



Contribution au suivi par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois

Imen Yahyaoui

► To cite this version:

Imen Yahyaoui. Contribution au suivi par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois. Matériaux. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. Français. NNT : 2017TOU30266 . tel-01940972

HAL Id: tel-01940972

<https://theses.hal.science/tel-01940972>

Submitted on 30 Nov 2018

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Imen YAHYAOU

Le 21 décembre 2017

Titre :

Contribution au suivi par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Génie mécanique, mécanique des matériaux

Unité de recherche :

Institut Clément Ader (ICA), UMR CNRS 5312

Directeur(s) de Thèse :

Xiaojing GONG

Membres du jury :

Pierre-Jean MEAUSOONE
Laurent GAILLET
Joseph MOYSAN
Florent EYMA
Xiaojing GONG
Marianne PERRIN

Professeur des Universités à l'ENSTIB
Directeur de recherche à l'IFSTTAR
Professeur des Universités à AMU
Maître de Conférences HDR à l'IUT de Tarbes
Professeur des Universités à l'IUT de Tarbes
Maître de Conférences à l'IUT de Tarbes

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Directeur
Co-directeur

Je dédie cette thèse à mon défunt père Ali YAHYAOUÏ qui a été le premier à m'encourager à aller si loin dans les études. Il m'a inculqué le goût du travail, de la rigueur et de l'ambition. Parce que tu m'avais toujours soutenu, j'ai voulu mener ce travail à terme pour que tu sois fier de moi.

Merci баба, merci pour tout.

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au sein de l'Institut Clément Ader (ICA) sur le site de Tarbes grâce à une allocation de l'école doctorale MEGeP.

Je désire exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de thèse, Madame Xiaojing Gong, Professeur des Universités à l'IUT de Tarbes, pour m'avoir accueillie au sein de son équipe. Je lui suis également reconnaissante pour l'aide compétente qu'elle m'a apportée et son encouragement pour finir ce travail. Son œil critique m'a été très précieux pour améliorer la qualité des différentes parties de ce travail. Ses relectures et corrections de cette thèse ont été très appréciables.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon encadrante de thèse, Madame Marianne Perrin, Maître de Conférences à l'IUT de Tarbes, pour toute son aide. Je suis ravie d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, elle a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse. Sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance m'ont beaucoup appris. Cette thèse lui doit beaucoup. Pour tout cela un grand merci.

Mes remerciements vont également à Monsieur Pierre-Jean Meausoone, Professeur des Universités à l'ENSTIB, et à Monsieur Laurent Gaillet, Directeur de recherche à l'IFSTTAR, pour avoir accepté de rapporter ce travail.

Je remercie également Monsieur Joseph Moysan, Professeur des Universités à l'Université d'Aix Marseille, et Monsieur Florent Eyma, Maître de Conférences HDR à l'IUT de Tarbes, pour leur participation au jury de thèse.

Mes vifs remerciements vont encore à Monsieur Florent Eyma pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée pour l'usinage des éprouvettes et la mise en place des essais mécaniques ainsi que pour les conseils précieux qu'il m'a donnés durant ces années de thèse. Je remercie également Madame Marie-Laetitia Pastor, Maître de Conférences à l'IUT de Tarbes pour l'aide précieuse qu'elle m'a apportée pour la mise en place des essais de thermographie infrarouge. Je voudrais aussi exprimer ma gratitude à Monsieur Pierre Larricq, Maître de Conférences à l'IUT de Tarbes, à Monsieur Frédéric Le Roy, technicien du département GMP à l'IUT de Tarbes et à Monsieur Emmanuel Laugt, technicien du département GII à l'IUT de Tarbes, pour leurs interventions techniques durant mes essais. Je voudrais remercier également Monsieur Arthur Cantarel, Maître de Conférences à l'IUT de Tarbes, pour sa gentillesse et ses encouragements ainsi que pour son aide et ses conseils précieux durant mon enseignement de monitorat.

Je me dois de remercier mes collègues doctorants, pour leur amitié et pour les agréables moments que l'on a passé ensemble pendant ces trois ans. Je remercie aussi tous les enseignants et le personnel administratif du département GMP à l'IUT de Tarbes pour leur bienveillance et leur gentillesse.

Mes pensées vont finalement à l'ensemble de mes proches. Leur amour, leur soutien, et leur confiance m'ont aidé à surmonter bien des obstacles. Je pense naturellement à ma mère si précieuse. Elle m'a toujours encouragée, même au plus fort de sa maladie, elle me disait « concentre toi sur ton travail, ne t'inquiète pas pour moi ». Elle m'a donné la force intérieure pour aller au bout de ce parcours. Ma grande reconnaissance s'adresse aussi à mon mari, ma moitié. Merci Aymen pour ta patience, tes sacrifices, ton écoute et tes encouragements pendant toutes mes années d'études supérieures. Merci d'avoir supporté mes périodes de râlage depuis huit ans. Je voudrais témoigner également mon affection à mes trois sœurs, Rim, Olfa et Sondes qui m'ont toujours soutenue pendant ce long parcours.

