompagnant la déformation plastique des matériaux métalliques et a été utilisée pour mieux comprendre les mécanismes de dislocation ([Roget, 1990](#)). Elle n'est plus utilisée en milieu industriel. De plus, le signal reçu est perturbé par le bruit de fond généré par l'instrumentation elle même. Dans le cas d'une émission acoustique discrète, ce sont des signaux transitoires qui sont enregistrés. Ce type d'émission a pour origine des mécanismes très énergétiques comme les phénomènes de propagation de fissure conduisant à la rupture.

Dans le secteur industriel, nous retrouvons une utilisation de l'EA dans des domaines aussi divers que :

- . Le contrôle des structures aéronautiques en aluminium ou composites : voilure, dérive, réservoirs haute pression en composite.
- . La surveillance des chaufferies de sous-marins nucléaires et des réacteurs nucléaires (étanchéité des tuyauteries sous pression).
- . Le contrôle des bâtiments navals : contrôle des embarcations en composite.

- . La surveillance de structures offshore : détection de la corrosion dans les pétroliers ou méthanières.
- . Le suivi de la fissuration dans le béton, la détection de la rupture des câbles dans les ponts à haubans,...

Les signaux enregistrés de cette façon ont les caractéristiques suivantes (Roget, 1990) :

- . Signaux transitoires de courte durée (environ 100 [μs]).
- . Aléatoire dans le temps.
- . Faible niveau d'énergie (de 10^{-11} à 10^{-4} [J]).
- . D'amplitude faible (de 10^{-10} à 10^{-6} [m]).
- . D'un contenu fréquentiel variant de quelques kilohertz à plusieurs mégahertz.

4 Terminologies / Nomenclature

Dans le cas où chaque salve est la signature d'un phénomène physique au sein du matériau, il convient de s'intéresser aux paramètres qui vont permettre une discrétisation et une caractérisation de chacune d'elle. On distinguera les descripteurs fréquentiels (fréquence de pic, fréquence moyenne, ..) et les descripteurs temporels (temps d'arrivée, temps de montée, amplitude, nombre de coups au pic, énergie, etc.). Une partie de ces descripteurs est reprise dans la norme NF A 09-350.

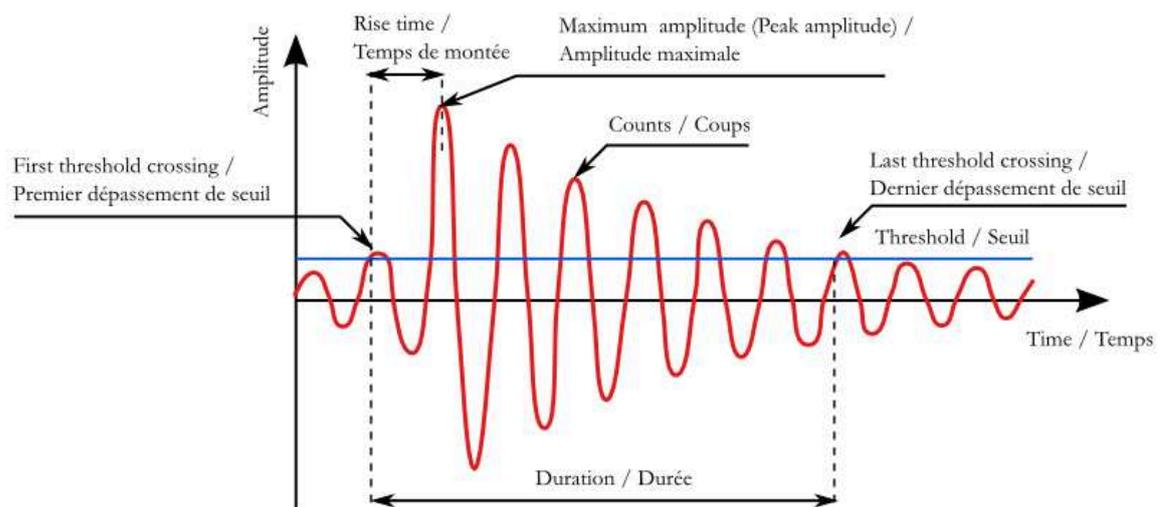


FIGURE A1: Descripteurs des évènements acoustiques

Une salve est définie par plusieurs paramètres que l'on peut retrouver dans le schéma ci-dessus (figure A1) et dont les définitions sont les suivantes :

- . **Le seuil** : niveau, généralement exprimé en [dB], à partir duquel une vibration ne peut être considérée comme du bruit (ou une perturbation) et doit être prise en compte.
- . **La durée de salve** : exprimée en [μs], il s'agit du temps qui sépare le premier dépassement de seuil du dernier dépassement de seuil d'une salve.
- . **Le nombre de coups** : il s'agit du nombre de fois où le signal dépasse le seuil sur toute sa durée.
- . **L'amplitude maximale** : exprimée en décibel [dB] pour plus de commodité, elle est calculée à l'aide de la formule (A.1).
- . **L'énergie du signal** : elle correspond à l'aire située sous la courbe (figure A2 et (A.2)).
- . **Le temps de montée du signal** : il correspond à la durée, exprimée en [μs], entre le premier dépassement de seuil et le pic d'amplitude du signal.
- . **Le nombre de coups au pic** : il correspond au nombre de franchissement de seuil par le signal entre le premier dépassement de seuil et l'amplitude maximale.
- . **La fréquence moyenne** : elle correspond au nombre de coups d'une salve divisée par sa durée.

$$\text{Amplitude [dB]} = 20 \cdot \log \left(\frac{U}{1\mu V} \right) - \text{gain du préamplificateur} \quad (\text{A.1})$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt \quad (\text{A.2})$$

Dans la formule (A.2), $V(t)$ représente la tension de sortie du capteur en fonction du temps.

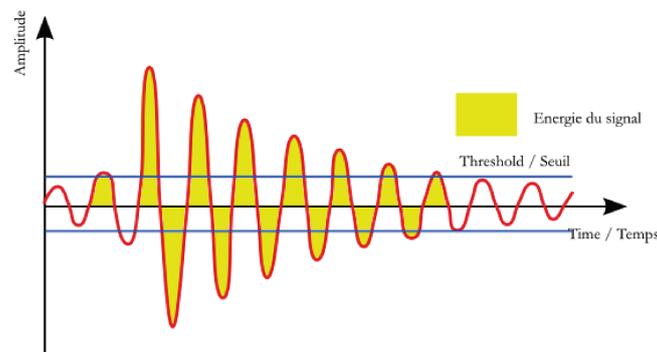


FIGURE A2: Estimation de l'énergie acoustique

Afin d'obtenir et de pouvoir exploiter tous ces paramètres, il faut tenir compte d'un certain nombre de paramètres de réglages propres au système d'acquisition acoustique. Nous retiendrons, d'après l'ASTM STP 505 et l'ASTM STP 571 que les paramètres à considérer dans le cadre de l'émission acoustique sont, en plus de ceux cités précédemment :

- . **Le mode d'émission** : elle peut être continue ou discrète.
- . **Un événement acoustique** : définit la manifestation acoustique d'un changement rapide apparu dans un matériau.
- . **L'activité cumulée** : correspond à la somme, pour un instant donné, des salves ou des événements précédents.
- . **La durée d'un événement** : il s'agit du temps pendant lequel l'amplitude d'un événement est au-dessus du seuil de détection choisi.
- . **Le nombre de pics** durant la durée d'un l'événement.
- . **L'amplitude** la plus élevée enregistrée sur les pics – elle est souvent donnée en unité arbitraire.
- . **Les fréquences émises dans chaque forme d'onde** : un traitement du signal reçu par la transformée de Fourier (FFT : Fast Fourier Transform), permet de discrétiser des phénomènes entre eux.
- . **L'énergie cumulée** de chaque source acoustique.
- . **L'énergie du signal** : exprimée dans une unité conforme au système d'unité international (A.3).

$$E = \int_t^{t+\tau} \frac{V^2(t)}{R} dt \quad (\text{A.3})$$

- . **La densité d'énergie** : il s'agit de la somme des énergies émises par chaque événement observé, par unité de temps.
- . **Le point de « décollage »** sur la courbe représentant une nette évolution de la contrainte (ou la déformation) en fonction de l'énergie acoustique cumulée.
- . **la tension efficace – aussi appelé RMS (Root Mean Square)**. Il s'agit d'une forme de l'expression de l'énergie d'un signal (A.4).

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt} \quad (\text{A.4})$$

- . **La tension moyenne** (A.5)

$$V_m(t) = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (\text{A.5})$$

5 Traitement du signal

Lorsqu'un matériau est soumis à des sollicitations, une partie du matériau dissipe de l'énergie sous forme de micro déplacements, de ruptures, de frottements dont une partie se retrouve sous la forme d'ondes élastiques. Quels que soient les matériaux étudiés, nous pouvons constater que l'énergie acoustique enregistrée (de l'ordre de l'atto ou du femto Joule) ne représente qu'une faible part de l'énergie mécanique (quelques Joules) (Huguet, 2002; Nechad, 2004).

Dans le cas d'une émission acoustique continue, nous sommes en présence de salves très nombreuses qui se chevauchent. Généralement, cela se traduit par une augmentation du bruit de fond (figure A3). Dans le cadre de notre étude et de nos essais, nous allons nous intéresser à l'émission acoustique discrète et considérer que chaque événement acoustique est le signe d'un endommagement du matériau (initiation et propagation de fissure, pontage de fibre, etc.).

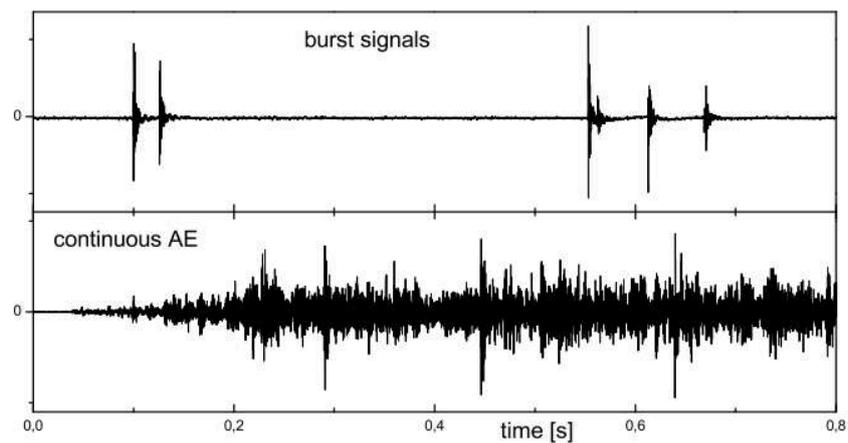


FIGURE A3: Exemples de signaux discrets et d'une activité acoustique continue

Annexe B

Émission acoustique - Le matériel

Si l'acquisition des signaux d'EA ne nécessite, en principe, que l'emploi d'un capteur (piézomètre par exemple) et d'un oscilloscope, il est apparu nécessaire au fil des progrès technologiques de doter la chaîne d'acquisition d'appareillages plus complexes (figure B1) permettant l'enregistrement simultané de plusieurs sources vibratoires prétraitées.

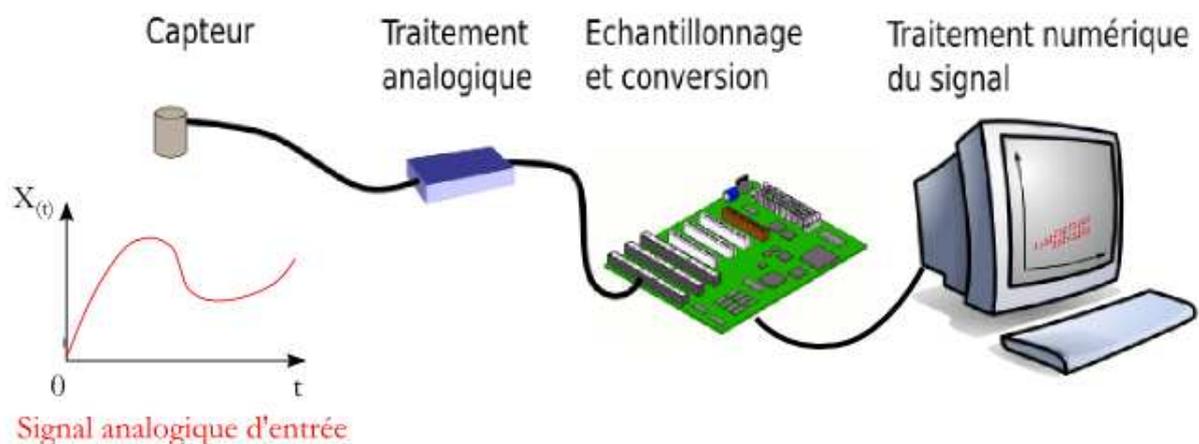


FIGURE B1: Chaîne d'acquisition pour l'EA

1 Les capteurs

Le capteur est, selon la norme NF A 09-350, un dispositif permettant de convertir une grandeur vibratoire, caractéristique de l'onde émise par émission acoustique, en grandeur électrique (une tension dans le cas qui nous occupe). Les capteurs (figure B2) acoustiques sont des dispositifs convertissant une sollicitation vibratoire ou sa répercussion acoustique (des ondes sonores) en signal électrique. Selon le milieu dans lequel la vibration se

propage (gaz, solide ou liquide), et le type d'application désirée (médecine, océanographie, musique, architecture, sismologie, science des matériaux), la technologie diffère.

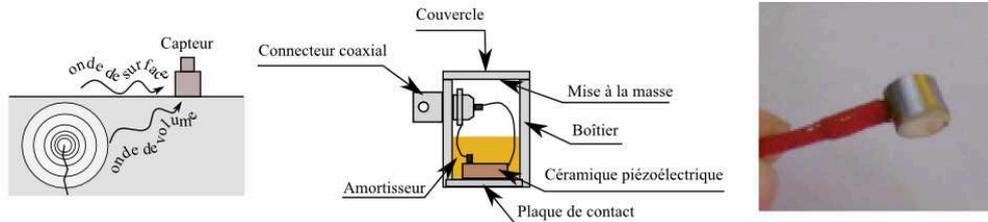


FIGURE B2: Capteur piézoélectrique - principe et cliché d'un nano30

Les capteurs pourront être classés selon leur technologie (type de transducteur) mais aussi selon la manière dont les variations de pression sont mesurées (pression ou gradient de pression), selon leur directivité et leur réponse en fréquence (large bande ou à amplification).

Si nous nous tenons à leur technologie, nous aurons le choix entre :

- . **Les transducteurs électrodynamiques** : une variation de pression met une membrane en mouvement dans un champ magnétique. Un courant induit, sortant du capteur, est généré et caractérise cette variation de pression.
- . **les transducteurs électrostatiques** : une variation de pression met une membrane en mouvement et induit une variation de capacité d'un condensateur placé derrière.
- . **des transducteurs piézoélectriques** : une variation de pression en surface du capteur induit une contrainte sur une céramique qui se polarise.

La plupart des oscillateurs utilisés dans le CND et en émission acoustique sont fondés sur l'effet piézo-électrique. Si le cristal le plus utilisé est du PZT (zirconite-titane de plomb) nous trouvons aussi du PMN (métaniobate de plomb) ou du PVDF (Polyvinylidène fluoride). Ce type de capteur permet de détecter des déplacements de l'ordre de 10^{-10} [m].

D'après (Roget, 1990), le capteur idéal devrait permettre de :

- . Mesurer une grandeur physique bien définie avec une grande sensibilité (ici une vibration).
- . Présenter une fonction de transfert connue, simple, reproductible et constante, et ce, dans toutes les directions ou angles d'incidence possibles. Ainsi, il devrait être possible de déduire du signal de sortie du capteur les caractéristiques en fréquence et amplitude du signal source – caractéristique du phénomène physique étudié.
- . Être facile à mettre en œuvre, robuste et peu coûteux.

Si dans la pratique un tel capteur n'existe pas, il convient de faire des compromis adaptés au phénomène étudié, au processus expérimental et au matériau.

D'une manière générale, il existe deux grandes familles de capteurs piézoélectriques pour l'émission acoustique : les capteurs résonnants et les capteurs large bande. Les premiers ont une réponse amplifiée pour une fréquence (ou une bande de fréquence) donnée. Le signal est modifié : amplifié dans la bande passante et atténué hors de la bande passante. Les seconds ont l'avantage de ne pas modifier la forme réelle du signal mais il n'y a pas de zone préférentielle de sensibilité.

Le choix d'un type de capteur peut être dicté par le type d'analyse et de recherche effectuée. Si l'on souhaite caractériser le contenu fréquentiel d'un signal (d'une salve) ou un mode de propagation (analyse modale), il est nécessaire d'utiliser un capteur large bande qui modifiera peu le signal reçu. Par contre, si l'on s'intéresse à des sources acoustiques bien précises et clairement identifiées par leur contenu spectral, il peut être utile d'utiliser plusieurs capteurs résonnants. Dans ce dernier cas, il ne sera possible de prendre en compte que des paramètres comme l'amplitude ou la durée des signaux (Eitzen and Wadley, 1984; Sibil, 2011).

2 Le montage et le couplage des capteurs

D'après la norme ASTM E-650, il est nécessaire de s'assurer du bon montage des capteurs et du matériel d'acquisition. Il en va de la reproductibilité et de la fiabilité de l'expérience.

La céramique d'un capteur ayant des propriétés piézoélectriques, elle est protégée de l'extérieur par une plaque de contact. Pour que l'onde puisse être enregistrée par le capteur, il est nécessaire d'utiliser un couplant qui assurera un contact et la transmission de l'onde acoustique à celui-ci. Le choix d'un couplant se fait en tenant compte de l'impédance acoustique des matériaux (Brancheriau, 2013) qui doivent être mis en contact les uns avec les autres.

En effet, lorsqu'une onde acoustique est émise, celle-ci, au cours de son trajet dans le matériau, peut être dispersée, atténuée, réfléchi. Dans un milieu dispersif (le bois en est un), la vitesse de phase dépend de la longueur d'ondes. Ainsi, des ondes initialement regroupées en un même point à un instant donné vont se propager à des vitesses différentes (figure B3). Dans un tel cas, on ne peut parler de vitesse de propagation d'onde que pour une fréquence donnée. Une vitesse de phase correspond à une fréquence moyenne du paquet d'ondes. Si le milieu est peu dispersif et la largeur spectrale du signal peu importante, nous pourrions alors considérer que le maximum se propage, comme le paquet (l'enveloppe) à la même vitesse de groupe.

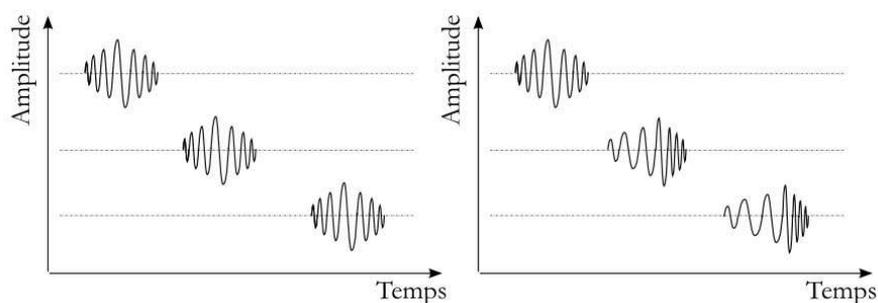


FIGURE B3: Propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu non dispersif (à gauche) et dispersif (à droite)

Dans le cas où deux milieux sont séparés par une interface plane, la nature des ondes réfléchies et transmises dépend de la nature de l'onde incidente et des milieux.

Dans le cas d'une onde sous incidence normale (figure B4), nous obtenons les coefficients de réflexion et de transmission en énergie suivants (B.1 et B.2) :

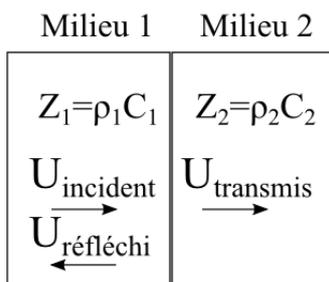


FIGURE B4: Réflexion et transmission sous incidence normale

$$R = \frac{U_r^2}{U_i^2} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (\text{B.1})$$

$$T = \frac{U_t^2}{U_i^2} = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (\text{B.2})$$

Avec :

- . U : amplitude de l'onde.
- . ρ : masse volumique du corps.
- . C : célérité dans le matériau.
- . Z : impédance acoustique.

Si l'on souhaite avoir une transmission totale de l'onde acoustique, du milieu 1 au milieu 2, il faut $Z_1 = Z_2$. Dans la réalité, on cherche à avoir les deux impédances les plus proches

l'une de l'autre pour minimiser le phénomène de réflexion. Sur le principe, si n'importe quel fluide peut servir de couplant, il est nécessaire d'en trouver un qui soit compatible avec les ondes que l'on souhaite utiliser et le matériau étudié.

Si le couplant utilisé est un liquide, aucune onde de cisaillement ne sera transmise. Encore faut-il que le matériau étudié ne soit pas sensible à l'eau. Quelques valeurs « usuelles » pour des matériaux courants sont données dans le tableau B1.