Table des matières

Remerciements	3
Introduction générale.....	9
Chapitre 1 : Bibliographie	12
I. Structure multi-matériaux à base de bois.....	12
I.1- Introduction	12
I.2- Le matériau bois	12
I.2.1-Structure multi-échelles	12
I.2.2- Propriétés mécaniques	17
I.2.3- Conclusion	21
I.3- Utilisation du bois en construction.....	21
I.3.1- Le bois en tant que matériau de construction	21
I.3.2- Ouvrages d'art en bois	24
I.3.3- Pathologies des structures en bois	28
I.3.4- Conclusion	32
I.4- Structures multi-matériaux à base de bois.....	32
I.4.1- Renforcement du bois par des matériaux composites	32
I.4.2- Conclusion	37
II- Suivi de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois	38
II.1- Introduction.....	38
II.2- Méthodes disponibles pour le suivi et l'évaluation des ouvrages d'art	38
II.3- Suivi de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois par EA.....	39
II.3.1- Présentation de la méthode EA.....	39
II.3.2- Suivi de l'endommagement du bois par EA	42
II.3.3- Suivi de l'endommagement des matériaux composites par EA	50
III- Conclusion.....	53
Chapitre 2 : Matériels et méthodes.....	54
I- Introduction	54
II- Les essences choisies et leurs caractéristiques	54
II.1- Introduction.....	54
II.2- Le Douglas	55
II.3- Le sapin pectiné.....	57
II.4- Le peuplier	58
II.5- Conclusion	60

III. Essais mécaniques.....	60
III.1- Introduction	60
III.2- Essais de traction parallèle au fil	60
III.2.1- Eprouvettes	60
III.2.2- Conditions d'essais et paramètres mesurés.....	62
III.3- Essais de compression parallèle au fil.....	63
III.3.1- Eprouvettes	63
III.3.2- Conditions d'essais et paramètres mesurés.....	64
III.4- Essais de flexion 4 points.....	65
III.4.1- Eprouvettes	65
III.4.2- Conditions d'essais et paramètres mesurés.....	66
III.4- Conclusion.....	67
IV- Instrumentation des essais par les méthodes CND	68
IV.1- Introduction	68
IV.2- Emission acoustique	68
IV.2.1- Choix du matériel d'EA	68
IV.2.2- Positionnement des capteurs.....	70
IV.2.3- Réglage des paramètres d'acquisition	77
IV.2.4- Validation de la mise en place du système d'EA et mesure de la vitesse de propagation.....	77
IV.3- Thermographie infrarouge	79
IV.3.1- Dispositif d'acquisition.....	79
IV.3.2- Réglage des paramètres d'acquisition	79
IV.4- Micro-tomographie aux rayons X.....	80
IV.4.1- Principe physique	80
IV.4.2- Matériel de mesure	81
IV.5. Instrumentation des essais : conclusion.....	82
V- Conclusion.....	82
Chapitre 3 : Suivi de l'endommagement du matériau bois sous sollicitation de traction parallèle au fil	83
I- Introduction	83
II- Endommagement du Douglas sous sollicitation de traction parallèle au fil.....	89
II.1- Introduction.....	89
II.2- Comportement traction et propriétés mécaniques associées	89
II.3- Observation des faciès de rupture	91
II.4- Analyse de l'activité acoustique.....	92

II.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique	94
II.6- Classement des données acoustiques	95
II.7- Essais Complémentaires	101
II.7.1- Essais arrêtés	101
II.7.2- Suivi par EA et par TI d'un essai entier de traction	103
II.9- Conclusion	107
III- Endommagement du sapin pectiné sous sollicitation de traction parallèle au fil	109
III.1- Introduction	109
III.2- Comportement en traction et propriétés mécaniques associées	109
III.3- Observation des faciès de rupture	110
III.4- Analyse de l'activité acoustique	111
III.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique	113
III.6- Classement des données acoustiques	114
III.7- Essais complémentaires	119
III.7.1- Essais arrêtés	119
III.7.2- Suivi par EA et par TI d'un essai entier de traction	121
III.9- Conclusion	122
IV- Endommagement du peuplier sous sollicitation de traction parallèle au fil	123
IV.1- Introduction	123
IV.2- Comportement en traction et propriétés mécaniques associées	123
IV.3- Observation des faciès de rupture	124
IV.4- Analyse de l'activité acoustique	125
IV.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique	127
IV.6- Classement des données acoustiques	128
IV.7- Essais complémentaires	132
IV.8- Conclusion	133
V- Comparaison entre les trois essences	134
VI- Conclusion	137
Chapitre 4 : Suivi de l'endommagement du matériau bois sous sollicitation de compression parallèle au fil	138
I- Introduction	138
II- Endommagement du Douglas sous sollicitation de compression longitudinale	141
II.1- Introduction	141
II.2- Comportement en compression et propriétés mécaniques associées	141
II.3- Observation des faciès de rupture	143