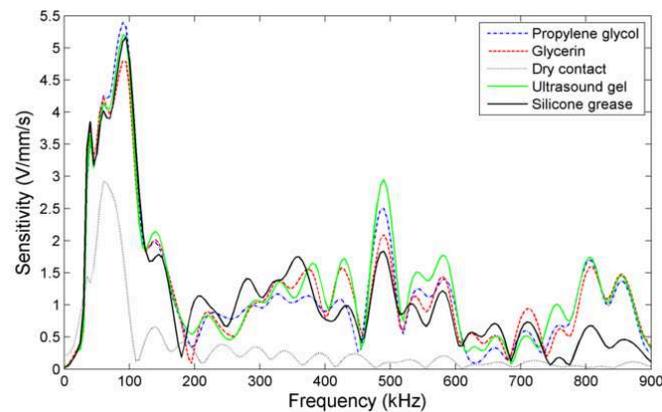
Matériau	Masse volumique [kg/m^3]	Vitesse de propagation [m/s]	Impédance acoustique [Rayleigh]
Air (à 20 [°C])	1,2	340	410
Eau	1 000	1 500	$1,5 \cdot 10^6$
Acier	1 000	5 100	$40 \cdot 10^6$
Bois (sens longitudinal)	500	5 000	$2,5 \cdot 10^6$
Bois (sens tangentiel)	500	1 400	$0,7 \cdot 10^6$
Bois (sens radial)	500	1 100	$0,6 \cdot 10^6$

Tableau B1: Propriétés acoustiques pour plusieurs matériaux usuels d'après ([Brancheriau, 2013](#))

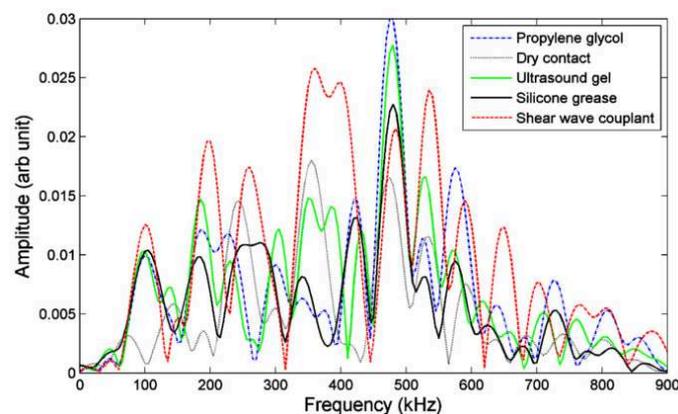
De nombreuses études ont porté sur le couplage entre le capteur et le matériau sur lequel il est appliqué. Ces études avaient pour but de dégager les principales différences entre les différents produits disponibles afin d'optimiser la transmission du signal tout en respectant le matériau étudié.

D'une manière générale d'après ([Vincent, 1987](#); [D'Souza et al., 1989](#); [Dugmore et al., 2002](#); [Culjat et al., 2005](#); [Degallaix, 2007](#); [Gasparoux et al., 2008](#); [Theobald et al., 2008](#)) plusieurs produits peuvent être utilisés pour assurer une transmission du signal acoustique. Cela va de la colle d'amidon, de l'huile de lubrification pour machine, de l'eau (pour les ultrasons lorsque le matériau utilisé le permet) en passant par du miel, du gel à ultrason, des feuilles de cellophane, du gel de silicone, de la glycérine ou des gels plus techniques. Le choix d'un couplant se fera donc en fonction de plusieurs paramètres tels que le prix, l'adéquation au matériau et au processus expérimental. Des couplants visqueux (miel, huiles, ..) seront choisis lorsque l'on souhaite étudier des ondes de cisaillement.

Lorsque l'on étudie la sensibilité de ces couplants sur une large gamme de fréquences pour les ondes de compression, d'après ([Theobald et al., 2008](#)) nous pouvons constater que certains produits donnent des réponses acoustiques somme toute assez proches (figure B5a).



(a) Sensibilité aux ondes de compression



(b) Sensibilité aux ondes de cisaillement

FIGURE B5: Sensibilité du capteur S9208 (Mistras) pour différents couplants d'après (Theobald et al., 2008)

Une différence plus nette apparaît lorsque l'on souhaite étudier les ondes de cisaillement (figure B5b). C'est dans l'enregistrement et l'analyse de ce type d'onde que l'importance de la viscosité des couplants acoustiques intervient.

Concernant le bois, il est à noter qu'il s'agit d'un matériau absorbant. Or, lorsque que le couplant est absorbé par celui-ci, il en modifie les caractéristiques. L'atténuation des ondes acoustiques s'en trouve modifiée. La détermination de la vitesse de propagation des ondes devient donc non reproductible. Il nous faudra donc choisir un couplant adéquat (gel médical par exemple) ou alors utiliser des feuilles de cellophane – pour peu que la surface de contact soit bien lisse pour assurer un contact parfait.

Dans les travaux de (Bucur, 2006), des essais ont été effectués pour quantifier les écarts que l'on pouvait obtenir sur l'évaluation des vitesses longitudinales sur du Pin (tableau B2).

Coupling media	Velocity [m/s]	Notes
Sans couplant	1,000	Tranducers applied to a specimen under low pressure
Cellophane sheets		If surface of the specimen is clean, the reading is
0,03 [mm]	1,029	easy to perform. During experiment, integrity of sheets
0,02 [mm]	973	must be verified
Mineral grease	1,004	Grease could penetrate specimen, easy handling
Medical gel	1,004	No penetration of specimen, easy handling
Gel SWC Panametrics	1,050	Very good bond, very absorbant by wood.

Tableau B2: Influence du couplant sur l'évaluation de la vitesse de compression dans le sens tangentiel sur du pin à 12% d'humidité relative d'après (Bucur, 2006)

D'autres études ont prouvé que les effets de l'épaisseur pouvaient être négligés pour peu que l'on applique une faible épaisseur de produit.

Pour que l'acquisition puisse se faire dans les meilleures conditions, il est nécessaire que le capteur soit maintenu fermement, sans chasser le couplant. Le capteur doit rester parfaitement immobile. Plusieurs méthodes sont possibles : par compression (en utilisant un système qui va exercer une force sur celui-ci et le plaquer sur l'objet étudié) ou par collage (à l'aide d'un adhésif qui servira lui-même de couplant).

Le choix du système de montage dépendra de nombreux paramètres comme :

- . Le capteur (sa taille, sa sensibilité, sa plage de fréquence).
- . La préparation du support (nettoyage, ...).
- . Le choix du couplant ou de l'adhésif.

Une étude réalisée par (Gonçalves et al., 2011) a montré qu'au-dessus d'une pression de 18 [kPa], la vitesse de propagation des ondes de compression était peu affectée. Par contre, une pression trop faible peut provoquer une atténuation du signal. Quoi qu'il en soit, dans des conditions de montage correctes, les effets du couplant pourront être négligés devant ceux dus au matériau et à l'éprouvette (Bucur, 2006).

3 Les préamplificateurs et les câbles coaxiaux



FIGURE B6: Cliché d'un préamplificateur et du câble coaxial

Les capteurs piézoélectriques délivrent un signal de haute impédance et de faible niveau ($10 [\mu V]$ à $1 [mV]$). Le pré-amplificateur (figure B6) permet d'amplifier le signal. Des filtres (passe-haut et passe-bas) sont parfois disponibles pour conditionner le signal et éviter de saturer celui-ci en bruits parasites.

Généralement l'amplification est linéaire. La tension (B.3) de sortie est proportionnelle à la tension d'entrée. Le gain (B.4) est exprimé en dB.

$$V_0(t) = G \cdot V_i(t) \quad (\text{B.3})$$

$$\text{gain} = 20 \cdot \log G \quad (\text{B.4})$$

Les câbles ont pour fonction de transmettre le signal électrique des capteurs au système d'acquisition. Si leur blindage est leur point fort quant à la qualité de transmission du signal, ils n'en demeurent pas moins fragiles et doivent être manipulés avec précaution.

4 Calibration des capteurs

Tout essai impliquant l'utilisation de l'EA passe par une phase de calibration des capteurs et du système d'acquisition et de la vérification de leur performance. Cela permet de tenir compte des conditions de couplage entre le capteur et le matériau ainsi que du vieillissement éventuel du capteur. Cette calibration est décrite dans la norme ASTM standard E976. Il est possible de procéder de plusieurs façons :

- . Le capteur est en fonctionnement et on teste sa réponse au cours du temps pour noter d'éventuels changements (figure B7a).

- . A l'aide d'un signal source (le cassé de mine (figure B7b), impulsion, générateur de bruit, ... et l'AST (figure B7c)).
- . Les capteurs sont testés sur un matériau témoin, non résonnant (figure B7d).

Même si ces méthodes ne constituent pas en soi des procédures de calibration fiables, elles n'en demeurent pas moins simples et économiques à mettre en œuvre et révélatrices d'éventuels changements dans le montage.

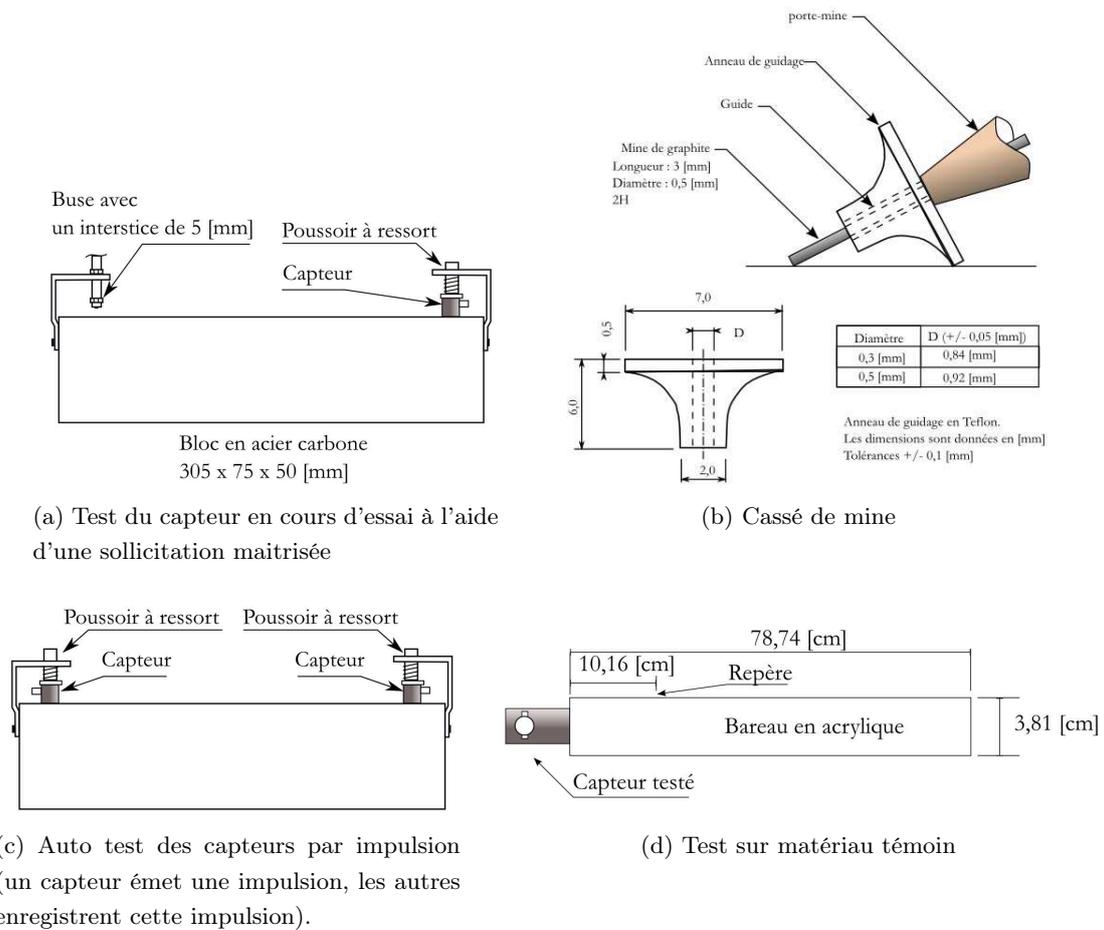


FIGURE B7: Différentes méthodes pour tester et calibrer des capteurs en EA

Annexe C

Emission acoustique - Les réglages

1 Paramètres d'analyse des signaux acoustiques

Description et limitation

Lorsque nous souhaitons analyser les signaux enregistrés, nous avons plusieurs niveaux d'analyse à disposition. Ceux-ci ont été largement décrits dans les travaux de ([Bohse, 2004](#); [Vervish-Fortune, 2009](#); [Sibil, 2011](#)).

L'émission acoustique est un outil fondé sur l'enregistrement et l'étude d'ondes élastiques générées par des mécanismes de microfissuration par exemple. Si dans la plupart des cas, les enregistrements sont effectués sur des plages de fréquences allant de 50 [kHz] à 1 [MHz], il faut avoir à l'esprit que certaines fréquences peuvent être inexploitable. Les basses fréquences sont souvent associées à des bruits, qu'ils soient extérieurs ou électroniques, ou à des phénomènes de résonance induits par le système d'acquisition lui-même. Les hautes fréquences sont, quant à elles, très sensibles à l'atténuation et donc au caractère visqueux du matériau étudié. Ces hautes fréquences ne sont transmises que sur quelques centimètres.

Fonction de transfert : conséquence des imperfections du matériau

Chacun des éléments vus précédemment vont venir modifier le signal qui va être enregistré par le système d'EA. L'ensemble de ces modifications est regroupé sous la notion de fonction de transfert. Selon ([Vervish-Fortune, 2009](#); [Sibil, 2011](#)), plusieurs paramètres peuvent influencer les caractéristiques d'un signal acoustique :

- . Du fait de la géométrie de l'éprouvette (avec la présence ou non de réflexions).
- . Du fait de la nature et de la structure du matériau (absorption, réflexion, diffraction).

Ceux-ci sont représentés sous la forme d'un produit de convolution (C.1).

$$V(t) = S(t) * G(t) * R(t) * H(t) \tag{C.1}$$

Dans cette équation :

- . $S(t)$ représente les caractéristiques physique et géométrique de la source de l'émission acoustique. Il s'agit de l'expression du signal tel que la source le génère.
- . $G(t)$, aussi appelée fonction de Green, représente la fonction de transfert du matériau.
- . $R(t)$ représente la fonction de transfert du capteur. Selon sa technologie, qu'il soit résonnant ou large bande, nous aurons un signal acoustique qui sera, de toute façon transformé, modifié.
- . $H(t)$ représente la fonction de transfert du système d'acquisition (filtre passe-haut, filtre passe-bas, amplificateurs).

D'après (Roget, 1990), d'autres facteurs peuvent influencer l'émissivité d'une structure, la qualité du signal émis. Nous pouvons distinguer parmi ceux-ci, ceux qui sont directement liés au matériau et ceux directement liés aux conditions expérimentales :

- . Les caractéristiques intrinsèques du matériau (structure cristallographique, taille des grains, isotropie, ductilité, comportement visqueux, ...).
- . Les conditions de sollicitation (vitesse de mise en charge, fréquence des cycles, température, humidité, histoire des chargements antérieurs, ...).

Dans les travaux de thèse de (Sause, 2010) une modélisation de cette fonction de transfert a été effectuée pour un matériau composite, montrant l'interaction ou l'importance de chacun des éléments de la chaîne d'acquisition (figure C1).

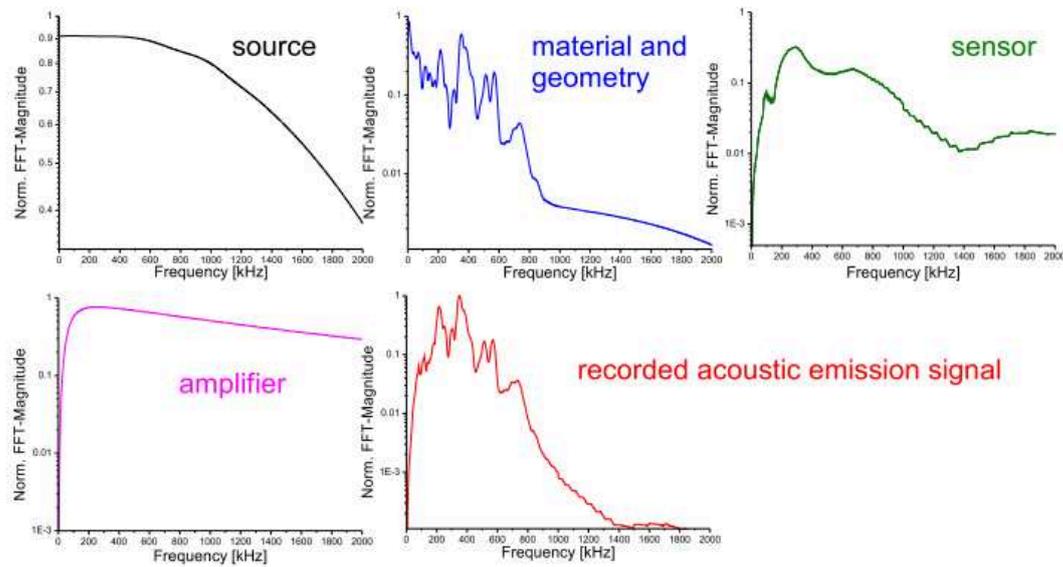
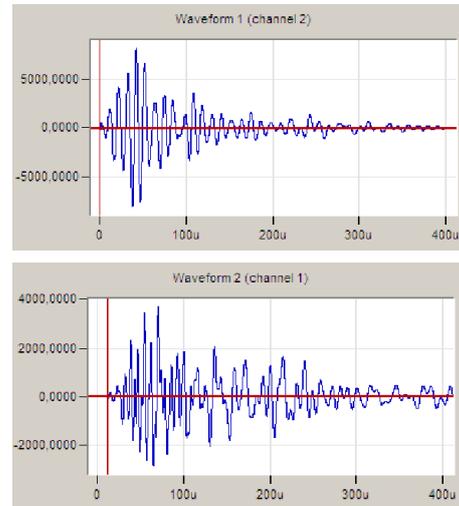
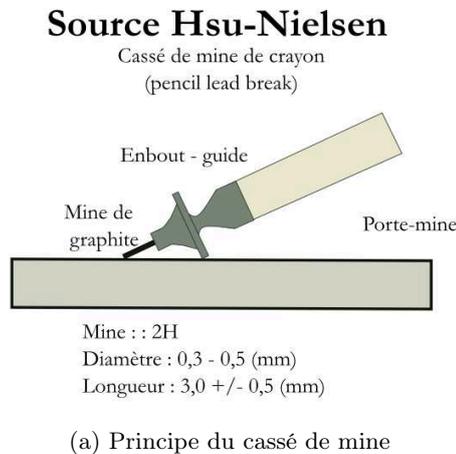


FIGURE C1: Courbes caractéristiques des différentes fonctions de transfert pour un domaine fréquentiel allant de 0 à 2 [MHz] d'après (Sause, 2010)

Il apparaît de manière évidente que, même si chacun des éléments de la chaîne d'acquisition joue un rôle dans la modification du signal source, le signal enregistré est très largement corrélé au matériau étudié ainsi qu'à la géométrie de l'éprouvette utilisée. Dans la suite de ses travaux, il est apparu que le type d'essai pouvait, lui-aussi, influencer le signal enregistré. Une simple utilisation des premiers paramètres acoustiques (amplitude, forme d'onde, . . .) peut donc se révéler insuffisante. Une étude plus approfondie s'impose pour dégager des caractéristiques propres aux mécanismes d'endommagement.

Simulation de rupture par cassé de mine

Avant tout enregistrement il faut s'assurer que tous éléments de la chaîne d'acquisition acoustique soient bien reliés et couplés au matériau étudié. Il existe une méthode qui permet de générer de manière artificielle des vibrations qui sont très proches de celles émises par une source d'émission acoustique naturelle. Cette méthode, figure C2a, connue sous le nom de la méthode du cassé de mine de crayon (pencil lead break) ou méthode de Hsu-Nielsen (du nom de ses inventeurs) (Nielsen, 1989), est utilisée depuis près de 25 ans et permet de générer de manière très localisée, des impulsions plus ou moins répétibles (figure C2b). Son utilisation est référencée dans la norme NF EN 1330-9.



(b) Formes d'ondes enregistrées pour différents cassés de mine

FIGURE C2: Cassé de mine HSU-Nielsen

Orientation du capteur

Un autre paramètre peut venir modifier la forme d'onde du signal enregistré : l'angle entre l'onde incidente et la normale au capteur. L'influence de l'orientation du capteur a été reprise dans les travaux de (Kawamoto et al., 2010). Comme le montre la figure C3, lorsqu'un l'incidence est faible, la forme d'onde enregistrée (c) est différente de celle qui est obtenue dans le cas où l'angle d'incidence est élevé (a) et (b). Ce phénomène n'est qu'une illustration de la Loi de Snell-Descartes, appliquée à l'acoustique. De plus, le fait de positionner un capteur sur une surface large (a) ou étroite (b) modifie le signal reçu. En effet, par le biais de diverses réflexions dues à la géométrie par exemple, le signal enregistré sera une combinaison d'une onde incidente directe et de diverses réflexions.

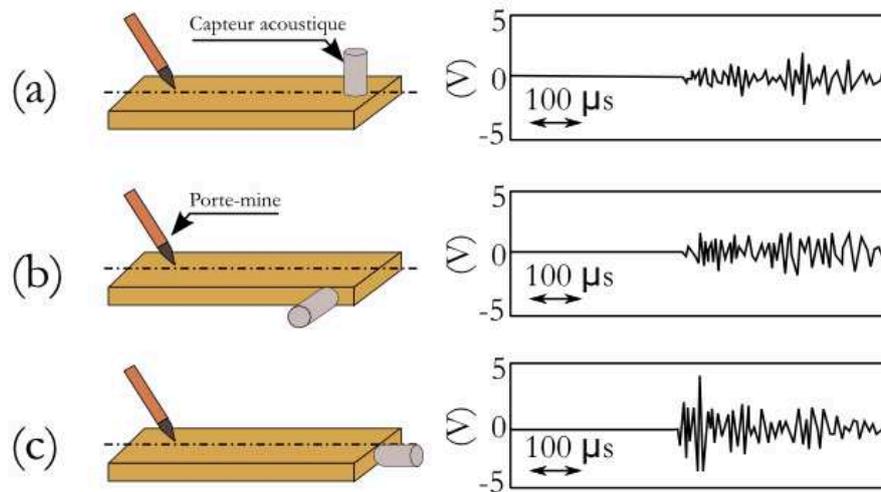


FIGURE C3: Influence de l'alignement des capteurs sur les formes d'onde enregistrées d'après (Kawamoto et al., 2010)

L'analyse temporelle et fréquentielle

La première approche consiste à suivre l'évolution de certains paramètres en fonction du temps. Ces paramètres seront propres au signal acoustique (amplitude, nombre de coups, temps de montée, nombre de salves ou d'événements, énergie), à l'essai en lui-même (force, contrainte, déplacement, ..), ou physique (température, hygrométrie, intensité, tension, ..).

Une analyse plus poussée des signaux peut-être effectuée en effectuant une analyse fréquentielle (transformée de Fourier sur signal discret : FFT) ou par une décomposition en ondelettes.

Ceci dit, cette approche a ses limites. En effet, ces paramètres varient beaucoup d'un essai à l'autre, d'un matériau à l'autre. Ils sont donc difficilement transposables.

L'analyse multiparamétrique

Pour tenter de s'affranchir de ces limitations, il est possible d'effectuer une analyse simultanée de plusieurs paramètres. Ainsi, l'évolution d'un paramètre peut être comparée à celle d'un (représentation 2D) ou deux autres paramètres (représentation 3D). Dans la plupart des essais réalisés, nous constatons une forte corrélation entre l'effort appliqué (ou la contrainte) et le nombre de coups cumulés issus des salves enregistrées (Huguet et al., 2002; Marec et al., 2008; Kumar et al., 2013).

L'analyse statistique

Si nous souhaitons tenter de faire une corrélation avec plusieurs autres paramètres, il va être nécessaire de faire appel à des outils mathématiques (statistique) (Johnson, 2002; Godin et al., 2004; Godin et al., 2005; Marec et al., 2008; Refahi Oskouei et al., 2012; Pomponi and Vinogradov, 2013). Ceci sera d'autant plus facile à faire, qu'il existe maintenant sur le marché de nombreux logiciels (gratuits ou commerciaux) dédiés à l'étude et la classification statistique des données. De cette façon, il devient possible de tenir compte de nombreux paramètres en même temps et de retenir les bons descripteurs (Huguet, 2002).

On rencontre deux méthodes de classification. Une des méthodes, dite supervisée, nécessite un jeu de données déjà identifiées, à savoir que les classes sont déjà connues, permettant de construire le modèle. L'autre méthode, dite non supervisée, ne possède aucun modèle ou classes connus.

2 Détection des sources acoustiques

La détection et la localisation des sources sont des buts de l'émission acoustique. La connaissance de la position d'un évènement acoustique est aussi importante que celle des autres paramètres qui peuvent être déduits des signaux enregistrés par des capteurs. D'une manière générale, la localisation des évènements part du principe que les ondes se déplacent à une vitesse constante dans un matériau. Mais celle-ci est perturbée du fait de la géométrie du matériau étudié. Il faut donc tenir compte des nombreuses réflexions et diffractions qui peuvent avoir lieu ainsi que des différents modes de propagation d'onde et vérifier que les paramètres d'acquisition soient corrects.

Dissociation des modes de propagation

La propagation d'une onde génère des vibrations des particules d'un matériau, reliées entre elles par des liaisons élastiques, et dépend essentiellement des caractéristiques du milieu traversé (Degallaix, 2007). Suivant la nature du matériau, il y a plusieurs types d'ondes à considérer : les ondes de volumes et les ondes de surface. A l'intérieur de ces deux familles il faut considérer deux directions : la direction de propagation de l'onde et la direction de vibration des différentes particules. Les ondes de volume se propagent à l'intérieur du matériau.

Nous rencontrons d'abord les ondes P (ou ondes primaires) que l'on appelle ondes de compression (ou ondes longitudinales). Dans ce cas, les deux directions coïncident : il se produit des différences de pression. Les ondes de compression (figure C4a) sont de loin les ondes les plus rapides. Ce sont elles que l'on enregistre en premier sur les appareils d'acquisition acoustique.

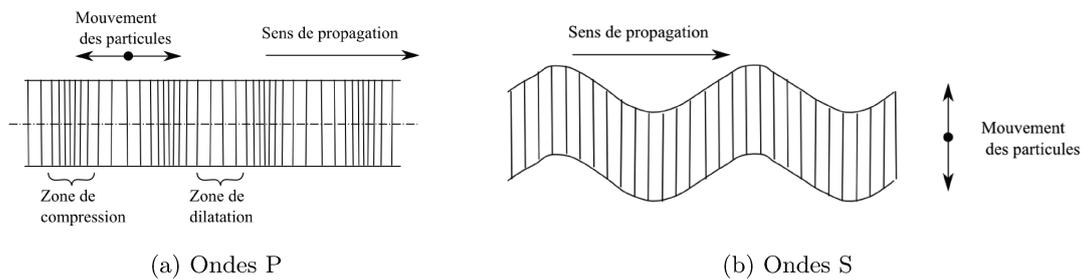


FIGURE C4: Ondes de volume

Dans la même famille, il y a les ondes S (ou ondes secondaires) que l'on appelle ondes de cisaillement (ou ondes transversales). Dans ce type d'onde, les mouvements des particules se font perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Les ondes de cisaillement (figure C4b) sont moins rapides que les ondes de compression. Elles apparaissent en deuxième sur les enregistrements des appareils d'acquisition acoustique. Les ondes S ne se propagent pas dans les liquides ou dans l'air et ne sont donc détectables que dans les milieux solides ou fortement visqueux.

Les ondes de surface sont des ondes guidées à la surface du matériau. Elles ont une vitesse de propagation moins élevée que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte.

L'onde de Love peut s'apparenter à une onde de type S mais sans mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal (figure C5a).

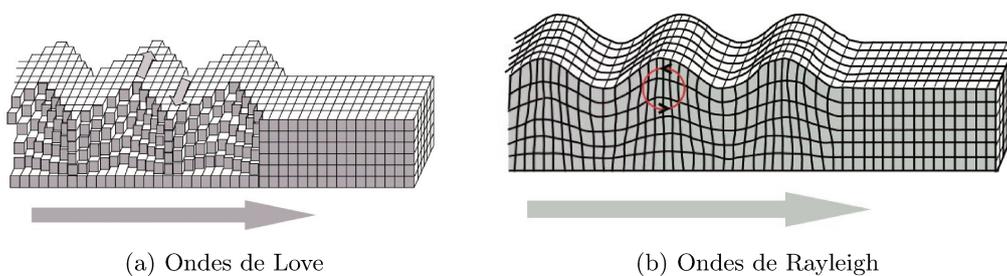


FIGURE C5: Ondes de surface

L'onde de Rayleigh (figure C5b) est plus complexe que les autres : son mouvement est à la fois horizontal et vertical. Sa vitesse de propagation est plus faible que celle de Love.

D'une manière générale, l'étude de ces différents types d'onde est facilement réalisable sur des matériaux homogènes, isotropes. Dans le cas des matériaux orthotropes, les travaux de (Aljets et al., 2012) ont montré que la différenciation des modes s'avère moins évidente.

Atténuation des ondes

Les ondes acoustiques sont aussi soumises à une atténuation (diminution de leur amplitude) qui dépend du matériau étudié. D'une manière générale, cette atténuation qui se traduit par un rapport entre la valeur de sortie et la valeur d'entrée d'un signal, décroît de manière exponentielle selon la distance.

$$\text{Atténuation} = e^{-\alpha \cdot x} \quad (\text{C.2})$$

Avec :

- . α correspond au coefficient d'atténuation de l'onde sonore, exprimé en [dB/m].
- . x correspond à la distance entre la source sonore et le point de mesure, exprimée en [m].

Dans le cas des matériaux dispersifs (Peters and Petit, 2003) ainsi que dans les matériaux hétérogènes (Molero and Segura, 0102), cette atténuation dépend des fréquences, les hautes fréquences étant les plus atténuées. Dans une étude effectuée sur le bois (Molero and Segura, 0102), l'atténuation peut varier de 30 à 200 [dB/m]. Si nous souhaitons effectuer une analyse sur un large spectre des signaux enregistrés, nous devons placer les capteurs à quelques centimètres des sources acoustiques probables. De cette façon, le signal sera peu altéré.

Localisation

On distingue 4 types de localisation : linéaire, zonale, surfacique (2D) et volumique (3D). Pour la localisation linéaire, la valeur de X se déduit de la différence de temps entre

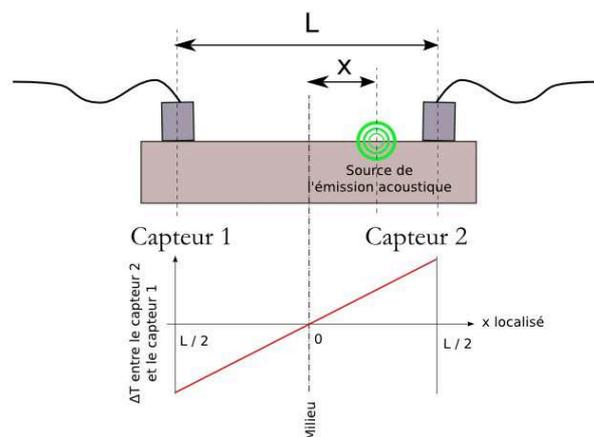


FIGURE C6: Localisation linéaire entre deux capteurs

les capteurs 2 et 1 (figure C6) dans la détection d'un événement.

$$X = \Delta T \cdot V_{\text{onde dans le matériau}} \quad (\text{C.3})$$

Pour pouvoir utiliser l'équation C.3, il faut connaître la valeur de la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau. Ce type de localisation est très utilisé dans le cas des structures métalliques.

La localisation zonale est dérivée de la précédente et permet de circonscrire la source d'une onde à une zone. Elle est utilisée dans le cas des matériaux anisotropes et dans le cas où l'atténuation du matériau modifie énormément les caractéristiques du signal reçu. La *relative* précision de la localisation dépend énormément du quadrillage qui est effectué à l'aide des capteurs (figure C7).

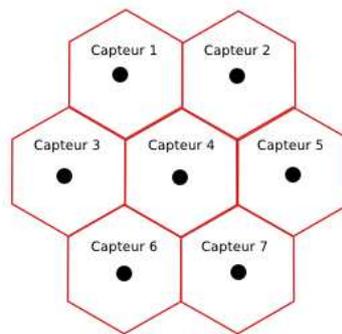


FIGURE C7: Maillage pour localisation zonale

Les méthodes de localisation surfacique sont directement issues de la sismologie.

La méthode des cercles nécessite l'utilisation d'au moins trois stations enregistrant la composante verticale des ondes P et S. En première approximation, nous considérons que l'onde emprunte le trajet le plus court (la ligne droite) (figure C8a).

Pour l'onde P, le temps d'arrivée à la station a pour expression :

$$t_p = t_0 + \frac{d}{V_p} \quad (\text{C.4})$$

Pour l'onde S, le temps d'arrivée à la station a pour expression :

$$t_s = t_0 + \frac{d}{V_s} \quad (\text{C.5})$$

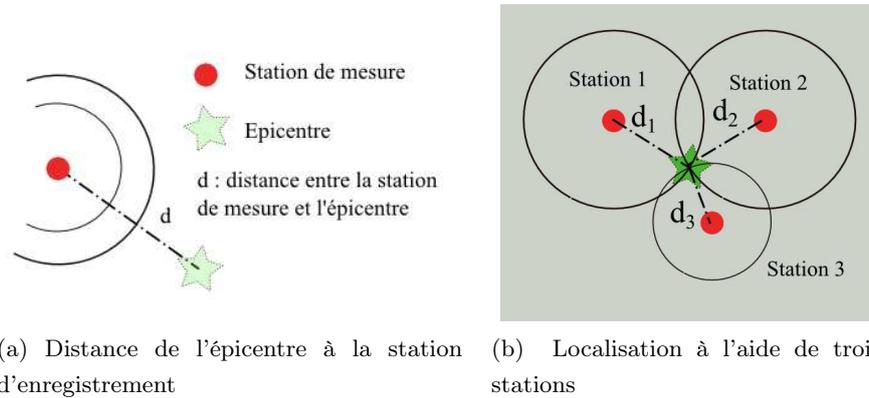


FIGURE C8: Localisation à l'aide de plusieurs stations

La connaissance de la position de l'épicentre se déduit de la soustraction des équations (C.4) et (C.5) :

$$d = \frac{t_s - t_p}{\frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_p}} \quad (\text{C.6})$$

Sur un plan donné (figure C8), chaque station permet de situer un épicentre sur un cercle de rayon d_i . L'utilisation des données fournies par trois stations permet de n'avoir qu'un seul point.

Cette méthode est particulièrement adaptée à la localisation d'épicentre lorsque les stations sont très proches les unes des autres. Cette méthode passe par la connaissance des vitesses des ondes P et S. Dans le cas où celles-ci ne sont pas connues, il convient de passer par des abaques établis expérimentalement. Par contre, aucune indication n'est donnée quant à la profondeur de l'épicentre.

La méthode des hyperboles (figure C9) nécessite également l'utilisation d'au moins trois stations mais n'utilise que les enregistrements des ondes P.

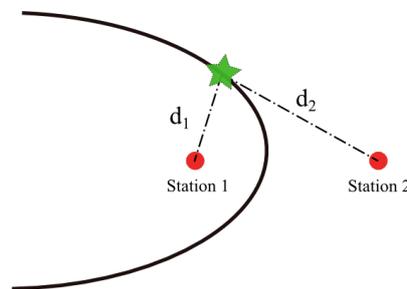


FIGURE C9: Méthode des hyperboles

Pour la station 1, l'onde est enregistrée au temps t_1 (C.7) :

$$t_1 = t_0 + \frac{d_1}{V_p} \quad (\text{C.7})$$

Pour la station 2, l'onde est enregistrée au temps t_2 (C.8) :

$$t_2 = t_0 + \frac{d_2}{V_p} \quad (\text{C.8})$$

Par différence des deux équations précédentes, nous obtenons la relation suivante (C.9) :

$$d_2 - d_1 = V_p \cdot (t_2 - t_1) \quad (\text{C.9})$$

La vitesse de propagation des ondes étant supposée connue et constante, l'écart $t_2 - t_1$ étant mesurable, nous pouvons en déduire que $d_2 - d_1$ a une valeur constante. Dans un plan, d'un point de vue géométrique, cela correspond à la définition d'une hyperbole. À l'aide d'une station supplémentaire, nous pouvons définir deux autres hyperboles (définies géométriquement par les constantes $d_3 - d_1$ et $d_3 - d_2$) et ainsi trouver la position de l'épicentre.

La localisation 3D, dérivée de la précédente, n'est applicable qu'à partir de 4 capteurs. Compte tenu des risques d'erreur ou de perte d'information, il est souhaitable d'en utiliser davantage. De plus, ce type de localisation est très sensible au maillage utilisé, au volume de la pièce étudiée (volume élémentaire simple – sphère, cylindre, cube – ou pièce plus élaborée – pièce mécanique) et donc à l'atténuation du signal.

Dans tous les cas, la détermination précise du temps d'arrivée est primordiale.

Détermination du temps d'arrivée

Si sur le principe, les méthodes précédentes semblent relativement simples, il en est autrement lorsque l'on souhaite déterminer avec précision le temps d'arrivée d'une onde.

Dans un premier temps, il s'agit de distinguer la vitesse de phase et la vitesse de groupe.

La vitesse de phase d'une onde correspond à la vitesse à laquelle la phase de l'onde se propage dans l'espace. Elle s'obtient en choisissant un point particulier de l'onde (figure C10) et s'exprime en fonction de la pulsation de l'onde ω et du vecteur d'onde k (C.10).

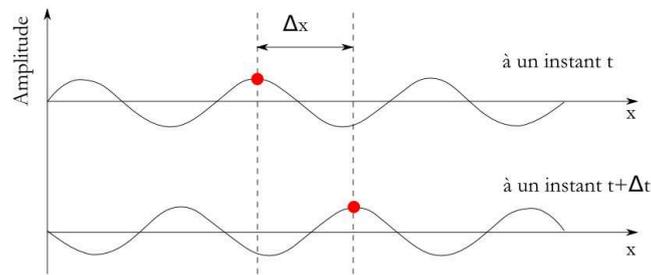


FIGURE C10: Détermination de la vitesse de phase

$$V_{\phi} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\omega}{k} \quad (\text{C.10})$$

Dans le cas où nous avons la superposition de plusieurs ondes monochromatiques, nous pouvons utiliser la vitesse de groupe (figure C11). Cela revient à déterminer la vitesse de propagation d'un ensemble d'ondes en considérant la courbe enveloppe de l'ensemble du signal (C.11).

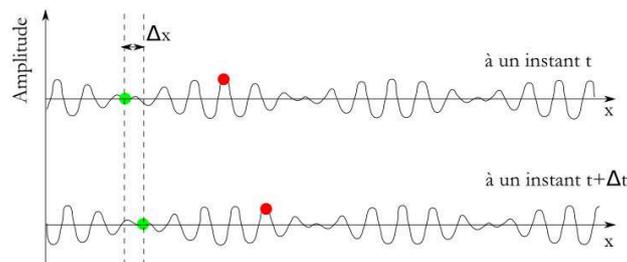


FIGURE C11: Détermination de la vitesse de groupe

$$V_G = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\omega}{k} \quad (\text{C.11})$$

Il résulte de ces développements deux domaines d'étude : le domaine temporel et le domaine fréquentiel. Pour ce faire, plusieurs outils sont à disposition :

- . La méthode du dépassement de seuil (premier dépassement de seuil, et méthode de dernier décrochement de zéro). Cette méthode ne donne pas des résultats probants dans le cas des milieux dispersifs (Le Huérou et al., 2003).
- . La méthode des pics de plus forte amplitude (qui permet de déterminer la vitesse de groupe) (Molyneux and Schmitt, 1999).
- . La méthode de l'enveloppe du signal qui s'obtient par l'utilisation de la transformée

complexe de Hilbert. De cette façon, nous pouvons obtenir une courbe enveloppe du signal et déterminer plus facilement la vitesse de groupe.

Avec l'arrivée d'ordinateurs plus puissants, des algorithmes neuronaux (basés sur les principes d'apprentissage tel que nous les retrouvons dans le monde vivant) peuvent être utilisés. De cette façon (Chlada et al., 2010), il est possible d'utiliser les principes de localisation par triangulation en prenant en compte des paramètres du signal comme le temps de montée, la valeur efficace, le maximum d'amplitude, etc. La puissance et la flexibilité de ce type d'algorithme vient du fait que par apprentissage, il choisit de lui-même le critère le plus pertinent. Le défaut de ce type d'algorithme est, qu'à l'instar du vivant, il faut lui « apprendre » à bien localiser les événements dans une situation donnée afin de refaire la même chose sur un cas similaire. Tout nouveau cas est supposé passer par une nouvelle phase d'apprentissage (Blahacek et al., 2006; Chlada et al., 2010). De cette façon, cette méthode permet même de s'affranchir de la connaissance de la vitesse de propagation des ondes dans le matériau.

Influence des paramètres d'acquisition

La détermination des différentes vitesses ainsi que la position d'une source acoustique dépend de la façon dont le signal a été enregistré. Les formes d'onde enregistrées sont liées au système d'acquisition et à certains paramètres d'acquisitions définissant des fenêtres temporelles. Il s'agit des paramètres nommés Hit Definition Time (HDT), Hit Lock-out Time (HLT) et Pic Definition Time (PDT) ainsi que le seuil d'acquisition du signal (Threshold).

Le réglage du PDT (figure C12a et figure C12b) permet la détermination du temps du pic d'amplitude d'un signal acoustique. Le PDT correspond à un intervalle de temps (compteur) qui se déclenche dès qu'un pic est atteint dans un signal. Un PDT trop court aura pour conséquence une estimation du temps de montée trop faible. Le principal intérêt du PDT est d'éviter des erreurs de mesure que l'on pourrait avoir avec des signaux précurseurs à grande célérité. Ceci dit, le PDT doit avoir la valeur la plus faible possible. Une valeur raisonnable correspond au rapport D/C où D représente l'espacement entre les capteurs et C , la célérité de la plus rapide des ondes mesurées (600 [m/s] valeur préconisée par défaut).

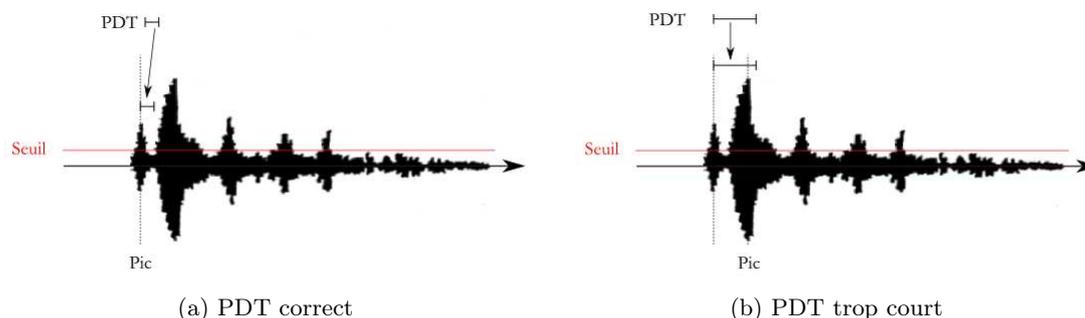


FIGURE C12: Réglage du PDT

Le réglage du HDT (figure C13) doit permettre au système de déterminer la fin d'une salve, pour mettre fin à l'acquisition et enregistrer les données. Il s'agit d'un laps de temps qui se déclenche à chaque passage de seuil. Dans la plupart des systèmes d'émission acoustique, le HDT doit être au moins deux fois plus long que le PDT. Le but est d'identifier et de décrire aussi fidèlement que possible les événements acoustiques. Le HDT doit être assez long pour couvrir un intervalle durant lequel le signal mesuré passe en deçà du seuil. D'un autre côté, le HDT doit être aussi court que possible pour réduire le risque d'envelopper deux salves qui seraient trop rapprochées.