II.4- Mécanismes de rupture des éprouvettes de Douglas sollicitées en compression parallèle au fil	145
II.5- Analyse de l'activité acoustique	147
II.6- Classement des données acoustiques	149
II.7- Comparaison des résultats avec les autres éprouvettes	157
II.8- Conclusion	161
III- Endommagement du sapin pectiné sous sollicitation de compression parallèle au fil	163
III.1- Introduction	163
III.2- Comportement en compression et propriétés mécaniques associées	163
III.3-Observation des faciès de rupture.....	165
III.4- Mécanismes de rupture des éprouvettes de sapin pectiné sollicitées en compression parallèle au fil	167
III.5- Analyse de l'activité acoustique	167
III.6- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique	169
III.7- Classement des données acoustiques	170
III.8- Comparaison des résultats avec les autres éprouvettes	178
III.9- Conclusion	180
IV- Endommagement du peuplier sous sollicitation sous sollicitation de compression parallèle au fil	182
IV.1- Introduction	182
IV.2- Comportement en compression et propriétés mécaniques associées	182
IV.3- Observation des faciès de rupture.....	184
IV.4- Mécanismes d'endommagement des éprouvettes de peuplier sollicitées en compression parallèle au fil	186
IV.5- Analyse de l'activité acoustique.....	186
IV.7- Classement des données acoustiques.....	189
IV.8- Comparaison des résultats avec les autres éprouvettes.....	194
IV.9- Conclusion	197
V- Comparaison entre les trois essences	198
VI- Conclusion	202
Chapitre 5 : Suivi de l'endommagement du matériau bois sous sollicitation de flexion.....	203
I- Introduction	203
II- Endommagement du Douglas sous sollicitation de flexion	205
II.1- Introduction.....	205
II.2- Comportement en flexion et propriétés mécaniques associées.....	205
II.3- Observation des faciès de rupture	207
II.4- Analyse de l'activité acoustique	210

II.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique	212
II.6- Classement des données acoustiques	214
II.7- Conclusion	218
III- Endommagement du sapin pectiné sous sollicitation de flexion.....	220
III.1- Introduction	220
III.2- Comportement en flexion et propriétés mécaniques associées	220
III.3- Observation des faciès de rupture.....	221
III.4- Analyse de l'activité acoustique	223
III.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique	225
III.6- Classement des données acoustiques	226
III.7- Conclusion	230
IV- Endommagement du peuplier sous sollicitation de flexion.....	231
IV.1- Introduction	231
IV.2- Comportement en flexion et propriétés mécaniques associées	231
IV.3- Observations des faciès de rupture	232
IV.4- Analyse de l'activité acoustique.....	234
IV.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique	236
IV.6- Classement des données acoustiques.....	237
IV.7- Conclusion	244
V- Comparaison de la réponse acoustique recueillie durant les essais en flexion 4-points pour les trois essences.....	245
VI- Comparaison de la réponse acoustique recueillie en flexion, traction et compression ...	247
VII- Conclusion	248
Conclusion générale	250
Perspectives.....	251
Références	253
Annexe 1	264
Annexe 2	265
Annexe 3	268
Annexe 4	270
Résumé	273

Introduction générale

Dans un contexte de développement durable, l'utilisation du bois est de plus en plus répandue dans le domaine de la construction. En effet, le bois est une ressource renouvelable à faible consommation d'énergie qui permet de piéger le CO₂ pendant la durée de vie des structures. Afin de diminuer l'effet de serre engendré principalement par le dioxyde de carbone, la France s'est dotée d'une politique de développement durable via l'application de plusieurs protocoles. Parmi ces derniers, la loi sur l'air promulguée le 31 décembre 1996 qui contient un paragraphe concernant l'utilisation du matériau bois dans les constructions nouvelles : « **Pour répondre à l'objectif de la précédente loi, un décret en conseil d'état fixe les conditions dans lesquelles certaines constructions nouvelles devront comporter une quantité minimale de matériaux en bois** » (loi numéro 961236, titre VII, article 21-5). Dans le même contexte, le protocole de Kyoto de 1997, via l'application d'une charte, vise à augmenter les proportions de bois dans le domaine de la construction (Ghossein 2004).

Bien que l'utilisation du bois demeure une solution écologique, l'intégration de ce matériau dans les structures demeure limitée en raison de son comportement complexe (forte anisotropie, hétérogénéité, sensibilité à la variation de l'humidité et à la température, propriétés mécaniques limitées...). Afin de dépasser ces limitations, des structures hybrides ont été développées ces dernières décennies. Parmi ces structures hybrides, on retrouve les ponts mixtes bois-béton (pont du vallon de Riou de Lantosque, pont de Cognin, pont de Lure). De plus, le projet de recherche européen NR2C (New Road Construction Concept) dévolu aux ponts du futur et piloté par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a permis de démontrer l'intérêt mécanique de nouveaux tabliers bois/béton/composites (Ben Mekki et al. 2007). Ces structures multi-matériaux à base de bois sont à la fois originales et mécaniquement prometteuses. Chaque matériau a un rôle important dans la performance de la structure. Le remplacement des matériaux classiques (acier, béton) par ces structures hybrides est motivé par l'allègement de la structure à propriétés mécaniques égales. En revanche, l'utilisation des structures multi-matériaux à base de bois est encore récente. Cela se traduit par une certaine méconnaissance de leur comportement et notamment vis-à-vis de la présence d'endommagement pouvant conduire à une dégradation de leurs propriétés mécaniques et éventuellement à leur rupture (Nguyen 2010).