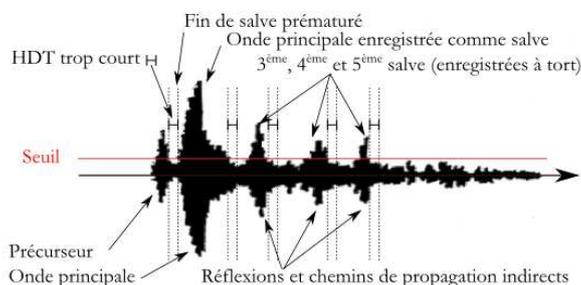


FIGURE C13: HDT trop court

La fonction du HLT (figure C14) permet au système de créer un temps mort à la fin d'un enregistrement pour ne pas tenir compte de toutes les réflexions et signaux arrivés en retard. De cette façon, le système est prêt pour enregistrer une nouvelle salve et l'acquisition des signaux peut se faire plus rapidement. Le HLT se déclenche immédiatement à la fin du HDT et est directement lié à ce dernier.

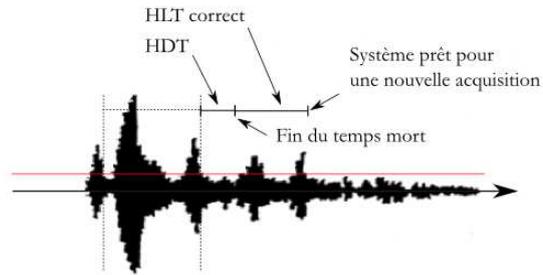


FIGURE C14: Définition du HLT

Adossé à ce système de « sélection du signal » se trouve la possibilité de filtrer les fréquences qui vont être enregistrées pour mieux cibler l'information à retenir et analyser. Les filtres en fréquence (haut et bas) permettent d'éliminer des enregistrements des signaux indésirables (le bruit qui est très riche en basses fréquences par exemple). La combinaison des deux nous permet de faire un filtre passe bande (figure C15).

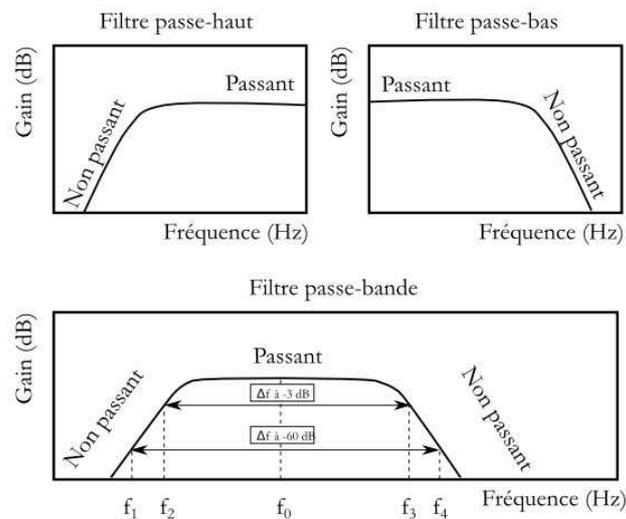


FIGURE C15: Filtres passe-haut, passe-bas et passe-bande

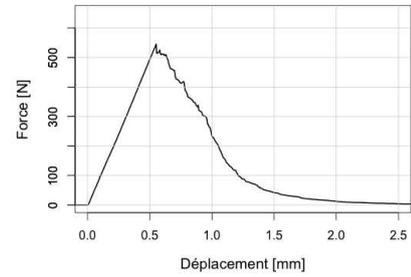
Annexe D

Résultats des éprouvettes

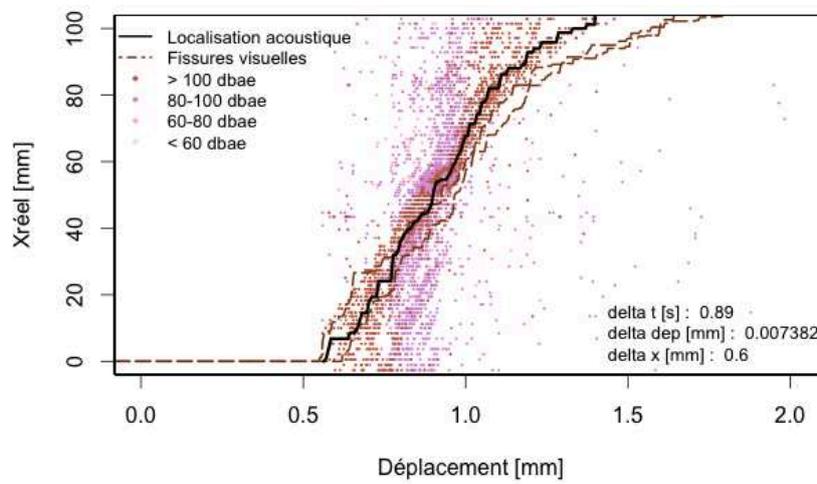
1 Epreuve S1



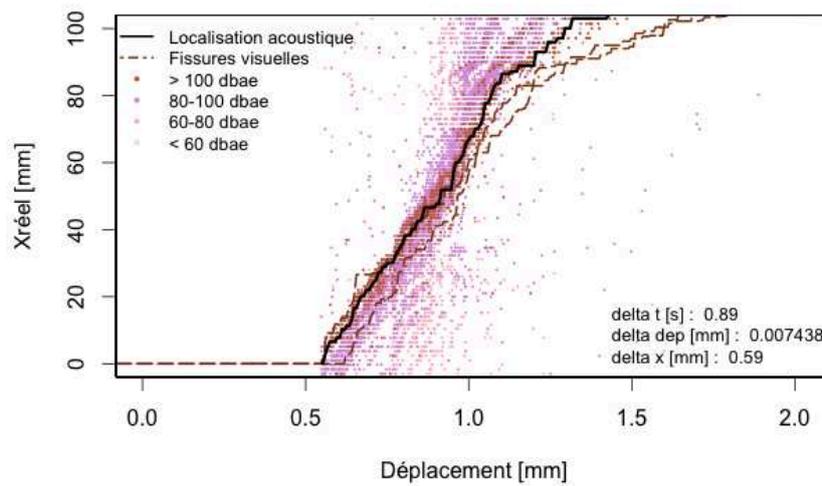
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



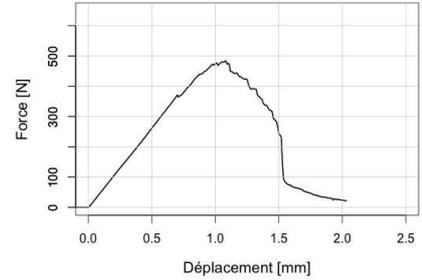
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D1: Éprouvette S1

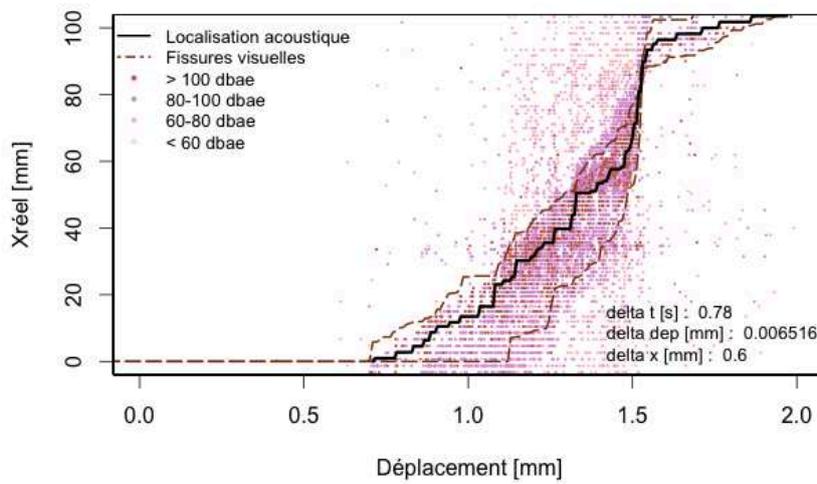
2 Eprouvette S2



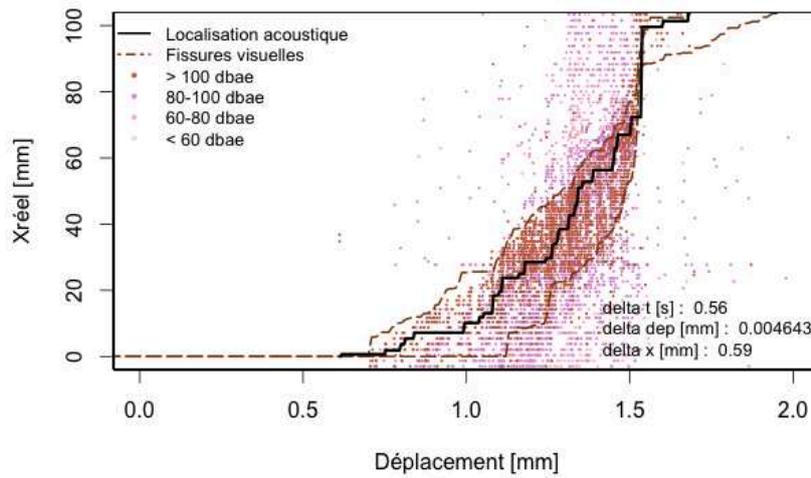
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



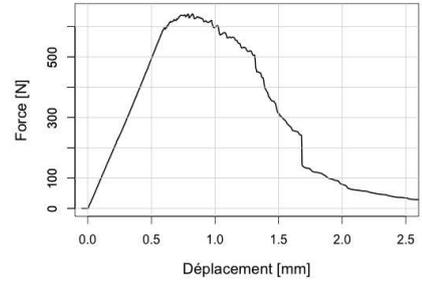
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D2: Éprouvette S2

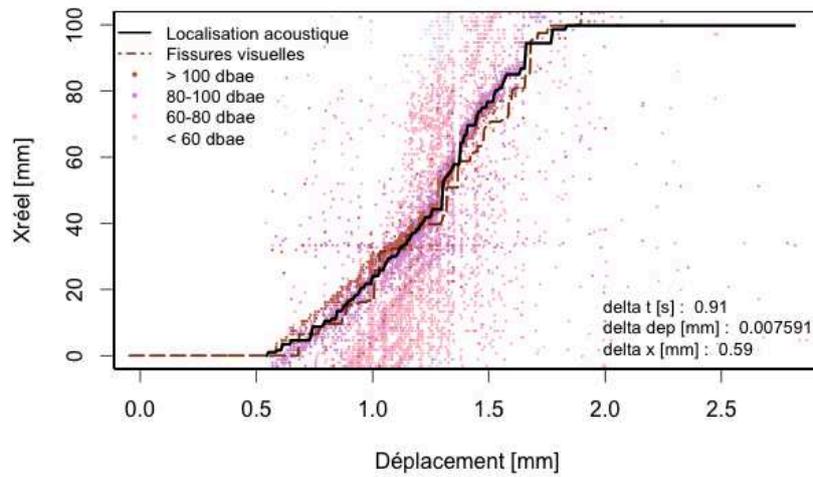
3 Eprouvette S3



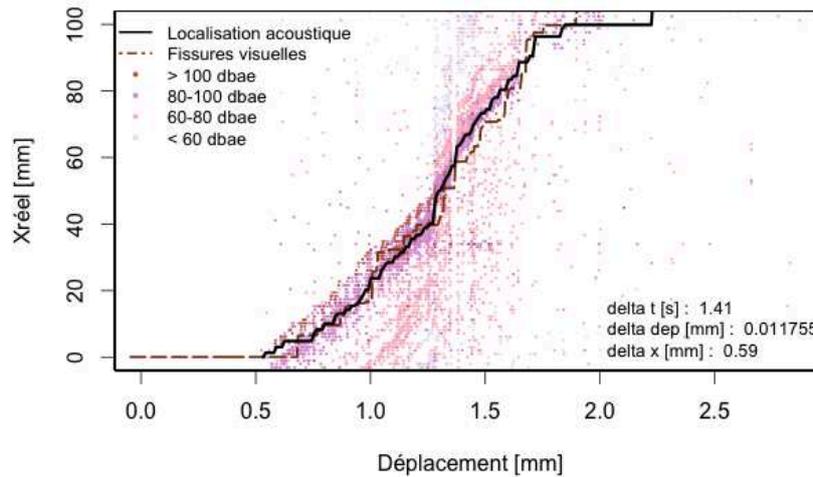
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



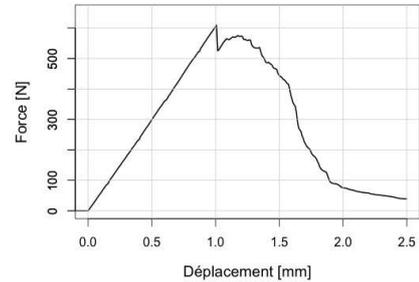
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D3: Éprouvette S3

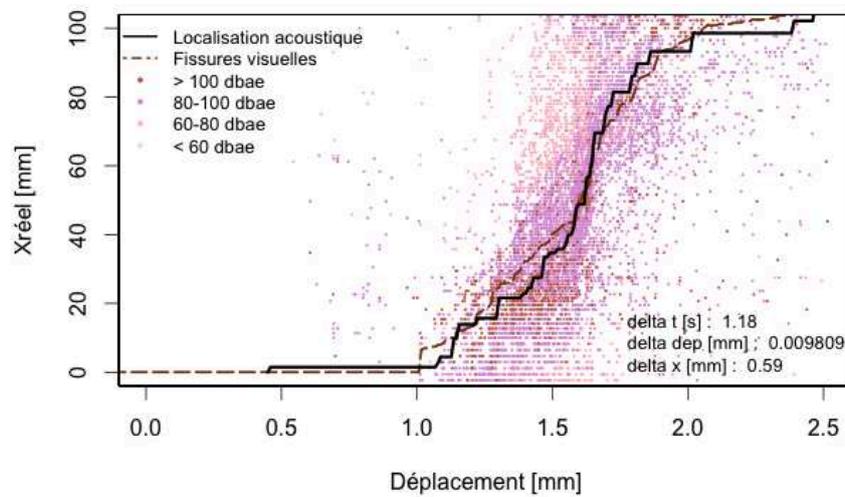
4 Eprouvette S4



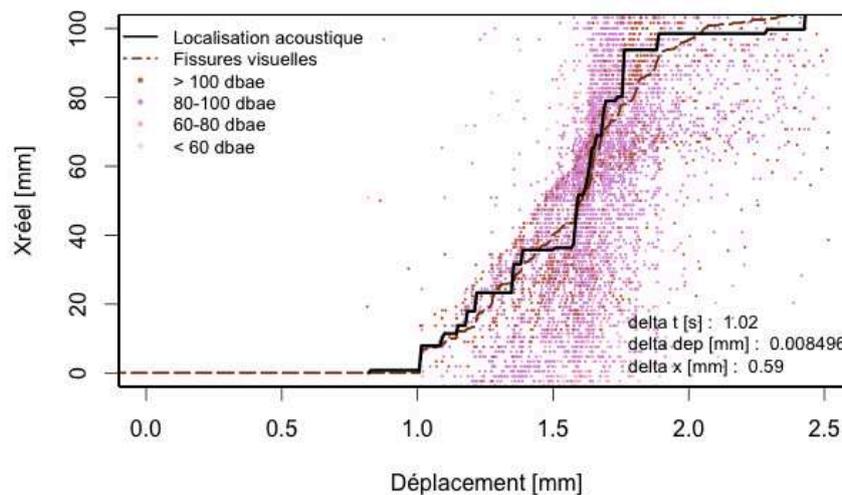
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



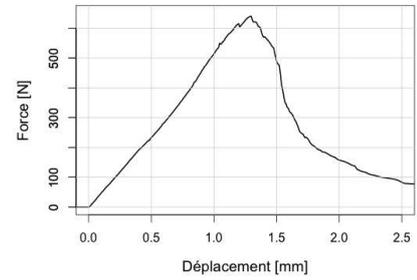
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D4: Éprouvette S4

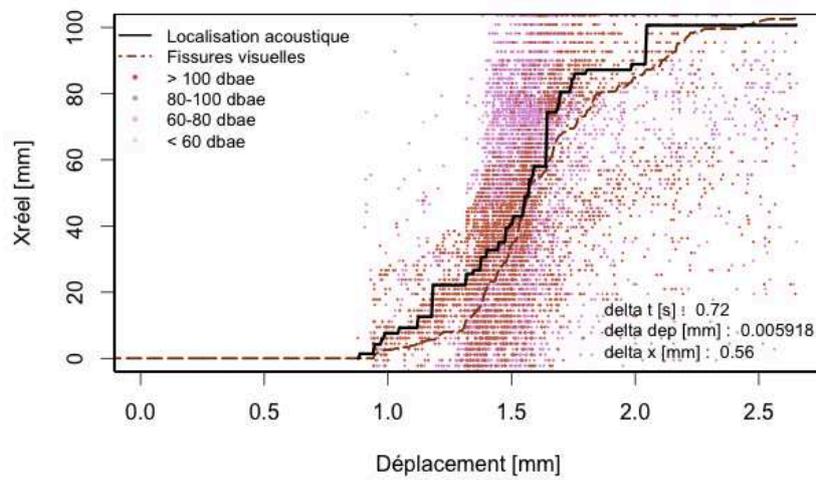
5 Eprouvette S5



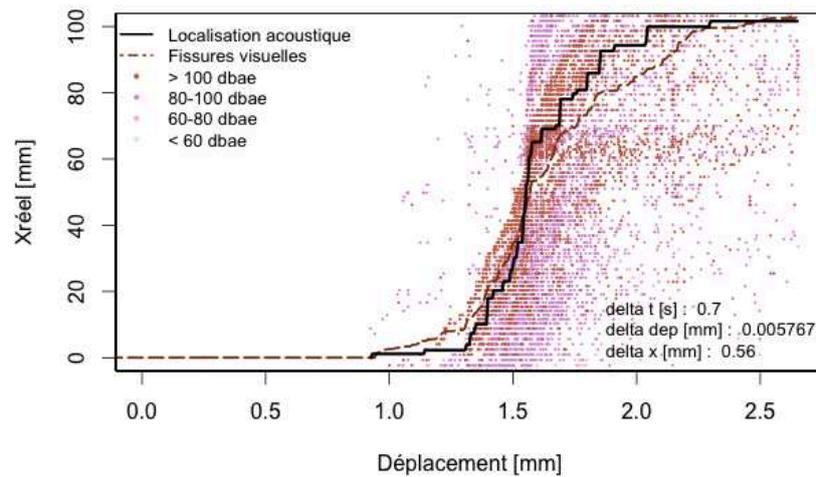
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



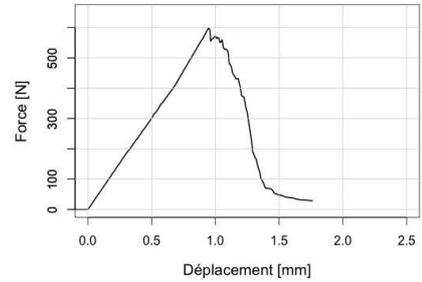
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D5: Éprouvette S5

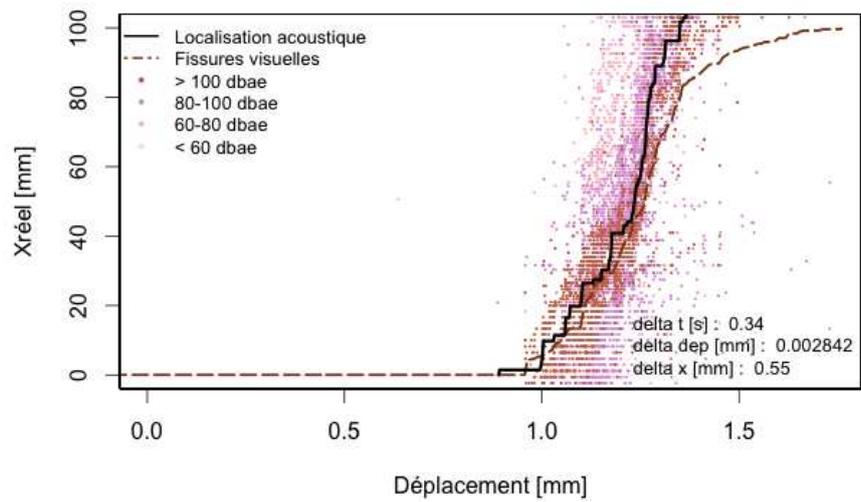
6 Eprouvette S6



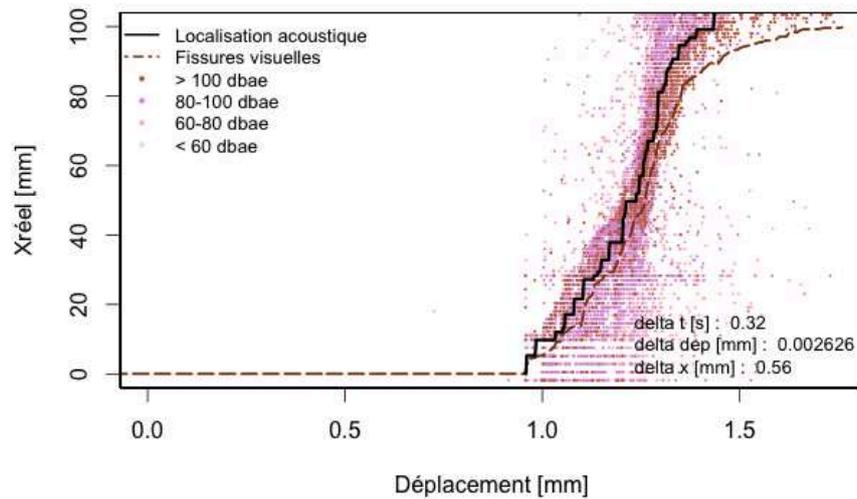
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