Par mesure de sécurité, il est intéressant de détecter ces endommagements dès leurs initiations afin de mettre en place un système de maintenance adéquat. Dans cette optique, il est nécessaire d'utiliser une technique de contrôle non-destructif permettant de déterminer l'état de santé de la structure et de prédire l'évolution de l'endommagement. Dans ce contexte, l'émission acoustique (EA) semble une technique intéressante puisqu'elle permet de suivre en continu la réponse de la structure à des contraintes mécaniques ou environnementales appliquées. En outre, l'EA permet aussi la détection précoce des défauts évolutifs, la localisation des sources acoustiques ainsi que la caractérisation et l'identification de différents mécanismes d'endommagement. Pour réussir l'identification et la caractérisation des mécanismes d'endommagement de ces structures multi-matériaux à base de bois, le suivi de chaque matériau isolé est primordial. Plusieurs travaux ont été consacrés à l'identification par EA des mécanismes d'endommagement des matériaux composites (Benzeggagh et al. 1992 ; Chen et al. 1992 ; Huguet 2012 ; Kostopoulos et al. 2007 ; Godin et al. 2011 ; Munoz 2015) et du béton (Otsuka et Date 2000 ; Wu et al. 2001 ; Landis et Baillon 2002 ; Hadjab et al. 2004 ; Berbaoui 2010 ; Saliba 2012). En revanche, l'utilisation de cette technique pour le suivi de l'endommagement du matériau bois n'a pas connu le même développement que pour

les matériaux composites et le béton. Dans la littérature, il existe quelques travaux ayant étudié l'endommagement du matériau bois par la méthode d'EA (Ansell 1982 ; Vautrin et Harris 1987 ; Reiterer et al. 2000 ; Chen et al. 2006 ; Varner et al. 2012 ; Baensch 2015 ; Lamy 2016). Les investigations sont très intéressantes mais loin d'être suffisantes pour fournir des conclusions convaincantes. En outre, l'analyse des signatures acoustiques corrélées aux mécanismes d'endommagement du matériau bois a très peu été étudiée dans la littérature. Donc, avant de s'attaquer à la problématique des structures multi-matériaux collées, il est primordial d'analyser le potentiel de la méthode d'émission acoustique appliquée au matériau bois et d'identifier les paramètres influençant l'activité acoustique sous chargement. Dans ce cadre, ce travail de recherche est consacré au suivi par EA de l'endommagement du matériau bois.

Si l'objectif affiché est l'utilisation de l'émission acoustique pour la surveillance des structures, un passage par des manipulations en laboratoire est nécessaire afin de valider les protocoles de mise en place. Une démarche consistant à travailler sur trois essences de bois soumises à trois types de sollicitations a été mise en place. Cette démarche a pour objectifs :

- 1- Comprendre quel est l'impact de l'essence sur la réponse acoustique
- 2- Comprendre comment le mode de sollicitation peut également influencer cette réponse.

Ce travail de thèse va donc permettre :

- de suivre l'évolution de l'endommagement à différents stades de chargement à travers une analyse conventionnelle de l'activité acoustique.
- d'identifier la signature acoustique de différents mécanismes d'endommagement pour les trois essences sous différentes sollicitations à travers une analyse statistique multi-variables en utilisant des outils mathématiques de reconnaissance de forme (algorithme des k-moyennes).
- d'établir les scénarios d'endommagement de chaque essence sous différents types de sollicitations.
- de comparer les réponses acoustiques de chaque essence sous différentes sollicitations.

A moyen terme, l'identification et la caractérisation expérimentale des mécanismes d'endommagement de ces différentes essences soumises à différentes sollicitations permettra d'alimenter les modèles d'endommagement et de déterminer les différents critères de rupture.

La rédaction de ce mémoire s'organise donc autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre est dédié à la revue de la bibliographie. Nous présentons dans une première partie de ce chapitre le matériau bois et son utilisation dans la construction des ouvrages d'art ainsi que les différentes pathologies développées par ces structures en bois. Ensuite, nous présentons l'état de l'art du renforcement du matériau bois par d'autres types de matériaux pour obtenir ce que l'on appelle des structures multi-matériaux. Dans une deuxième partie, nous présentons les méthodes de contrôle non-destructif ainsi que les méthodes de suivi utilisées pour le suivi et l'évaluation des ouvrages d'art. Ensuite, nous étudions la technique de l'émission acoustique et son application sur les matériaux composites et le matériau bois.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons dans un premier temps les trois essences étudiées ainsi que les conditions des trois essais mécaniques réalisés dans cette étude. Dans un second temps, nous présentons le protocole expérimental mis en place pour le suivi en continu de l'endommagement des trois essences de bois sous trois sollicitations quasi-statiques (traction, compression et flexion). Dans cette partie, des études préliminaires sur le choix des capteurs appropriés pour le matériau bois ainsi que sur le bon positionnement de ces capteurs sur les différents types d'éprouvettes sont réalisées. Enfin, les deux méthodes de contrôle non-

destructif utilisées de façon complémentaire (thermographie infrarouge et tomographie aux rayons X) sont présentées.

Le troisième, le quatrième et le cinquième chapitre consistent à suivre et caractériser par EA l'endommagement de trois essences de bois sous trois sollicitations quasi-statiques traction parallèle au fil, compression parallèle au fil et flexion quatre-points respectivement. Ces trois derniers chapitres suivent une démarche commune. En effet, pour chaque type de sollicitation, cette démarche consiste à observer le comportement mécanique global des éprouvettes de chaque essence testée, à examiner les différents faciès de rupture, à analyser l'évolution de l'activité acoustique en fonction du temps, à classer les signaux recueillis lors de l'endommagement en utilisant une méthode de reconnaissance de formes basée sur l'algorithme des k-moyennes, à proposer une corrélation entre les signatures acoustiques et les mécanismes d'endommagement et finalement de conclure sur le scénario d'endommagement représentatif pour chaque essence testée. Chaque chapitre se termine par une comparaison entre les réponses acoustiques de chaque essence. Pour le chapitre de flexion, l'influence de la sollicitation sur la réponse acoustique est évoquée.

Chapitre 1 : Bibliographie

I. Structure multi-matériaux à base de bois

I.1- Introduction

Dans ce premier chapitre de bibliographie nous commençons par présenter le matériau bois et ses propriétés mécaniques. Ensuite, nous abordons l'utilisation du matériau bois dans le domaine de la construction ainsi que les différentes pathologies développées par les structures en bois. Une revue sur les différentes méthodes de renforcement des structures en bois sera présentée à la fin de ce chapitre.

I.2- Le matériau bois

I.2.1-Structure multi-échelles

Le bois est un assemblage de tissus. Il est assimilable à un matériau composite naturel. Il est constitué de cellules végétales qui garantissent le transport de la sève dans l'arbre. Ces cellules sont élaborées au niveau du cambium situé entre l'écorce et le bois (figure 1). Les essences de bois peuvent être classées en deux catégories : les conifères qui sont des arbres à feuillage persistant et les feuillus qui sont des arbres à feuilles caduques, c'est-à-dire qui tombent cycliquement tous les ans. Plus techniquement, le matériau bois issu des résineux et celui issu des feuillus se différencient au niveau de la structure de leurs tissus, les détails seront donnés dans la suite de ce paragraphe.

À l'échelle macroscopique, sur une coupe transversale d'un tronc d'arbre, on distingue une structuration particulière de l'arbre. En se déplaçant de l'extérieur vers l'intérieur de l'arbre on retrouve (figure 1) : l'écorce qui est une couche protectrice constituée de cellules mortes. Le liber, couche spongieuse, qui permet la conduction de la sève. Le cambium, couche mince, qui représente la partie vivante de l'arbre. En effet, le cambium est un organe de croissance qui forme le liber vers l'extérieur et les cellules du bois vers l'intérieur (Miller et Wiedenhoef 2005). L'aubier qui représente la partie fonctionnelle de l'arbre vu qu'il est constitué des cellules qui assurent la conduction de la sève. L'aubier a généralement une couleur claire pour toutes les essences. Le duramen dit aussi bois parfait ou bois de cœur est constitué de cellules mortes. Le duramen se distingue de l'aubier par sa couleur foncée pour certaines essences telles que le Douglas et le chêne (Trouy 2015). Pour d'autres essences, l'aubier est indifférencié comme pour le sapin blanc, le peuplier, l'épicéa et le hêtre (Trouy 2015). Enfin, la moelle au centre du tronc représente le vestige de la croissance du tronc dans les premières étapes de développement de l'arbre avant que le bois ne soit formé.

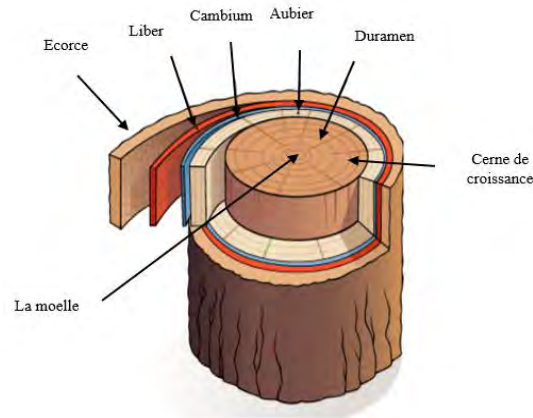


Figure 1 : Coupe transversale schématique d'un tronc d'arbre (d'après UCL 2014)

Par ailleurs, l'arbre développe lors de sa croissance une structure organisée ce qui donne au bois un caractère anisotrope. En effet, les couches cylindriques concentriques qui constituent le tronc de l'arbre confèrent au bois une symétrie cylindrique. Donc, pour le matériau bois, on peut définir trois directions principales orthogonales (figure 2): la direction longitudinale notée L dans le sens de l'axe du tronc (dans le sens des fibres à une échelle plus fine), la direction radiale notée (R) qui correspond à la direction de croissance diamétrale et la direction tangentielle notée T qui est tangente aux couches de croissance annuelles. Cette orthotropie génère trois plans de symétrie (figure 2) : le plan transverse (RT) perpendiculaire à l'axe du tronc, le plan radial (LR) perpendiculaire aux couches de croissance annuelles et le plan tangentiel (LT) parallèle aux couches de croissance annuelles.

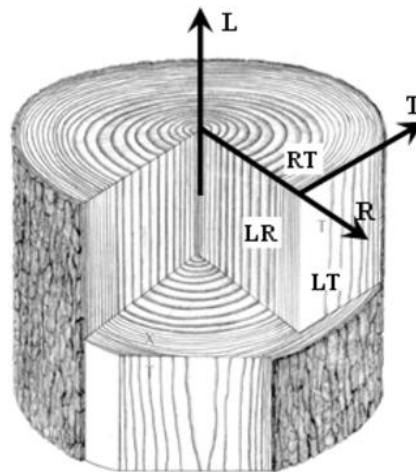


Figure 2 : Directions principales et plans de symétrie du matériau bois (Cloutier 2005)

En régions tempérées, la génération des cellules au niveau du cambium se fait en deux saisons. Au printemps, après une période de non activité, l'arbre favorise la production des cellules qui permettent la conduction des nutriments et de l'eau. D'où la production du bois de printemps dit aussi bois initial (BI), qui apparaît comme une large bande de plus faible densité et de couleur claire, contenant des pores et des fibres chez les feuillus ou de grandes cellules sous forme de trachéides avec des parois minces chez les résineux (figure 3) afin de faciliter le passage de l'eau et des nutriments. En revanche, le bois produit en été dit aussi bois final (BF) se présente sous forme d'une bande étroite, dense et foncée contenant de petites cellules

avec des parois plus épaisses (figure 3) puisque les besoins en conduction sont moindres à la fin de la saison de végétation.