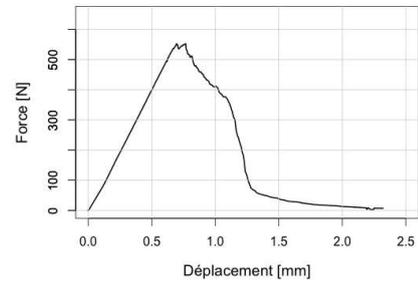
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D6: Éprouvette S6

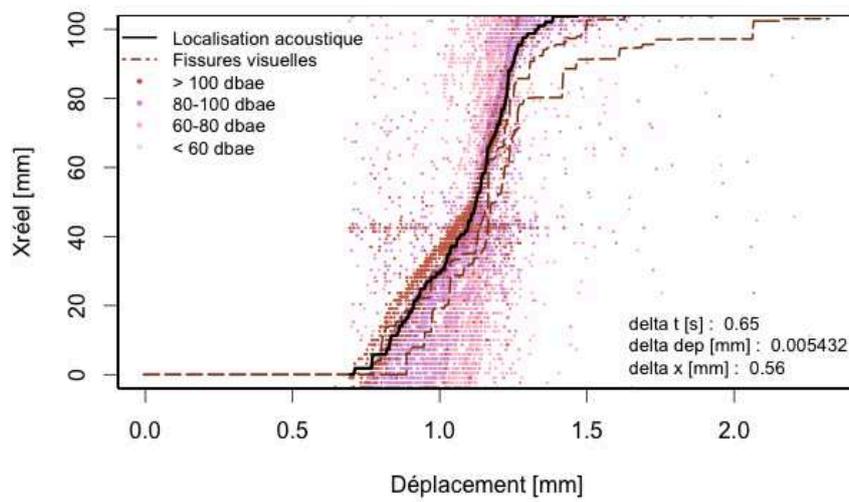
7 Epreuve S7



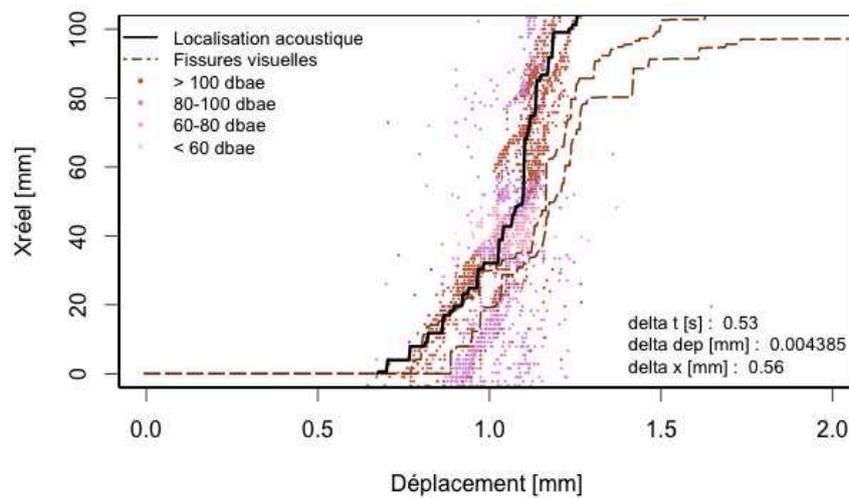
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



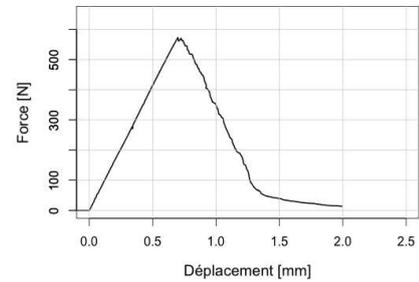
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D7: Éprouvette S7

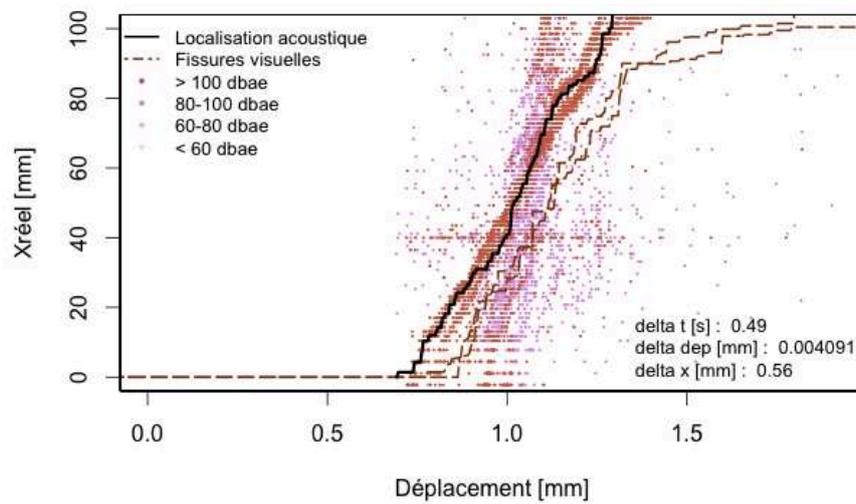
8 Epreuve S8



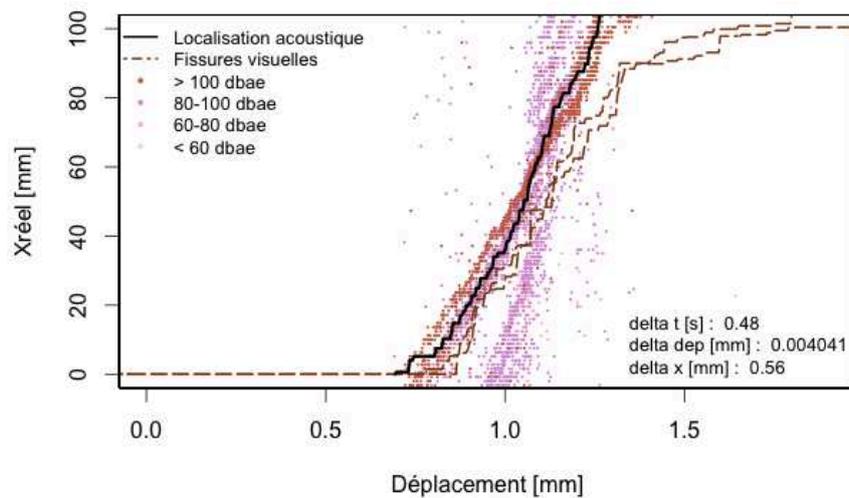
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



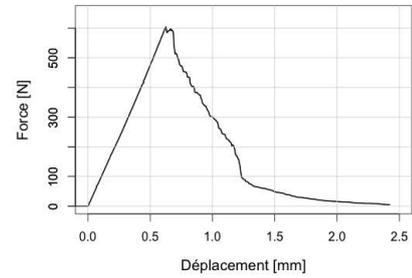
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D8: Éprouvette S8

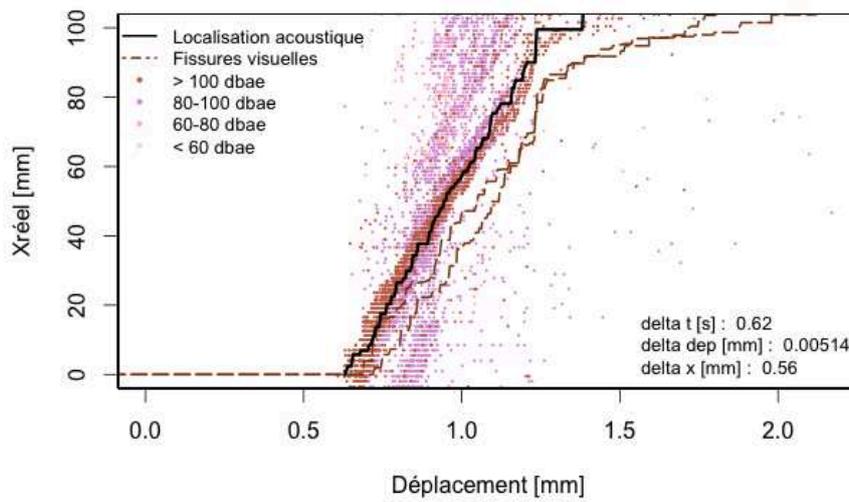
9 Eprouvette S9



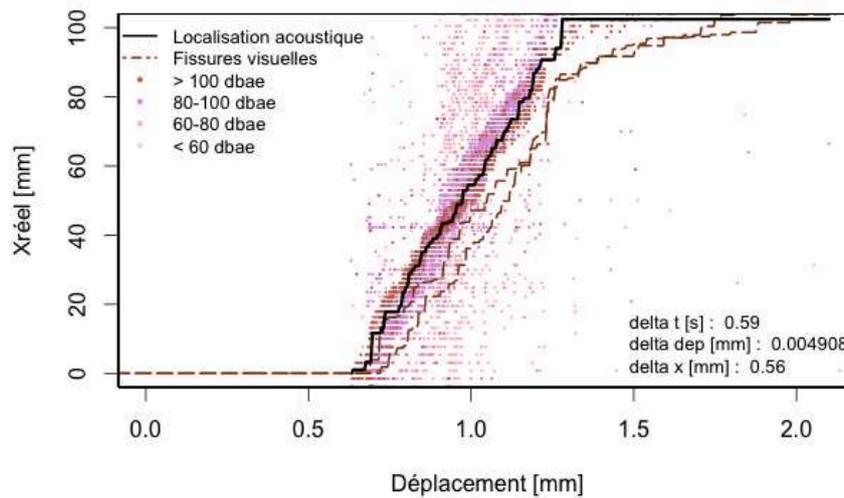
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



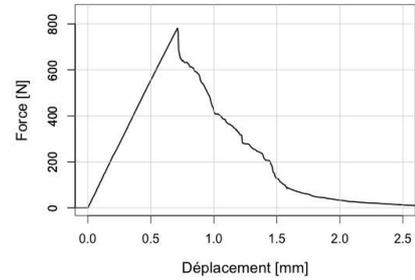
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D9: Éprouvette S9

10 Epreuve S10

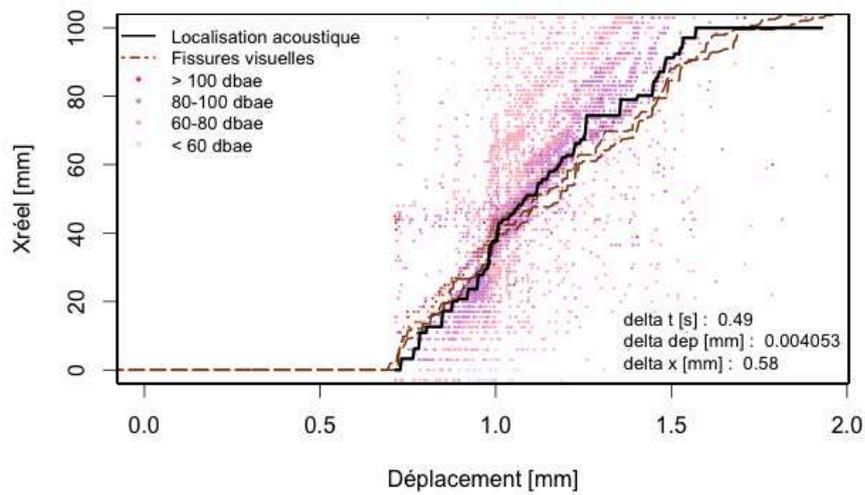


(a) Clichés de l'éprouvette

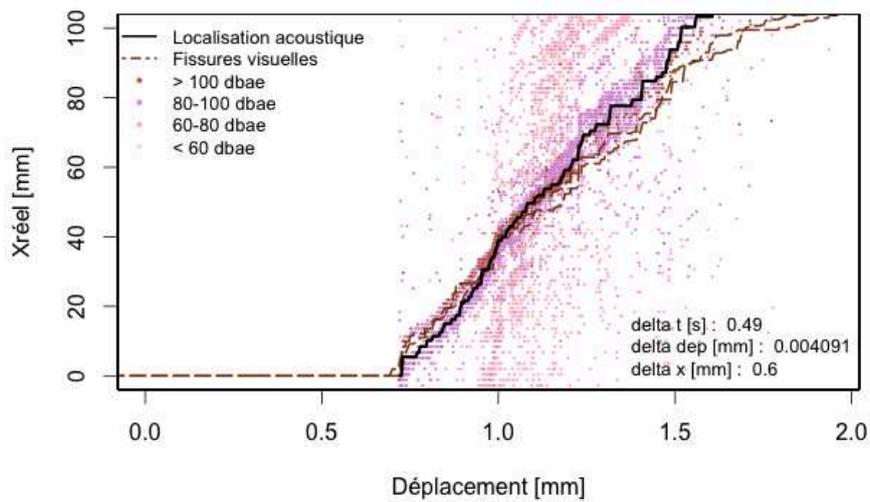


(b) Courbe force-déplacement

FIGURE D10: Éprouvette S10



(a) Fissures visibles, acoustique et événements acoustiques capteurs 1-2

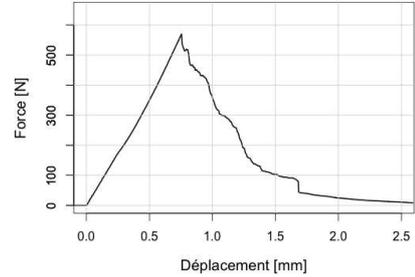


(b) Fissures visibles, acoustique et événements acoustiques capteurs 3-4

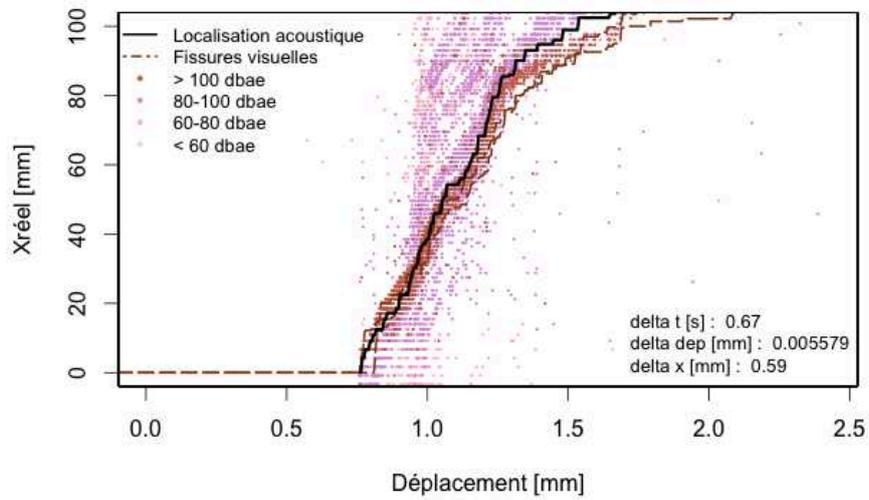
11 Epreuve S11



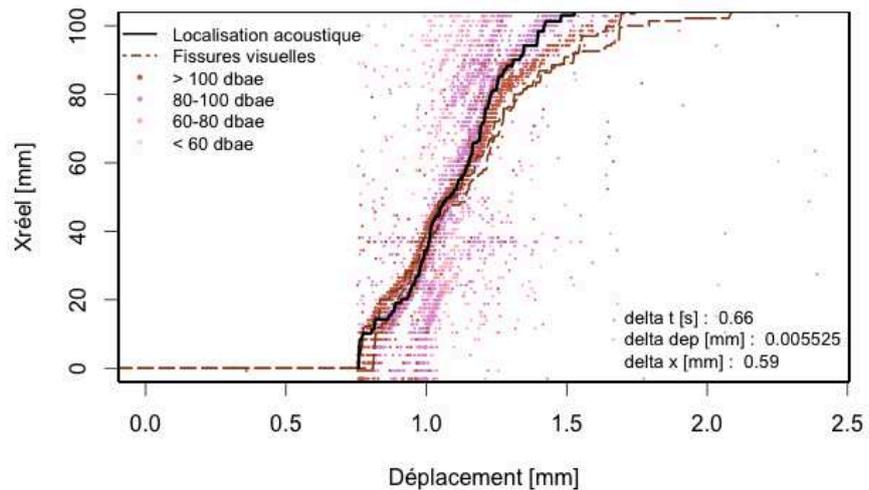
(c) Clichés de l'éprouvette



(d) Courbe force-déplacement



(e) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



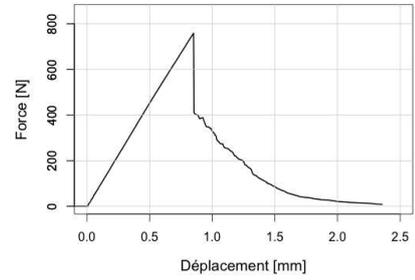
(f) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D11: Éprouvette S11

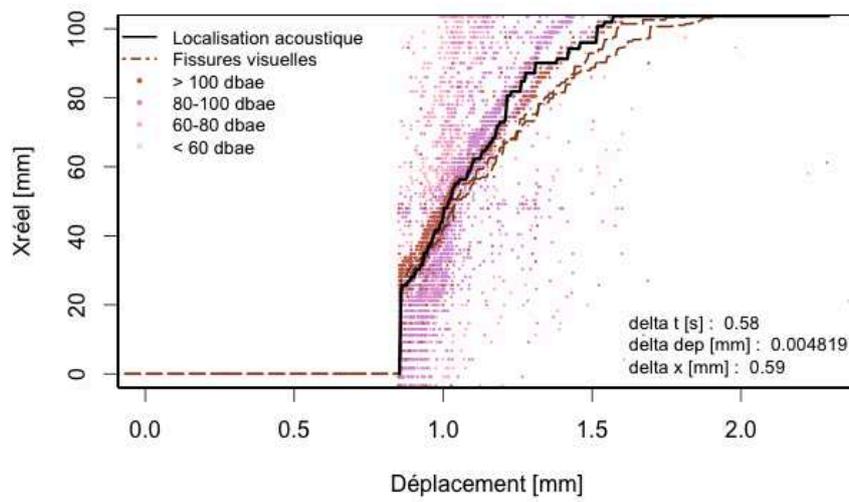
12 Epreuve S12



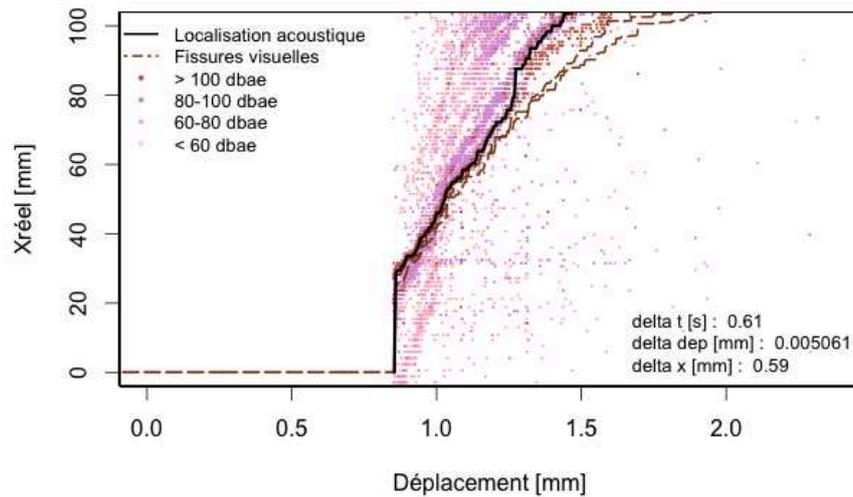
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et événements acoustiques capteurs 1-2



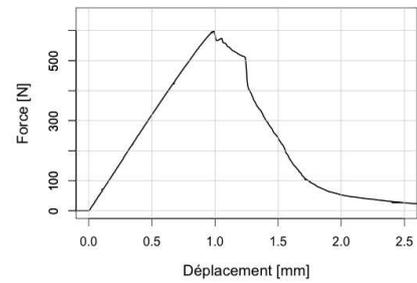
(d) Fissures visibles, acoustique et événements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D12: Éprouvette S12

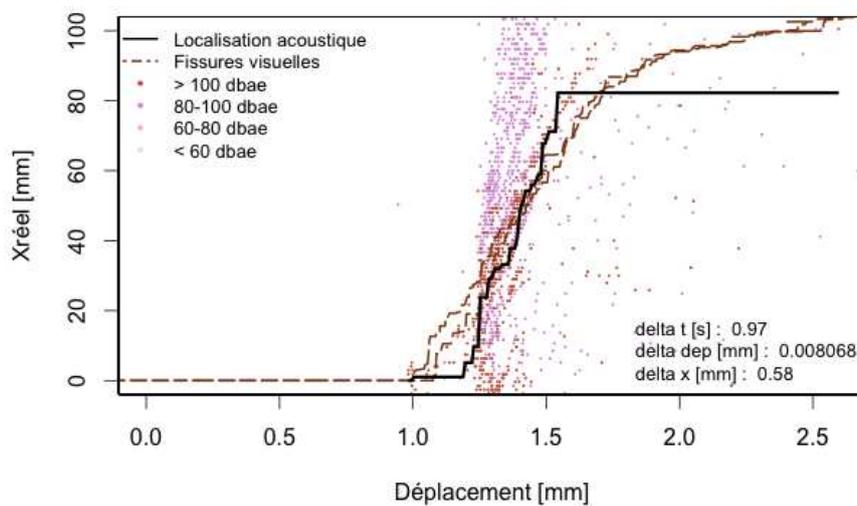
13 Epreuve H1



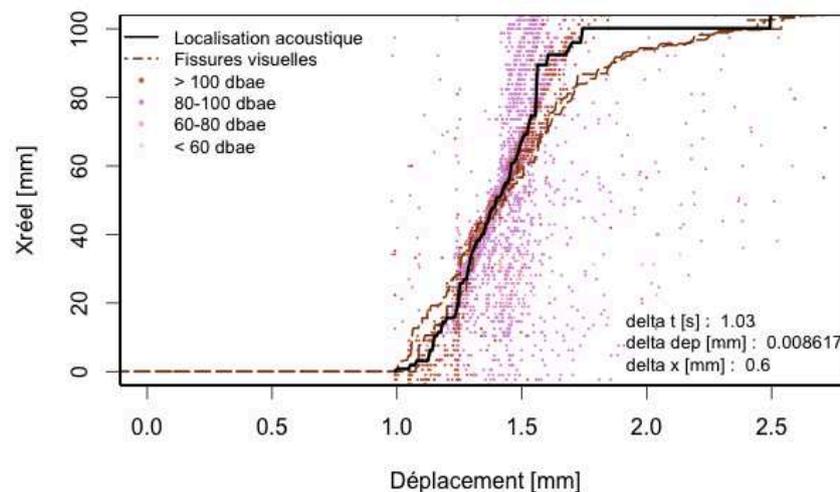
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



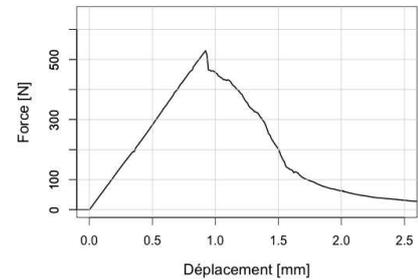
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D13: Éprouvette H1

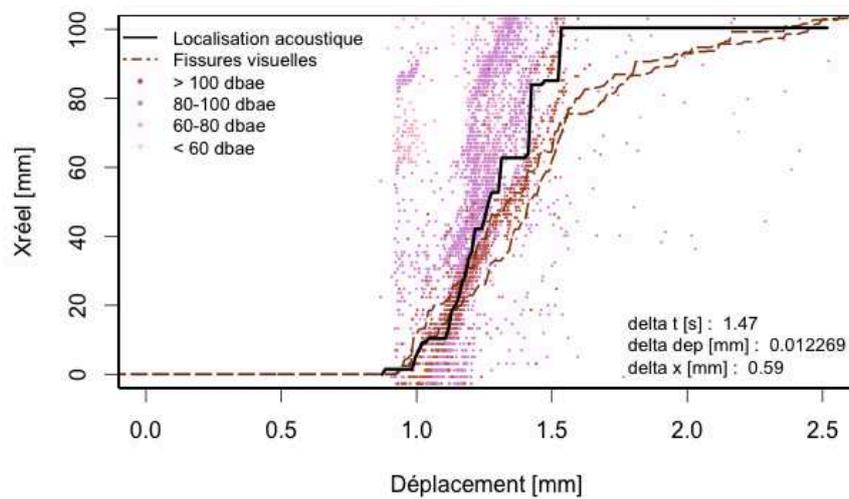
14 Epreuve H2



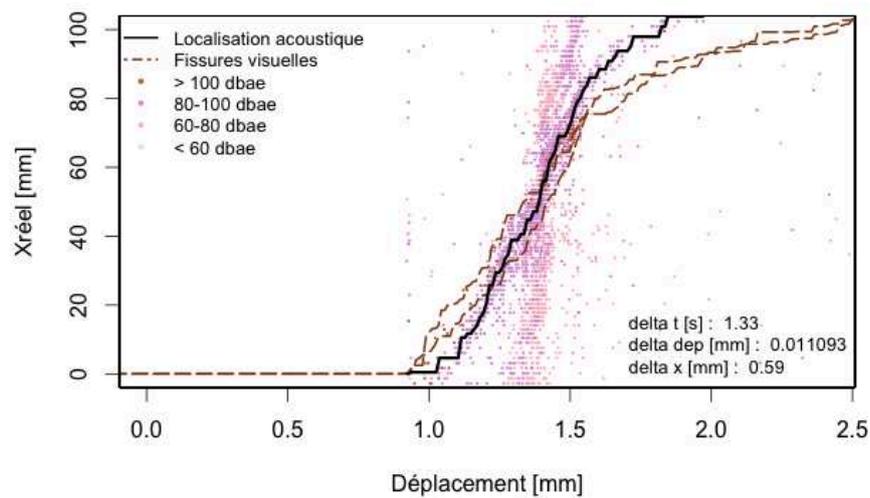
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



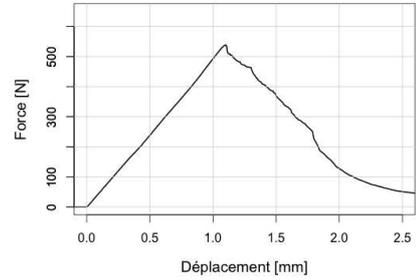
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D14: Éprouvette H2

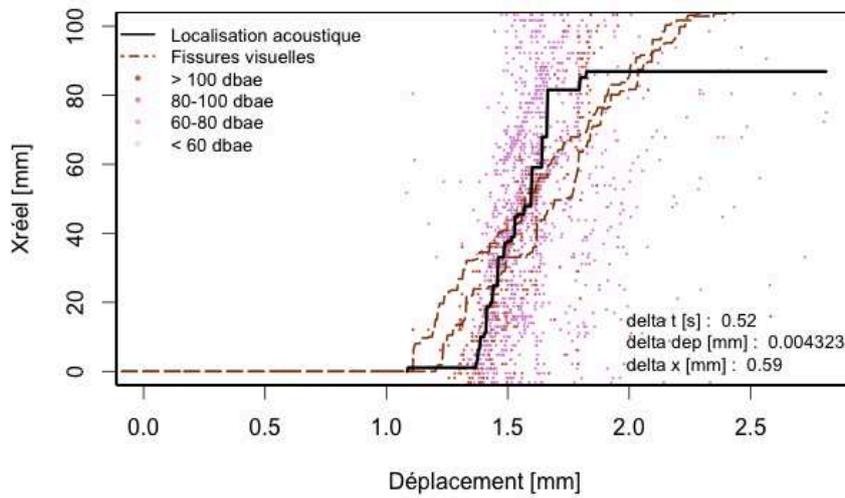
15 Epreuve H3



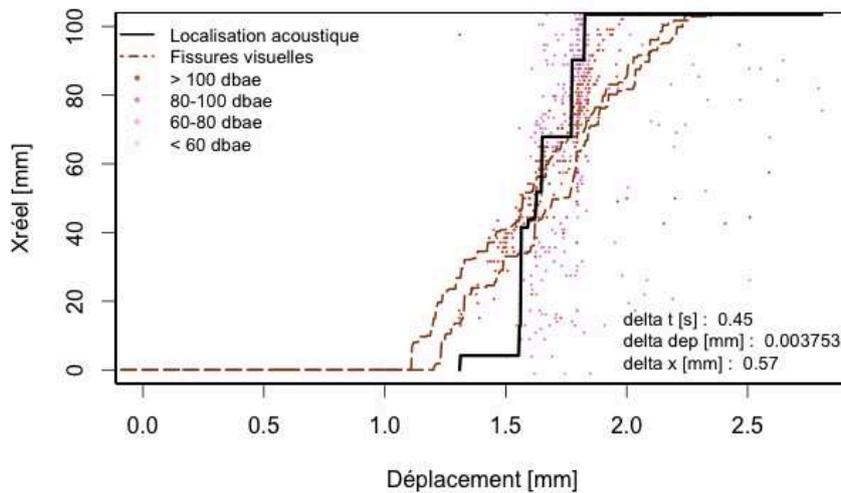
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



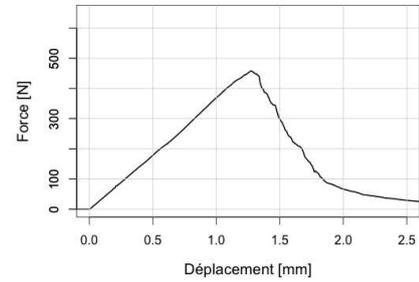
(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D15: Éprouvette H3

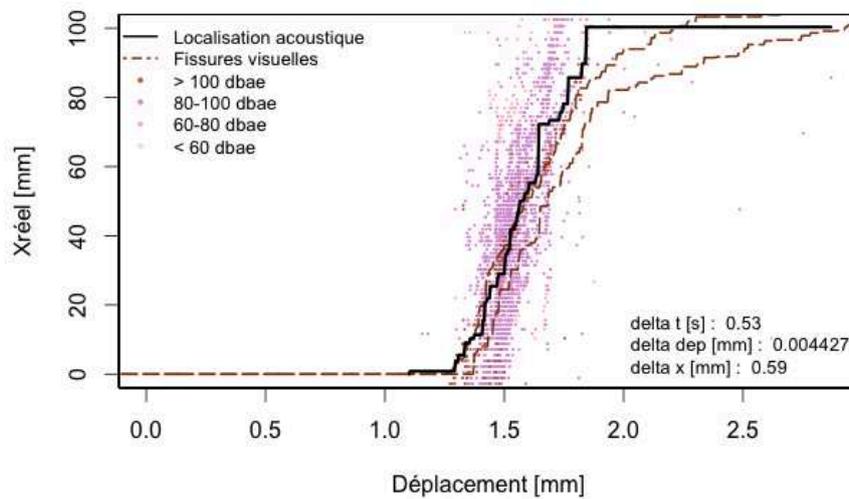
16 Epreuve H4



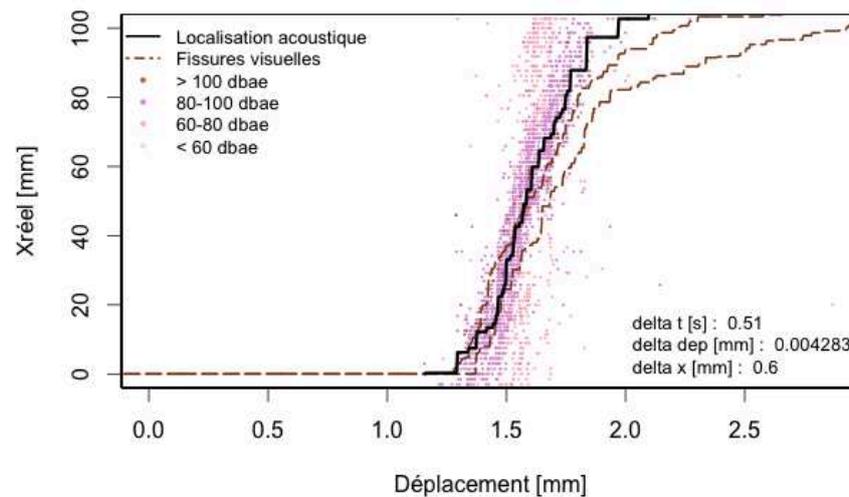
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et événements acoustiques capteurs 1-2



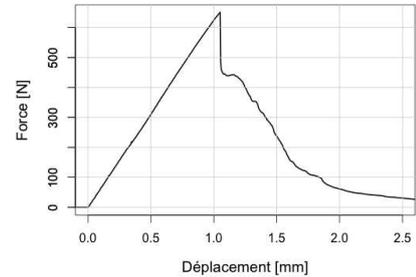
(d) Fissures visibles, acoustique et événements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D16: Éprouvette H4

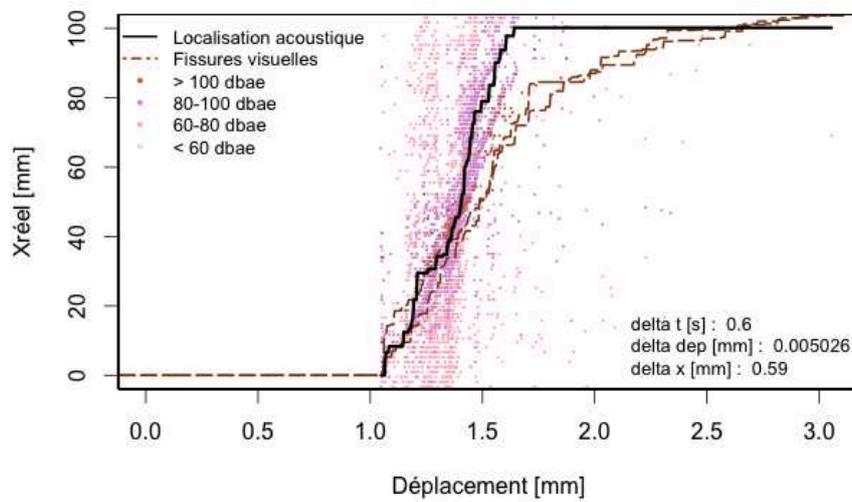
17 Epreuve H5



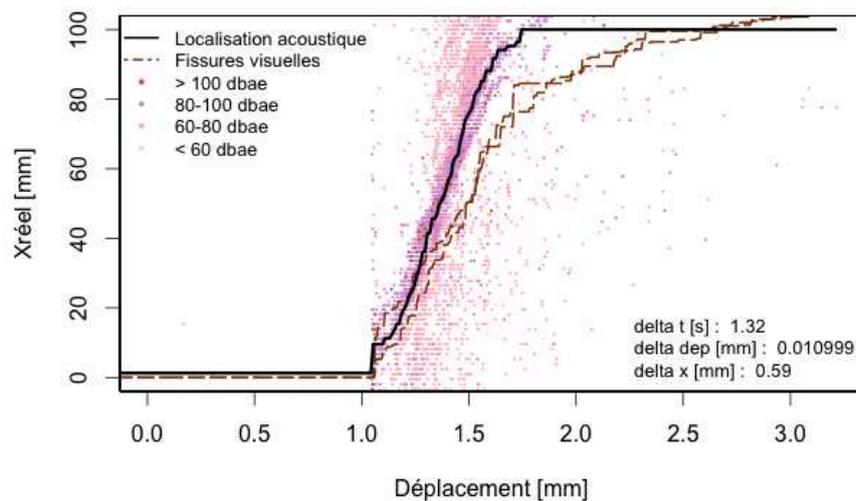
(a) Clichés de l'éprouvette



(b) Courbe force-déplacement



(c) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 1-2



(d) Fissures visibles, acoustique et évènements acoustiques capteurs 3-4

FIGURE D17: Éprouvette H5

Table des figures

1	Le bois, un matériau de construction ancestral	6
2	Ouvrages d'art en bois en France	7
3	Buildings et bâtiments en bois	7
4	Quelques exemples de ruptures d'après (Aubagnac et al., 2008)	8
5	Fissuration des éléments structuraux	9
1.1	Différenciation anatomique entre le bois de printemps et le bois d'été	14
1.2	Coupe transversale d'un chêne (source : CNDB)	15
1.3	Le bois - une structure multi échelle d'après Rafsanjani (Rafsanjani et al., 2012)	15
1.4	Organisation des trachéides de résineux d'après Charcosset (Charcosset, 2012)	17
1.5	Détails de la structure des deux familles d'arbres d'après Guitard (Guitard, 1987)	17
1.6	Paroi végétale	19
1.7	Evolution du module d'élasticité en fonction de la température d'après Bernard (Bernard, 1990)	23
1.8	Variation de la température de transition vitreuse en fonction de la teneur en eau d'après Bernard (Bernard, 1990)	24
1.9	Représentation schématique de l'évolution de la teneur en eau dans le bois d'après (Natterer et al., 2004)	25
1.10	Relation entre masse volumique, épaisseur des cernes et module d'élasticité (Natterer et al., 1987)	26
1.11	Variation du module d'élasticité pour du Douglas d'après Wang (Wang, 2008)	27
1.12	Variation du taux de restitution d'énergie en fonction de la teneur en eau d'après (Reiterer and Stanzl-Tschegg, 2002)	27
1.13	Modes de propagation de fissure	29
1.14	Contrainte au voisinage de la pointe de fissure	31
1.15	Courbe force déplacement	33

1.16	Estimation du taux de restitution d'énergie	33
1.17	Variation de la complaisance	34
1.18	Principales configurations de propagation de fissure d'après Silva (Silva et al., 2006)	35
1.19	Différents types de chargement	35
1.20	Sollicitations d'après Yoshihara (Yoshihara and Ohta, 2000) (a) et (Yoshihara, 2013)(b)	35
1.21	Eprouvette CT	36
1.22	Eprouvette SENB modifiée par Gustafsson	37
1.23	Eprouvettes à entailles	37
1.24	Eprouvettes en bois pour un chargement en mode I	38
1.25	Eprouvette mTDCB	39
1.26	Détection de pointe de fissure par simple traitement d'image	40
1.27	Corrélation d'image d'après Meite (Meite et al., 2009)	40
1.28	Photogramétrie d'après Franke (Franke et al., 2006)	41
1.29	Cliché et thermographie d'un nœud dans du contreplaqué d'après Meinlschmidt (Meinlschmidt, 2005)	41
1.30	Utilisation de la thermographie dans la détermination des facteurs d'intensité de contrainte et de la process zone sur un élastomère d'après Mzabi (Mzabi, 2010)	42
1.31	Faciès de rupture pour des échantillons à différents niveaux d'humidité d'après (Reiterer and Stanzl-Tschegg, 2002). Les flèches indiquent la direction principale des fibres.	42
1.32	Tomographe (Crédit photo ENSTIB)	43
1.33	Tomographie in situ pour des arbres sur pied d'après (Bucur et al., 2002)	44
1.34	Emploi de la tomographie ultrasonore dans l'inspection des arbres sur pieds (Crédit photo PICPUS)	45
1.35	Effets de la température sur le module d'élasticité, la résistance à la compression et le cumul du nombre d'événements acoustiques avec la température d'après (Berg and Gradin, 2000) pour des éprouvettes d'Épicéa imprégnées d'eau ou de glycérol	47
1.36	Comparaison du taux de restitution d'énergie et du taux d'énergie acoustique d'après (Landis and Whittaker, 2000)	48
1.37	Nombre de coups jusqu'à la force maximale, pour des résineux et des feuillus d'après (Reiterer et al., 2000)	48
1.38	Modes de rupture dans les matériaux composites d'après (Dogossy and Czigány, 2006)	51
1.39	Structure d'une fibre de lin et modes de ruine d'après (De Rosa et al., 2009)	53

1.40	Variation de la vitesse selon l'angle de propagation des ondes de compression par rapport au sens des fibres	56
1.41	Exemple d'extraction de données acoustiques	57
1.42	Dendrogramme de corrélation des descripteurs	61
1.43	Dendrogramme de corrélation des descripteurs	61
1.44	Définition du nombre de classes	63
2.1	Le Douglas, une ressource bien implantée au centre de la France	68
2.2	Module d'élasticité de quelques résineux commercialisés en France d'après (Nepveu, 1984; Nepveu and Blachon, 1989; Bailly and de Champs, 2012)	69
2.3	Prélèvement des éprouvettes sur un plateau de Douglas	70
2.4	Dimensions des éprouvettes et orientation des cernes	71
2.5	Les éprouvettes ... sous toutes les coutures	71
2.6	Évolution de la masse selon le conditionnement	72
2.7	Mesure des dimensions	73
2.8	Chargement de la DCB	74
2.9	Chargement mécanique	75
2.10	Système d'acquisition vidéo	75
2.11	Copie d'écran du logiciel d'acquisition vidéo développé sous Labview	76
2.12	Copie d'écran du logiciel d'acquisition vidéo développé sous VVVV	77
2.13	Analyse de la définition et du poids des images par le système d'acquisition vidéo	78
2.14	Traitement de la variation d'intensité dans une image	79
2.15	Applications de la détection de contour à un visage, a) Image originale, b) Détection de contour par le filtre Sobel, c) Détection de contour par le filtre laplacien	80
2.16	Définition d'une zone d'intérêt	80
2.17	Exemples de détection de contour	81
2.18	Mise en évidence de la fissure en surface de l'éprouvette par algorithme de détection de contour	82
2.19	Aperçu du plan de travail	83
2.20	Diagramme des flux du système expérimental	84
2.21	Synchronisation	84
2.22	Chaîne d'acquisition acoustique	85
2.23	Logiciels d'acquisition et de traitement de données de chez Mistras	86
2.24	Modèles de transducteurs disponibles	86
2.25	Certification de l'étalonnage pour un nano 30	87
2.26	Localisation linéaire selon la méthode du cassé de mine	89

2.27	Localisation déportée des évènements parallèlement à la ligne de fissuration	90
2.28	Courbe de correction géométrique	92
2.29	Eprouvettes réalisées en matériaux témoins isotropes (PVC et aluminium)	92
2.30	Courbe de correction géométrique appliquée à l'aluminium	93
2.31	Influence de la vitesse effective sur les courbes de correction appliquées à l'aluminium	94
2.32	Courbe de correction géométrique appliquée au PVC	95
2.33	Influence de la vitesse effective sur les courbes de correction appliquées au PVC	95
2.34	Effets de la vitesse effective sur la détection du nombre d'évènements pour l'aluminium	96
2.35	Effets de la vitesse effective sur la détection du nombre d'évènements pour le PVC	97
2.36	Salves, évènements localisés pour l'aluminium	98
2.37	Salves, évènements localisés pour le PVC	98
2.38	Détermination expérimentale de la vitesse de propagation des ondes sur une éprouvette cylindrique en Douglas	99
2.39	Variation de la vitesse des ondes de compression selon l'angle de propagation par rapport au sens des fibres (plan LR)	100
2.40	Localisation des sources d'émission acoustique	101
2.41	Deux configurations pour les capteurs	102
2.42	Principe du cassé de mine pour des capteurs placés face avant	102
2.43	Principe du cassé de mine pour des capteurs placés sur chant	103
2.44	Courbes de correction de localisation	103
2.45	Erreurs de localisation pour les montages des capteurs	104
2.46	Caractéristiques du montage retenu (côtes en [mm])	105
2.47	Effets de l'orthotropie sur les courbes de correction de localisation	107
2.48	Données géométriques pour l'approximation linéaire	108
2.49	Cheminement supposé linéaire dans le cas de la localisation et cheminement réel dû à la diffraction.	109
2.50	Effets de la vitesse effective sur la détection du nombre d'évènements pour le Douglas	110
2.51	Exemples de courbes de correction	111
2.52	Principe et mise en œuvre de l'AST	112
2.53	Perte d'amplitude en fonction de la position de la source	112
2.54	Localisation des évènements	113
3.1	Données mtcars (langage R)	120