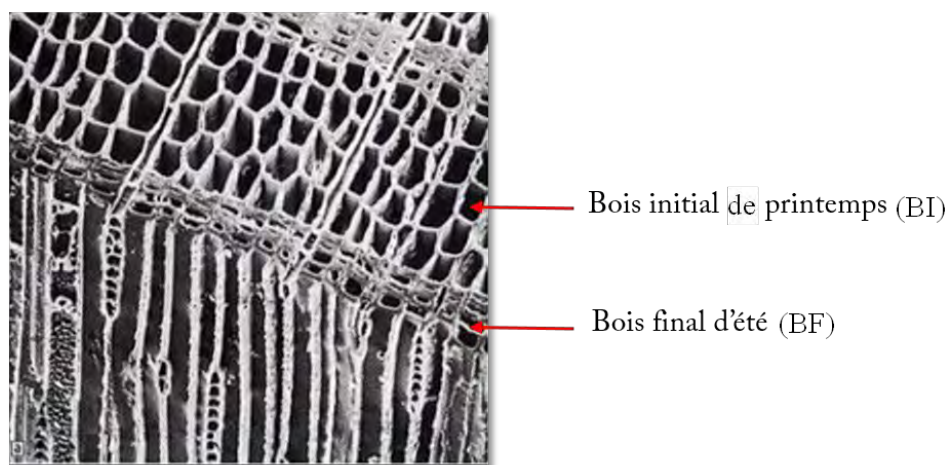


Figure 3 : Le bois initial (BI) et le bois final (BF) chez les résineux (d'après Passas 2008)

La répartition entre le bois de printemps et le bois d'été permet d'observer les cernes annuels. A cette échelle des cernes, appelée échelle mesoscopique, les densités et les caractéristiques mécaniques des deux types de bois BI et BF peuvent être très différentes. Le niveau de cette hétérogénéité varie en fonction de l'essence. Le Tableau 1 donne les valeurs de la densité ρ et du module d'Young E du BI et du BF pour certaines essences. Entre le BF et le BI, la différence de densité peut aller jusqu'au triple et celle du module d'Young peut aussi atteindre plus du double.

Tableau 1 : Densité moyenne et module d'Young du BI et du BF pour différentes essences (Kollmann et Coté 1968)

Essences	Densité du BI	Densité du BF	Module d'Young du BI (GPa)	Module d'Young du BF (GPa)
Douglas	0,29	0,82	18,24	45,51
Pin sylvestre	0,30	0,92	11,38	21,58
Epicéa	0,30	0,60	29,33	35,41
Sapin	0,27	0,62	20,50	28,25
Chêne	0,31	0,88	-	-
Hêtre	0,50	0,66	-	-
Peuplier	0,40	0,48	-	-

A l'échelle microscopique, échelle de la cellule, les éléments anatomiques du matériau bois sont différents selon la nature de l'essence, qu'elle soit résineuse ou feuillue. En effet, la structure anatomique des bois résineux est relativement simple, régulière et uniforme (figure 4). Environ 90% de volume du bois de résineux est constitué de trachéides longitudinales (Trouy et Triboulot 2012), cellules allongées de longueurs comprises entre 1 mm et 8 mm et de sections carrées. Les dimensions des sections des trachéides sont de l'ordre de 25 μm à 75 μm (Keller 1994). Les trachéides ont le rôle de soutien mécanique de l'arbre, mais également de conduction de la sève brute (Trouy 2015). Des ponctuations aréolées, qui correspondent à des petites surfaces sur les parois cellulaires des trachéides sont aussi distinguées dans la structure anatomique des résineux. Ces ponctuations permettent la circulation de la sève d'une cellule à l'autre. D'autres éléments anatomiques sont aussi distingués chez les résineux tels que les rayons ligneux, qui se présentent sous la forme d'une bande de cellules radiales dites parenchyme dont le rôle est la conduction radiale de la sève et le stockage des réserves. D'un point de vue mécanique, les rayons ligneux, qui représentent 5% à 10% du volume du bois de

résineux, contribuent à l'augmentation de la résistance radiale du matériau bois (Dinh 2011, Ozden et al 2016). Certains résineux (Douglas, mélèze, pins) contiennent des cavités tubulaires tapissées de cellules sécrétrices dites canaux résinifères. Ces derniers constituent des zones de faiblesse mécanique (Trouy et Triboulout 2012).