3.2	Corrélogramme des données mtcars (langage R)	120
3.3	Paramètres géométriques	122
3.4	Corrélogramme sur nos éprouvettes	123
3.5	Chargements utilisés lors des essais conformément au protocole (a), et de manière dissymétrique (b)	124
3.6	Mise en place des capteurs sur les éprouvettes DCB et dissymétrie naturelle	125
3.7	Evolution de la pointe de fissure à différents instants de l'essai de l'éprouvette S1	126
3.8	Courbes force-déplacement pour les éprouvettes S1, H1, S2 et S3	127
3.9	Hypothèse de la pointe de fissure <i>moyenne</i>	128
3.10	Courbes de propagation de fissure par imagerie pour les éprouvettes S1, H1, S2 et S3	129
3.11	Courbes Force déplacement et propagation de fissure par imagerie pour les éprouvettes S1, H1, S2 et S3	131
3.12	Données énergétiques pour S1	132
3.13	Activité acoustique cumulée du point de vue des salves	134
3.14	Evolution de l'activité acoustique (salves) et courbes de propagation de fissure pour chaque couple de capteurs au cours de l'essai de l'éprouvette S1	135
3.15	Corrélogramme sur les données relatives au conditionnement, à la géométrie et au chargement des éprouvettes	135
3.16	Corrélogramme sur les données relatives au conditionnement, à la géométrie, au chargement des éprouvettes et à l'activité acoustique	137
3.17	Évolution de l'énergie acoustique (salves) et courbes propagation de fissure pour chaque couple de capteurs au cours de l'essai de l'éprouvette S1 . . .	139
3.18	Corrélation entre l'énergie acoustique et l'énergie de fissuration pour S1 sur la base des salves.	140
3.19	Cercle de corrélation et dendrogramme réalisés sur les salves	141
3.20	Évolution de l'activité acoustique du point de vue des événements	143
3.21	Evolution de l'activité acoustique (événements) et courbes propagation de fissure pour chaque couple de capteurs au cours de l'essai de l'éprouvette S1	144
3.22	Courbes force-déplacement et activité acoustique localisée pour l'éprouvette S1	145
3.23	Courbes force-déplacement, événements acoustiques et pointes de fissure visible pour l'éprouvette S1	145
3.24	Courbes d'évènements acoustiques (en fonction de l'amplitude) et de pointes de fissure visible pour les éprouvettes S1, H1, S2 et H2.	146
3.25	Répartition des événements le long d'une pointe de fissure pendant un intervalle de temps Δt	147

3.26	Exemple d'un enregistrement des évènements dans un tableau	148
3.27	Répartition des évènements le long d'une pointe de fissure pendant un intervalle de temps Δt et un intervalle spatial Δx	149
3.28	Répartition des évènements à un instant donné pendant un intervalle de temps Δt pour l'éprouvette S1 (capteurs 1-2)	149
3.29	Répartition des évènements, à un instant donné, pondérés de leur amplitude, le long d'une pointe de fissure pendant un intervalle de temps Δt	151
3.30	Répartition des évènements pendant un intervalle de temps Δt avec pointe de fissure visuelle et acoustique pour l'éprouvette S1	152
3.31	Superposition des courbes obtenues par différentes méthodes AE pour l'éprouvette S1	153
3.32	Utilisation de la méthode par discrétisation temporelle pondérée de l'amplitude pour les éprouvettes S1, H1, S2 et S3.	154
3.33	Détermination du taux de restitution d'énergie G_c par imagerie et par EA pour l'éprouvette S1	155
3.34	Mise en place des capteurs sur une éprouvette à inertie variable	156
3.35	Cliché de l'éprouvette à inertie variable	157
3.36	Conditionnement de l'éprouvette à inertie variable	157
3.37	Superposition de la propagation de fissure et du conditionnement de l'éprouvette à inertie variable	158
3.38	Courbes de correction de localisation	159
3.39	Superposition des courbes de correction de la localisation	160
3.40	Courbes de correction de l'amplitude	160
3.41	Activité acoustique (échelle logarithmique) et hygrométrie pour le couple de capteurs 1-2	161
3.42	Localisation des évènements acoustiques (capteur 1-2), hygrométrie et fissure visuelle	162
3.43	Activité acoustique et fissuration pour le couple de capteurs 1-2	163
4.1	Cercle de corrélation appliqué aux données mtcars - Extension R	168
4.2	Dendrogramme effectué sur les données mtcars à l'aide de la bibliothèque Factominer - Extension R	170
4.3	Un seul signal enregistré	171
4.4	Plusieurs signaux dans un seul enregistrement	171
4.5	Exemple de travail de filtration sur les coups pour l'éprouvette S1, capteurs 1-2	172
4.6	Exemple d'une forme d'onde d'un évènement à nombre de coups trop faible	173

4.7	Exemple de travail de filtration sur l'énergie et la durée (échelle logarithmique) pour l'éprouvette S1, capteurs 1-2	173
4.8	Exemple d'une forme d'onde d'un évènement à énergie trop faible	174
4.9	Part des évènements retenus	174
4.10	Nettoyage des données sur l'amplitude - représentation en échelle logarithmique	176
4.11	Cercles de corrélation sur l'éprouvette S1	177
4.12	Procédure d'analyse d'un échantillon au MEB	179
4.13	Plan de fissuration d'une éprouvette - Grossissement x 100	179
4.14	Faciès de rupture pour une éprouvette humide (à gauche) et sèche (à droite) - grossissement x500	180
4.15	Faciès de rupture pour une éprouvette humide (à gauche) et sèche (à droite) - grossissement x500 pour les photos de gauche et - grossissement x1000 pour les photos de droite	180
4.16	Essai de traction et éprouvette instrumentée	182
4.17	Essai de cisaillement et éprouvette instrumentée	183
4.18	Essai de flexion et éprouvette instrumentée	183
4.19	Forme d'onde et spectrogramme pour un évènement de la famille 1	185
4.20	Analyse des pics de fréquence pour un évènement de la famille 1	185
4.21	Forme d'onde et spectrogramme pour un évènement de la famille 2	186
4.22	Analyse des pics de fréquence pour un évènement de la famille 2	186
4.23	Forme d'onde et spectrogramme pour un évènement de la famille 3	187
4.24	Analyse des pics de fréquence pour un évènement de la famille 3	187
4.25	Forme d'onde et spectrogramme pour un évènement de la famille 4	188
4.26	Analyse des pics de fréquence pour un évènement de la famille 4	188
4.27	Différents types de modes de ruine d'après (Hamdi, 2013)	189
4.28	Eprouvette S1, capteurs 1-2	192
4.29	Eprouvette H1, capteurs 3-4	192
4.30	Eprouvette S2 - capteurs 3-4	193
4.31	Eprouvette S3 - capteurs 1-2	193
4.32	Corrélogramme sur les individus de chaque famille obtenue	194
4.33	Corrélogramme sur la part de chaque famille obtenue	195
A1	Descripteurs des évènements acoustiques	205
A2	Estimation de l'énergie acoustique	206
A3	Exemples de signaux discrets et d'une activité acoustique continue	208
B1	Chaîne d'acquisition pour l'EA	209
B2	Capteur piézoélectrique - principe et cliché d'un nano30	210

B3	Propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu non dispersif (à gauche) et dispersif (à droite)	212
B4	Réflexion et transmission sous incidence normale	212
B5	Sensibilité du capteur S9208 (Mistras) pour différents couplants d'après (Theobald et al., 2008)	214
B6	Cliché d'un préamplificateur et du câble coaxial	216
B7	Différentes méthodes pour tester et calibrer des capteurs en EA	217
C1	Courbes caractéristiques des différentes fonctions de transfert pour un domaine fréquentiel allant de 0 à 2 [MHz] d'après (Sause, 2010)	220
C2	Cassé de mine HSU-Nielsen	221
C3	Influence de l'alignement des capteurs sur les formes d'onde enregistrées d'après (Kawamoto et al., 2010)	222
C4	Ondes de volume	224
C5	Ondes de surface	224
C6	Localisation linéaire entre deux capteurs	225
C7	Maillage pour localisation zonale	226
C8	Localisation à l'aide de plusieurs stations	227
C9	Méthode des hyperboles	227
C10	Détermination de la vitesse de phase	229
C11	Détermination de la vitesse de groupe	229
C12	Réglage du PDT	231
C13	HDT trop court	231
C14	Définition du HLT	232
C15	Filtres passe-haut, passe-bas et passe-bande	232
D1	Éprouvette S1	234
D2	Éprouvette S2	235
D3	Éprouvette S3	236
D4	Éprouvette S4	237
D5	Éprouvette S5	238
D6	Éprouvette S6	239
D7	Éprouvette S7	240
D8	Éprouvette S8	241
D9	Éprouvette S9	242
D10	Éprouvette S10	243
D11	Éprouvette S11	244
D12	Éprouvette S12	245
D13	Éprouvette H1	246

D14 Éprouvette H2	247
D15 Éprouvette H3	248
D16 Éprouvette H4	249
D17 Éprouvette H5	250

Liste des tableaux

1.1	Ordre de grandeur des pourcentages de constituants dans les différentes parois d'après Guitard (Guitard, 1987)	20
1.2	Propriétés élastiques des composants du bois d'après Borch (Borch et al., 2001)	21
1.3	Composition typique de bois résineux et feuillus (source cours Kaj Henricson)	21
1.4	Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques du bois, mesurées sur des petits échantillons sans défaut, d'après Triboulot (Triboulot and Trouy-Triboulot, 2012)	22
1.5	Température de transition pour différents polymères d'après Bernard (Bernard, 1990)	23
1.6	Formes d'ondes pour différents mécanismes d'endommagement	52
1.7	Valeurs de vitesses de propagation d'onde ultrasonores pour quelques essences de bois	54
1.8	Descripteurs courants en émission acoustique issus de la norme NFA 09-350	59
1.9	Descripteurs supplémentaires d'après les travaux de (Moevius et al., 2008) et (Sibil, 2011)	60
2.1	Conditionnement des éprouvettes	72
2.2	Caractéristiques des transducteurs disponibles	86
2.3	Paramètres d'acquisition des signaux acoustiques	88
2.4	Paramètres optimisés pour chacune des formules	100
3.1	Matrice des données acoustiques	119
3.2	Dispersion statistique des données géométriques et acoustiques pour les éprouvettes	122
3.3	Éprouvettes retenues pour la présentation des résultats	124
3.4	Dispersion statistique de la force maximale et de la raideur pour les éprouvettes sèches	127
3.5	Dispersion statistique de la force maximale et de la raideur pour les éprouvettes humides	127

3.6	Dispersion statistique de la cinétique de fissuration pour les éprouvettes sèches	130
3.7	Dispersion statistique de la cinétique de fissuration pour les éprouvettes humides	130
3.8	Dispersion statistique du taux de restitution d'énergie pour les éprouvettes sèches	132
3.9	Dispersion statistique du taux de restitution d'énergie pour les éprouvettes humides	132
3.10	Corrélation et valeur p pour les données géométriques	136
3.11	Corrélation et valeur p pour les données mécaniques et acoustiques	138
3.12	Taux de restitution d'énergie pour diverses éprouvettes obtenues par analyse d'image et par émission acoustique	155
4.1	Corrélation entre les amplitudes des évènements d'émission acoustique de chaque matériau et les mécanismes d'endommagement d'après (Bonnafous et al., 2009)	175
4.2	Valeurs moyennes de quelques caractéristiques de chaque famille pour l'ensemble des essais de traction	184
4.3	Valeurs moyennes de quelques caractéristiques de chaque famille pour l'ensemble des essais de cisaillement	184
4.4	Valeurs moyennes de quelques caractéristiques de chaque famille pour l'ensemble des essais de flexion	184
4.5	Résultats de la classification pour l'éprouvette S1 - capteurs 1 - 2	190
4.6	Résultats de la classification pour l'éprouvette S1 - capteurs 3 - 4	190
4.7	Résultats de la classification pour l'éprouvette H1 - capteurs 1 - 2	191
4.8	Résultats de la classification pour l'éprouvette H1 - capteurs 3 - 4	191
B1	Propriétés acoustiques pour plusieurs matériaux usuels d'après (Brancheriau, 2013)	213
B2	Influence du couplant sur l'évaluation de la vitesse de compression dans le sens tangentiel sur du pin à 12% d'humidité relative d'après (Bucur, 2006)	215

Bibliographie

- Aicher, S., Hofflin, L., and Dill-Langer, G. (2001). Damage evolution and acoustic emission of wood at tension perpendicular to fiber. *Holz als Roh und Werkstoff*, 59 :104–116.
- Akourri, O., Louah, M., Kifani, A., Gilgert, G., and Pluvinage, G. (2000). The effect of notch radius on fracture toughness IIc. *Engineering Fracture Mechanics*, 65(4) :491–505.
- Aljets, D., Chong, A., Wilcox, S., and Holford, K. (2012). Acoustic emission source location on large plate-like structures using a local triangular sensor array. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 30 :91–102.
- Almeida, G. (2006). *Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées*. PhD thesis.
- Ando, K., Hirashima, Y., Sugihara, M., Hirao, S., and Sasaki, Y. (2006). Microscopic processes of shearing fracture of old wood, examined using the acoustic emission technique. *The Japan Wood Research Society*, 52 :483–489.
- Ando, K. and Ohta, M. (1999). Variability of fracture toughness by the crack tip position in an annual ring of coniferous wood. *Journal of Wood Science*, 45(July 1999) :275–283.
- Ativitavas, N. (2002). *Acoustic emission signature analysis of failure mechanisms in fiber reinforced plastic structures*. PhD thesis, University of Texas at Austin.
- Aubagnac, C., Barbier, V., Corfdir, P., Doignon, G., Joineau, J.-Y., Le Roy, R., and Wendling, J.-C. (2008). Recommandations pour l’inspection détaillée des ouvrages en bois. Technical report, LCPC.
- Avril, S., Vautrin, A., and Surrel, Y. (2004). Grid Method : Application to the Characterization of Cracks. *Society for Experimental Mechanics*, 44 :37–43.
- Baensch, F. (2015). *Damage evolution in wood and layered wood composites monitored in situ bay acoustic emission, digital image correlation and synchrotron based tomographic microscopy*. PhD thesis, ETH Zurich.

- Bailly, A. and de Champs, J. (2012). Le Douglas, Un choix naturel pour la construction. Technical report, France Douglas.
- Barr, S. and Benzeggagh, M. L. (1994). On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene. *Composites Science and Technology*, 3538(94) :369–376.
- Beall, F. C. (2002). Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology*, 36(3) :197–212.
- Beguelin, P., Fond, C., and Kausch, H. (1998). The influence of inertial effects on the fracture of rapidly loaded compact tension specimens Part A : Loading and Fracture Initiation. *International Journal of Fracture*, 89 :85–102.
- Benabou, L. (2007). Kink Band Formation in Wood Species Under Compressive Loading. *Experimental Mechanics*, 48(5) :647–656.
- Berg, J.-E. and Gradin, P. A. (2000). Effect of temperature on fracture of spruce in compression, investigated by use of acoustic emission monitoring. *Journal of Pulp and Paper Science*, 26(8) :294–299.
- Bernard, F. (1990). *Éléments de rhéologie du bois*. Ctba edition.
- Besse, P. (2002). Analyse en Composantes Principales (ACP).
- Blahacek, M., Chlada, M., and Prevorovsky, Z. (2006). Acoustic Emission Source Location Based on Signal Features. *Advanced Materials Research*, 13-14 :77–82.
- Bohse, J. (2004). Acoustic emission examination of polymer-matrix composites. *Journal of Acoustic Emission*, 22 :208–223.
- Bonnafous, C., Touchard, F., Dever, C., and Alise, G. (2009). Analyse multi-échelle des mécanismes d ' endommagement de composites chanvre / époxy par émission acoustique .
- Borch, J., Lyne, M. B., Mark, R. E., and Habeger, C. (2001). *Handbook of Physical Testing of Paper*. Crc press edition.
- Brancheriau, L. (2013). *Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites*. PhD thesis.
- Brunner, A. J., Howald, M. T., and Niemz, P. (2006). Acoustic emission rate behavior of laminated wood specimens under tensile loading. *Journal of Acoustic Emission*, 24 :104–110.
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood*. Springer edition.
- Bucur, V., Lancelor, P., and Roge, B. (2002). Acoustic properties of wood in tridimensional representation of slowness surfaces. *Ultrasonic*, 40 :537–541.

- Bussiba, A., Kupiec, M., Ifergane, S., Piat, R., and Bohlke, T. (2007). Damage evolution and fracture events sequence in various composites by acoustic emission technique. *Composites Science and Technology*, 68 :1144–1155.
- Charcosset, J.-Y. (2012). Le Bouvet. *Le Bouvet*, pages 15–25.
- Chen, Z., Gabbitas, B., and Hunt, D. (2006). Monitoring the fracture of wood in torsion using acoustic emission. *Journal of Materials Science*, 41(12) :3645–3655.
- Chlada, M., Prevorovsky, Z., and Blahacek, M. (2010). EWGAE 2010. In *Neural network AE source location apart from structure size and material*, page 8.
- Clouston, P. (1989). *The Tsai-Wu Stregt Theory for Douglas-Fir laminated Veneer*. PhD thesis, The University of British Columbia.
- Conrad, M. P. C., Smith, G. D., and Fernlund, G. (2003). Fracture of solid wood : A review of structure and properties at different length scales. *Wood and Fiber Science*, 35(4) :570–584.
- Coureau, J. L., Morel, S., Gustafsson, P. J., and Lespine, C. (2006). Influence of the fracture softening behaviour of wood on load-COD curve and R-curve. *Materials and Structures*, 40(1) :97–106.
- Culjat, M. O., Singh, R. S., White, S. N., Neurgaonkar, R. R., and Brown, E. R. (2005). Evaluation of gallium-indium alloy as an acoustic couplant for high-impedance, high-frequency applications. *Acoustics Research Letters Online*, 6(3) :125.
- De Rosa, I. M., Santulli, C., and Sarasini, F. (2009). Acoustic emission for monitoring the mechanical behaviour of natural fibre composites : A literature review. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 40 :1456–1469.
- Degallaix, S. (2007). *Caractérisation expérimentale des matériaux : Propriétés physiques, thermiques et mécaniques*. Ppur presses polytechniques et universitaires romandes edition.
- Deschanel, S. (2005). *Dynamique des précurseurs de la rupture des matériaux hétérogènes : application aux mousses polymères vitreuses*. PhD thesis, INSA Lyon.
- Dogossy, G. and Czigány, T. (2006). Failure mode characterization in maize hull filled polyethylene composites by acoustic emission. *Polymer Testing*, 25(3) :353–357.
- D’Souza, D. P., Anson, L. W., and Chivers, R. C. (1989). Effects of matching layers on measurements of ultrasonic attenuation. *Acta Acustica united with Acustica*, 69(2) :88–92.
- Dubois, F. (1997). *Modélisation du comportement mécanique des milieux viscoélastiques fissurés - application au matériau bois*. PhD thesis, Université de Limoges.