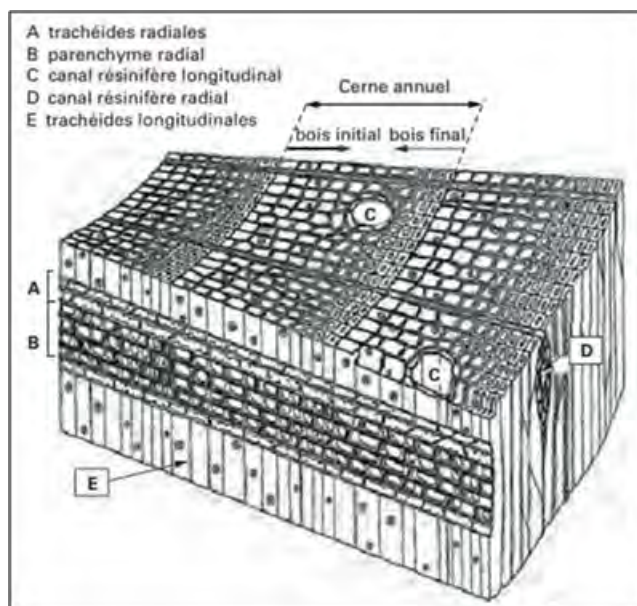


Figure 4 : Structure anatomique d'un résineux (d'après Trouy et Triboulout 2012)

La structure anatomique des bois feuillus est plus complexe que celle des résineux puisque les éléments constitutifs des tissus sont plus variés (figure 5). En effet, contrairement aux résineux, le soutien mécanique et la conduction de la sève ne sont pas assurés par le même type des cellules. Le soutien mécanique de l'arbre est assuré par les fibres qui sont des éléments rangés longitudinalement. Les cellules des fibres sont étroites avec des parois généralement épaisses (Trouy 2015). Elles constituent 50% à 60% de la masse du bois (Keller, 1994). Quant à la conduction de la sève elle est assurée par deux types de cellules : les fibres-trachéides et les vaisseaux. Ces derniers sont les éléments les plus larges avec un diamètre qui varie selon l'essence entre 20 μm et 300 μm . (Cloutier 2005). L'évolution de la taille des vaisseaux et leurs répartitions au niveau des accroissements annuels permet de distinguer trois catégories de bois de feuillus :

- Bois à pores diffus : les vaisseaux du BI et du BF ont presque le même diamètre et sont répartis d'une façon uniforme sur le bois de printemps et le bois d'été. C'est le cas du peuplier par exemple (figure 6-a).
- Bois à zone initiale poreuse : les diamètres des vaisseaux du bois de printemps sont beaucoup plus importants que les diamètres des vaisseaux du bois d'été comme dans le cas du chêne (figure 6-b).
- Bois à zone semi-poreuse : les vaisseaux ont des diamètres quasi-identiques dans le bois de printemps et celui d'été. Ils sont plus abondants dans le BI comme dans le cas de merisier (figure 6c).

D'autres éléments anatomiques peuvent être identifiés dans le bois de feuillus tels que les rayons ligneux qui sont constitués de cellules vivantes appelées parenchymes. On distingue deux types de rayons ligneux : les rayons *unisériés* (une seule rangée de cellules de parenchymes) (figure 7), que l'on retrouve dans le peuplier par exemple et les rayons *multisériés* (plusieurs rangées de parenchymes en largeur) (figure 7), on les trouve dans le bois de chêne par exemple. Les rayons constituent 10% à 30% du volume du bois de feuillus

et contribuent à la résistance mécanique du matériau dans la direction radiale (Ozden et al 2016).

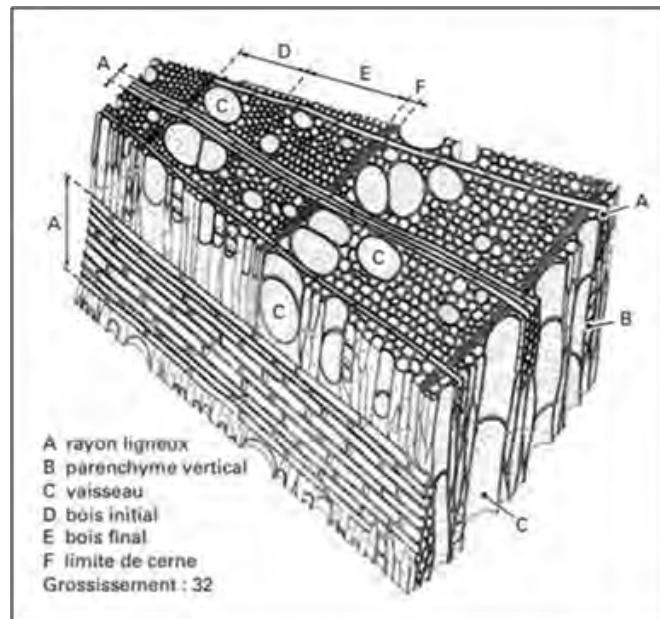
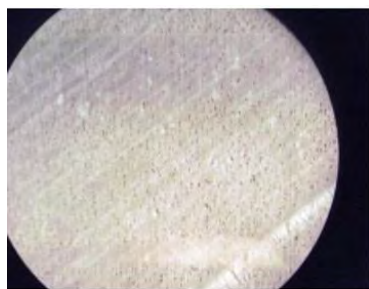
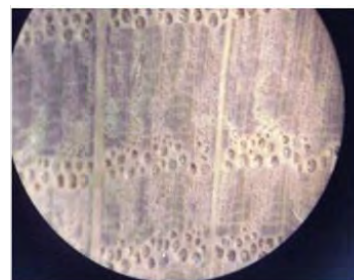