- Dubois, F., Chazal, C., and Petit, C. (2002). Viscoelastic crack growth process in wood timbers : An approach by the finite element method for mode I fracture. *International Journal of Fracture*, 113(1) :367–388.
- Dubois, F., Méité, M., Pop, O., and Absi, J. (2012). Characterization of timber fracture using the Digital Image Correlation technique and Finite Element Method. *Engineering Fracture Mechanics*, 96 :107–121.
- Dugmore, K., Jonson, D., and Walker, M. (2002). A comparison of signal consistency of common ultrasonic couplants used in the inspection of composite structures. *Composite Structures*, 58(4) :601–603.
- Dunegan, H. and Harris, D. (1969). New nondestructive testing tool. *Ultrasonics*, pages 160–166.
- Dunegan, H., Harris, D., and Tatro, C. (1968). Fracture analysis by use of acoustic emission. *Engineering Fracture Mechanics*, 1 :105–122.
- Dzenis, Y. A. and Qian, J. (2001). Analysis of microdamage evolution histories in composites. *International Journal of Solids and Structures*, 38 :1831–1854.
- Eitzen, D. and Wadley, N. (1984). Acoustic Emission : Establishing th Fundamentals. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 89(1) :75–100.
- Fineberg, J., Gross, S. P., Marder, M., and Swinney, H. L. (1991). Instability in Dynamic Fracture. *Physical Review Letters*, 67(4) :457–462.
- Fleury, E. and Chiche, M. (2006). Le Bois dans la construction. Etude bibliographique. Technical report, CSTB.
- Franke, S., Franke, B., Schober, K.-U., and Rautenstrauch, K. (2006). Experimental verification of FE-Simulations of wood using photogrammetry. In *World Conference on Timber Engineering*, page 8.
- Gasparoux, J., Laux, D., Ferrandis, J.-Y., Attal, J., and Tordjeman, P. (2008). Large frequency range viscoelastic properties of honey. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 153(1) :46–52.
- Godin, N., Huguet, S., and Gaertner, R. (2005). Integration of the Kohonen’s self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites. *NDT & E International*, 38(4) :299–309.
- Godin, N., Huguet, S., and Gaertner, R. (2006). Influence of hydrolytic ageing on the acoustic emission signatures of damage mechanisms occurring during tensile tests on a polyester composite : Application of a Kohonen’s map. *Composite Structures*, 72 :79–85.
- Godin, N., Huguet, S., Gaertner, R., and Salmon, L. (2004). Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester

- composite using supervised and unsupervised classifiers. *NDT & E International*, 37 :253–264.
- Godin, N., Reynaud, P., Lamon, J., and Fantozzi, G. (2011). Emission acoustique et endommagement des composites : Intérêts et limites des techniques de reconnaissance de forme . Acoustic emission and composite : Interest and limitation of pattern recognition Methodologie. In *Journées Nationales sur les composites*, pages 1–10.
- Godin, N., R'mili, M., Reynaud, P., Fantozzi, G., and Fayolle, G. (2013). Apport de l' émission acoustique pour la modélisation de l' endommagement des composites à matrice céramique. In *Congrès Français de Mécanique*, number Cmc, pages 1–6.
- Gonçalves, R., Trinca, A. J., and Santos Ferreira, G. C. (2011). Effect of coupling media on velocity and attenuation of ultrasonic waves in Brazilian wood. *Journal of Wood Science*, 57(4) :282–287.
- Gregoire, D. (2008). *Initiation, Propagation, Arrêt et Redémarrage de fissures sous impact*. PhD thesis.
- Gril, J. (1988). *Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure*. PhD thesis, Université Paris VI.
- Groot, P. J. D., Wijnen, P. A. M., and Janssen, R. B. F. (1995). Realtime frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 55 :405–412.
- Guitard, D. (1987). *Mécanique du matériau bois et composites*. Epadues edition.
- Guo, Y.-J. and Weitsman, Y. J. (2001). A modified specimen for evaluating the mixed mode fracture toughness of adhesives. *International Journal of Fracture*, 107 :201–234.
- Gustafsson, P. J. and Larsen, H. (1987). International council for building research studies and documentation working comission W18A - timber structure. In *Design of endnotched beams*, page 9.
- Hamdi, S. E. (2013). *Contribution au traitement du signal pour le contrôle de santé in situ de structures composites : Application au suivi de température et à l' analyse des signaux d' émission acoustique*. PhD thesis, Université du Maine.
- Hedan, S., Valle, V., and Cottron, M. (2011). Calculation of J-integrals using experimental and numerical data : Influences of ratio (a/W) and the 3D structure. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(9) :1976–1985.
- Huguet (2002). *Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère*. PhD thesis.

- Huguet, S., Godin, N., Gaertner, R., Salmon, L., and Villard, D. (2002). Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester. *Composites Science and Technology*, 62 :1433–1444.
- Jakiela, S., Bratasz, L., and Kozłowski, R. (2007). Acoustic emission for tracing the evolution of damage in wooden objects Acoustic emission for tracing the evolution of damage in wooden objects. *Studies in Conservation*, 52(2) :101–109.
- Jin, H., Haldar, S., Bruck, H. A., and Lu, W.-Y. (2011). Grid Method for Microscale Discontinuous Deformation Measurement. *Experimental Mechanics*, 51(4) :565–574.
- Jinen, E. (1985). The determination of & fracture toughness values for short carbon fiber reinforced nylon 66 (frtp) by acoustic emission. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(I).
- Jinen, E. (1990). The fracture energy and acoustic emission of a short carbon fiber reinforced nylon 66 composite. *Engineering Fracture Mechanics*, 37(6) :1183–1194.
- Johnson, M. (2002). Waveform based clustering and classification of AE transients in composite laminates using principal component analysis. *NDT & E International*, 35.
- Kabir, M. (2001). Prediction of ultrasonic properties from grain angle. *Journal of institute of wood science*, 15(5).
- Kanninen, M. F. (1974). A dynamic analysis of unstable crack propagation and arrest in the DCB test specimen. *International Journal of Fracture*, 10(3) :415–430.
- Kawamoto, S., Kiguchi, M., Kataoka, Y., Matsunaga, M., Masahiko, K., Rosner, S., and Oumura, S. (2010). EWGAE 2010. In *Propagation of Acoustic Emission and Acousto-ultrasonic Waves in Wood Materials*, page 9.
- Kobayashi, A. S., Seo, K., Jou, J. Y., and U, Y. (1980). A dynamic analysis of modified compact-tension specimens using homalite . 100 and polycarbonate plates. *Experimental Mechanics*, pages 73–79.
- Kowalski, S. J. K. and Smoczkiwicz, A. (2004). Identification of wood destruction during drying. In *International Drying Symposium*, pages 1345–1351.
- Kumar, C. S., Santulli, C., Sarasini, F., and Stanley, A. J. (2013). Identification of failure modes in composites from clustered emission data using pattern. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(5) :25.
- Landis, E. N. and Whittaker, D. B. (2000). Acoustic emissions and the fracture energy of wood. In Ansari, F., editor, *Condition Monitoring of Materials and Structures*, pages 21–29. Asce edition.
- Larcher, N. (2014). *Contribution à la caractérisation des matériaux au comportement viscoélastique par méthode ultrasonore*. PhD thesis, University de Limoges.

- Le Gall, T., Godin, N., Racle, E., and Monnier, T. (2013). Modélisation des sources d' Emission Acoustique : aide à l' identification de paramètres pertinents pour décrire l' endommagement des matériaux composites Abstract :. In *Congrès Français de Mécanique*, pages 1–6.
- Le Huérou, J.-Y., Gindre, M., Amararene, A., Urbach, W., and Waks, M. (2003). Compressibility of N a n 0 Inclusions i n Complex Fluids by Ultrasound Velocity Measurements. *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 50(11) :1595–1600.
- Le Roux, J. (2013). La transformée de Fourier et ses applications (partie 1).
- Lee, S.-H., Quarles, S. L., and Schniewind, A. P. (1996). Wood fracture, acoustic emission, and the drying process Part 2. Acoustic emission pattern recognition analysis. *Wood Science and Technology*, 30(4) :283–292.
- Marec, A. (2008). *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*. PhD thesis.
- Marec, A., Thomas, J.-H., and Guerjouma, R. E. (2008). Contrôle de santé et caractéristion de l'endommagement de matériaux composites base polymère par analyse multivariable temporelle et temps-échelle de signaux d'émission acoustique. In *cofrend2008*, pages 1–6.
- Meinlschmidt, P. (2005). international Symposium of nondestructive testing of wood, Hannover , Germany (May 2. In *Thermographic detection of defects in wood and wood based materials*, page 6.
- Meite, M. (2012). *Caractérisation des paramètres de fissuration par un couplage corrélation d' images et éléments finis*. PhD thesis, Université de Limoges.
- Méité, M., Dubois, F., Pop, O., and Absi, J. (2013). Mixed mode fracture properties characterization for wood by digital images correlation and finite element method coupling. *Engineering Fracture Mechanics*, 105 :86–100.
- Meite, M., Pop, O., Dubois, F., and Absi, J. (2009). Evaluation of the integral invariants by optical techniques : Experimental and numerical approaches. In *Congrès Français de Mécanique*, pages 24–28.
- Mindess, S. and Bentur, A. (1986). Crack propagation in notched wood specimens with different grain orientations. *Wood Science and Technology*, 20 :145–155.
- Moevius, M., Godin, N., R'mili, M., Rouby, D., Reynaud, P., Fantozzi, G., and Farizy, G. (2008). Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiCf/[Si–B–C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part II : Unsupervised acoustic emission data clustering. *Composites Science and Technology*, 68 :1258–1265.

- Molero, M. and Segura, I. (20102). Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Ultrasonic*, 5036 :824–828197–212.
- Molyneux, J. B. and Schmitt, D. R. (1999). First-break timing : Arrival onset times by direct correlation. *Geophysics*, 64(5) :1492–1501.
- Morel, S. (1998). *Effet d'échelle dans la rupture d'un matériau hétérogène : le bois*. PhD thesis.
- Morel, S., Dourado, N., and Valentin, G. (2005). Wood : a quasibrittle material R-curve behavior and peak load evaluation. *International Journal of Fracture*, 131(4) :385–400.
- Moulart, R., Rotinat, R., Pierron, F., and Lerondel, G. (2007). On the realization of microscopic grids for local strain measurement by direct interferometric photolithography. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(12) :1131–1147.
- Moutou Pitti, R. (2008). *Découplage des modes mixtes de rupture dans les matériaux viscoélastiques orthotropes : modélisation et expérimentation*. PhD thesis, Université de Limoges.
- Moutou Pitti, R., Dubois, F., and Pop, O. (2011). A proposed mixed-mode fracture specimen for wood under creep loadings. *International Journal of Fracture*, 167 :195–209.
- Mzabi, S. (2010). *Caractérisation et analyse des mécanismes de fracture en fatigue des élastomères chargés*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- Nadeau, J. S., Bennett, R., and Fuller, E. R. (1982). An explanation for the rate-of-loading and the duration-of-load effects in wood in terms of fracture mechanics. *Journal of Materials Science*, 17(10) :2831–2840.
- Natterer, J., Götz, K., Hoor, D., and Möhler, K. (1987). *Construire en bois : choisir, concevoir, réaliser*. Editions du Moniteur.
- Natterer, J., Sandoz, J., Rey, M., and Fiaux, M. (2004). *Construction en bois : matériau, technologie et dimensionnement*. Traité de génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Navi, P. and Sedighi-Gilani, M. (2006). Mode I crack propagation in softwood , microanalyses and modeling. In *European Conference of Fracture*, page 7.
- Nechad, H. (2004). *Evaluation de l' endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante*. PhD thesis, INSA Lyon.
- Nepveu, G. (1984). Variabilité génétique de la qualité du bois chez l'épicéa et le douglas. *Revue forestière française*, 4 :303–312.

- Nepveu, G. and Blachon, J.-L. (1989). Largeur de cerne et aptitude à l'usage en structure de quelques conifères ; : Douglas, Pin Sylvestre, Pin Maritime, Epicea de Sitka, Epicea Commun, sapin Pectiné. *Revue Forestière Française*, 6 :497–506.
- Newman R, H. and Melton L, D. (1994). Solid-state ^{13}C NMR investigation of molecular ordering in the cellulose of apple cell walls. *Journal of agricultural and food chemistry (Print)*, 42(7) :1402–1406.
- Ni, Q.-Q. and Iwamoto, M. (2002). Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 69(6) :717–728.
- Ni, Q.-Q. and Jinen, E. (1997). Fracture behavior and acoustic emission in bending tests on single-fiber composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 56(6) :1–5.
- Nicolotti, G., Socco, L. V., Martinis, R., Godio, A., and Sambuelli, L. (2003). Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Journal of Arboriculture*, 29(2) :66–78.
- Nielsen, A. (1989). Acoustic emission from steel structures. *Journal of Acoustic Emission*, 8 :557–561.
- Nishimura, T. (2005). Experimental and numerical evaluation of crack arresting capability due to a dimple. *Journal of engineering materials and technology*, 127(2) :244–250.
- Norimoto, M. and Gril, J. (1989). Wood bending using microwave heating. *International Microwave Power Institute*, 24(4) :203–212.
- Oliveira, J., Demoura, M., Silva, M., and Morais, J. (2007). Numerical analysis of the MMB test for mixed-mode I/II wood fracture. *Composites Science and Technology*, 67(9) :1764–1771.
- Pappas, Y., Kontsos, A., Loutas, T., and Kostopoulos, V. (2004). On the characterization of continuous fibres fracture by quantifying acoustic emission and acousto-ultrasonics waveforms. *NDT & E International*, 37(5) :389–401.
- Park, S., Venditti, R., Abrecht, D., Jameel, H., Pawlak Joel, and Lee, J. (2007). Surface and pore structure modification of cellulose fibers through cellulase treatment. *Journal of applied polymer science*, 103(6) :3833–3839.
- Peters, F. and Petit, L. (2003). A broad band spectroscopy method for ultrasound wave velocity and attenuation measurement in dispersive media. *Ultrasonics*, 41 :357–363.
- Philippidis, T., Nikolaidis, V., and Anastassopoulos, A. (1998). Damage characterization of carbon/carbon laminates using neural network techniques on AE signals. *NDT & E International*, 31(5) :329–340.
- Pollock, A. A. (1973). Acoustic emission - 2 : Acoustic emission amplitudes. *Non-Destructive Testing*, pages 264–269.

- Pomponi, E. and Vinogradov, A. (2013). A real-time approach to acoustic emission clustering. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 40(2) :791–804.
- Qi, G. (2000). Wavelet-based AE characterization of composite materials. *NDT & E International*, 33(3) :133–144.
- Radon, J. and Pollock, A. A. (1972). Acoustic emissions and energy transfer during crack propagation. *Engineering Fracture Mechanics*, 4 :295–310.
- Rafsanjani, A., Derome, D., Wittel, F. K., and Carmeliet, J. (2012). Computational up-scaling of anisotropic swelling and mechanical behavior of hierarchical cellular materials. *Composites Science and Technology*, 72(6) :744–751.
- Ramirez-Jimenez, C., Papadakis, N., Reynolds, N., Gan, T., Purnell, P., and Pharaoh, M. (2004). Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event. *Composites Science and Technology*, 64(12) :1819–1827.
- Read, D. T., Dally, J. W., and Szanto, M. (1993). Scanning moire at high magnification using optical methods. *Experimental Mechanics*, 33(June) :110–116.
- Refahi Oskouei, A., Heidary, H., Ahmadi, M., and Farajpur, M. (2012). Unsupervised acoustic emission data clustering for the analysis of damage mechanisms in glass/polyester composites. *Materials & Design*, 37 :416–422.
- Reiterer, A. and Stanzl-Tschegg, S. E. (2002). The influence of moisture content on the mode I fracture behaviour of sprucewood. *Journal of Materials Science*, 37 :4487–4491.
- Reiterer, A., TStanzl-Tschegg, S., and Tschegg, E. (2000). Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood. *Wood Science and Technology*, 34(6509) :417–430.
- Ritschel, F., Brunner, A. J., and Niemz, P. (2013). Nondestructive evaluation of damage accumulation in tensile test specimens made from solid wood and layered wood materials. *Composite Structures*, 95 :44–52.
- Roget, J. (1990). Émission acoustique. *Techniques de l'ingénieur*, pages 1–11.
- Roig, F. (2011). *Transitions et dynamique relaxationnelle de polymères issus de la paroi végétale*. PhD thesis.
- Ross, R. J., Brashaw, B. K., and Pellerin, R. F. (1998). Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal*, 48(1) :14–19.
- Saha, S. and Bandyopadhyay, S. (2012). Some connectivity based cluster validity indices. *Applied Soft Computing*, 12(5) :1555–1565.
- Saitta, S., Raphael, B., and Smith, I. (2007). A bounded index for cluster validity. In *Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition*, page 9.

- Sambuelli, L., Socco, L. V., and Godio, A. (2003). Ultrasonic, electricity and radar measurements for living trees assessment. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata (Bulletin of Theoretical and Applied Geophysicist)*, 44 :1–27.
- Saporta, G. (2006). *Probabilités, analyse des données et statistique*. Technip edition.
- Sause, M. (2010). *Identification of failure mechanisms in hybrid materials utilizing pattern recognition techniques applied to acoustic emission signals*. PhD thesis.
- Schniewind, A. P., Quarles, S. L., and Lee, S.-H. (1996). Wood fracture, acoustic emission, and the drying process Part 1. Acoustic emission associated with fracture. *Wood Science and Technology*, 30(4) :273–281.
- Scida, D., Assarar, M., and Ayad, R. (2011). Effet de l'humidité sur le comportement mécanique des composites à fibres de lin. In *JNC 17*, pages 1–9.
- Shannon, C. E. (1998). Communication in the Presence of Noise. In *IEEE*, volume 86.
- Shin, F., Xian, X.-J., Zheng, W.-P., and Yipp, M. W. (1989). Analyses of the mechanical properties and microstructure of bamboo-epoxy composites. *Journal of Materials Science*, 24 :3483–3490.
- Sibil, A. (2011). *Comportement thermomécanique et endommagement de nouveaux réfractaires verriers à très haute teneur en zircon : investigation des mécanismes de fissuration par EBSD et émission acoustique*. PhD thesis.
- Silva, M., de Moura, M., and Morais, J. (2006). Numerical analysis of the ENF test for mode II wood fracture. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 37(9) :1334–1344.
- Svobodova, E. and Svoboda, V. (2012). Possibilities of Acoustic Emission Method for Evaluation of Characteristics Processes in Wood. In *30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission University*, pages 1–9.
- Tenchev, R. and Falzon, B. (2007). A correction to the analytical solution of the mixed-mode bending (MMB) problem. *Composites Science and Technology*, 67(3-4) :662–668.
- Theobald, P., Zeqiri, B., and Avison, J. (2008). Couplants and their influence on AE sensor sensitivity. *Journal of Acoustic Emission*, 26 :91–97.
- Triboulot, P. and Trouy-Triboulot, M.-C. (2012). Techniques de l'Ingénieur Matériau bois Structure et caractéristiques. *Techniques de l'ingénieur*, 33(0).
- Tschegg, E. K., Reiterer, A., Pleschberger, T., and Stanzl-Tschegg, S. (2001). Mixed mode fracture energy of sprucewood. *Journal of Materials Science*, 36 :3531–3537.
- Uenishi, K. and Rossmanith, H. P. (2002). Stability of dynamically propagating cracks in brittle materials. *Acta Mechanica*, 156(3-4) :179–192.

- Valentin, G. and Caumes, P. (1989). Crack propagation in mixed mode in wood : a new specimen. *Wood Science and Technologie*, 23 :43–53.
- Varner, D., Cerny, M., Varner, M., and Fajman, M. (2012). Possible sources of acoustic emission during static bending test of wood specimen. *Acta Universitatis Agriculturae Mendeliana Brunensis*, LX :199–206.
- Vervish-Fortune, I. (2009). *Sité de la technique d'émission acoustique à la corrosion des armatures dans le béton*. PhD thesis, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Vincent, A. (1987). Influence of wearplate and coupling layer thickness on ultrasonic velocity measurement. *Ultrasonics*, 25(4) :237–243.
- Wang, X. (2008). Effects of Size and Moisture on Stress Wave E-rating of Structural Lumber. In *10th world conference on timber engineering*, page 2008.
- Wevers, M. (1997). Listening to the sound of materials acoustic emission for the analysis of material behaviour. *NDT&E International*, 30(2) :99–106.
- Xu, Y. and Yuan, H. (2009). Computational modeling of mixed-mode fatigue crack growth using extended finite element methods. *International Journal of Fracture*, 159(2) :151–165.
- Yoshihara, H. (2013). Initiation and propagation fracture toughness of solid wood under the mixed Mode I/II condition examined by mixed-mode bending test. *Engineering Fracture Mechanics*, 104 :1–15.
- Yoshihara, H. and Ohta, M. (2000). Measurement of mode II fracture toughness of wood by the end-notched flexure test. *Journal of Wood Science*, 46(4) :273–278.
- Žalik, K. R. and Žalik, B. (2011). Validity index for clusters of different sizes and densities. *Pattern Recognition Letters*, 32(2) :221–234.

Analyse du processus de fissuration dans le bois sous sollicitations mécanique et climatique : apports de EA

Résumé : La caractérisation et l'évolution de l'endommagement dans le bois sont deux éléments qui doivent être considérés lors du développement d'outils de diagnostic et de surveillance des structures. Selon le type de mécanisme que l'on souhaite étudier ou mettre en évidence, plusieurs types d'essais et plusieurs outils de diagnostic sont disponibles. L'Émission Acoustique (EA) est la méthode que nous avons retenue car elle est adaptée pour caractériser le comportement d'un matériau en suivant l'évolution d'une fissuration. D'un emploi courant dans l'étude des matériaux composites, l'EA est encore peu utilisée dans l'étude du bois.

Sur la base d'éprouvettes DCB à inertie constante sollicitées en mode I, l'EA nous a permis d'établir une corrélation entre l'énergie acoustique et l'énergie mécanique de fissuration. Par l'emploi d'un nombre de transducteurs adéquats, judicieusement positionnés, il nous a été possible d'établir l'évolution de la pointe de fissure et de remplacer, lorsque qu'elle n'était pas disponible, l'imagerie.

Les signaux d'EA sont aussi représentatifs de plusieurs modes d'endommagement (rupture de fibre, décohésion, etc.). Par une analyse statistique il est possible de remonter et de quantifier la part de chacun d'eux lors d'un essai.

Mots clés : Douglas, Mode I, Émission Acoustique, Analyse d'Images, Analyse par Composantes Principales, Classification, Taux de Restitution d'Énergie.

Crack analysis in wood under mechanical and climatic loadings : contribution of Acoustic Emission

Abstract : Understanding failure mechanisms of construction materials as well as their damage evolution are two key factors to improve assessment tools of structures. Depending on failure modes to be highlighted, and studied, several tests methods, and analysis tools have been developed, in particular acoustic emission technique. This latter is an experimental tool well suited for characterizing material behavior by monitoring fracture process. Despite the wide use of acoustic emission technique to characterize and monitor damage evolution of composite materials, few research studies focused on using acoustic emission technique to characterize the mechanical behavior of wood materials.

Based on mechanical tests on DCB samples, we took steps to establish, with AE, good correlations between acoustic energy and the energy of fracture mechanics. Through the employment of a suitable number of transducers, well positioned, it is possible to establish the evolution of the crack tip and replace cameras when they are not available.

AE signals are a signature of various damage mechanism (fiber failure, debonding, etc.). With statistical analysis, it is possible to trace and quantify the contribution of each family during a test.

Keywords : Douglas, Mode I fracture, Acoustic Emission, Image Analysis, Principal Component Analysis, Clustering, restoration level of critical energy.

GEMH

Boulevard Jacques Derche - 19300 Egletons