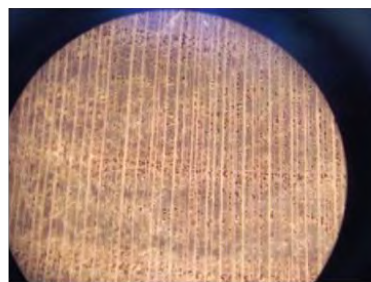
Figure 5: Structure anatomique d'un feuillus (d'après Trouy et Triboulot 2012)



(a)



(b)



(c)

Figure 6: Les trois catégories de bois de feuillus (a) bois à pores diffus (exemple le peuplier), (b) bois à zone initiale poreuse (exemple le chêne) et (c) bois à zone semi-poreuse (exemple le merisier) (d'après Surini 2007)

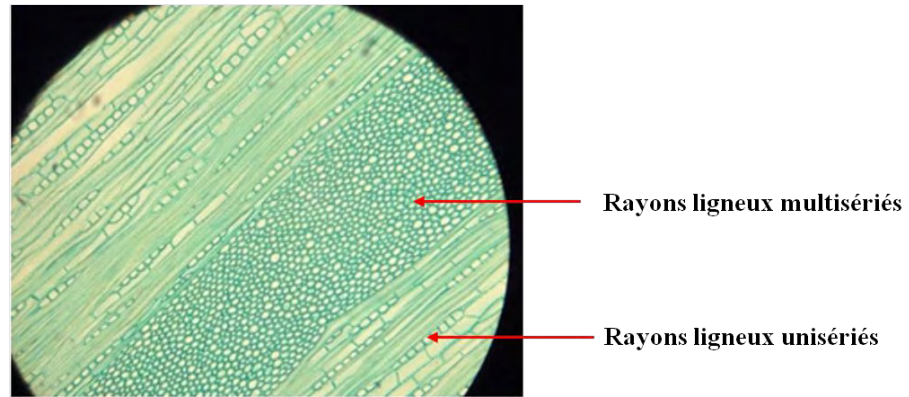


Figure 7 : Deux types de rayons ligneux sur du chêne (d'après Surini 2007)

Le Tableau 2 résume les dimensions des différents éléments anatomiques des bois résineux et feuillus.

Tableau 2 : Dimensions des éléments anatomiques du bois (François 1992)

	Résineux		Feuillus		
	Trachéides	Rayons	Fibres	Vaisseaux	Rayons
Fraction volumique (%)	85-95	5-12	37-70	6-55	10-32
Longueur axiale (mm)	2,5-7		0,6-2,3	0,2-1,3	
Longueur radiale (μm)	25-80		10-30	20-500	
Longueur tangentielle (μm)	17-60		10-30	20-350	
Epaisseur de la paroi cellulaire (μm)	2-7		1-11		

En conclusion, le bois possède une structure multi-échelles qui dépend fortement du type de bois. Cette structure complexe influence les propriétés mécaniques du matériau mais également les mécanismes d'endommagement présents dans une structure à base de bois soumise à une sollicitation mécanique.

I.2.2- Propriétés mécaniques

Le bois est un matériau solide, hétérogène, qui possède une symétrie matérielle orthotrope cylindrique. Les trois orientations principales sont longitudinales (L), radiale (R) et tangentielle (T) comme évoqué au paragraphe I.2.1 de ce chapitre (figure 2). Son comportement mécanique dans la partie linéaire de la courbe (σ - ϵ) peut être caractérisé par la loi de Hooke généralisée donnée par l'équation (1), qui respecte son caractère orthotrope (Guitard 1987).

$$\epsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j \quad (1)$$

Où ϵ_i : matrice des déformations
 S_{ij} : matrice de souplesse
 σ_j : matrice des contraintes

En considérant la symétrie cylindrique du matériau bois selon les trois plans de symétrie (LT, LR, TR), douze constantes sont utilisées pour décrire le comportement mécanique du bois: trois modules d'Young (E_L , E_T , E_R), trois modules de cisaillement ou de Coulomb (G_{LR} , G_{TL} , G_{TR}) et six coefficients de Poisson (ν_{TR} , ν_{TL} , ν_{RT} , ν_{RL} , ν_{LR} , ν_{LT}) (Guitard 1987). Par la symétrie de la matrice de souplesse, neuf constantes élastiques indépendantes sont nécessaires. La loi de Hooke généralisée, en notation d'ingénieur, peut s'écrire sous la forme de la matrice donnée par l'équation (2) (Guitard 1987).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_{LR} \\ \varepsilon_{TR} \\ \varepsilon_{TL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{TL}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LR}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_T \\ \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{TR} \\ \sigma_{TL} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Où : $\varepsilon_L, \varepsilon_R, \varepsilon_T$ sont les déformations normales selon les trois axes L, R et T

$\varepsilon_{LR}, \varepsilon_{TR}, \varepsilon_{TL}$ sont les déformations de cisaillement selon les trois plans LR, TR et TL

E_L, E_R, E_T sont les modules d'Young selon les trois axes L, R et T.

G_{LR}, G_{TR}, G_{TL} sont les modules de cisaillement selon les plans LR, TR et TL

$\nu_{LR}, \nu_{TR}, \nu_{TL}$ sont les coefficients de Poisson dans les plans LR, TR et TL

$\sigma_L, \sigma_R, \sigma_T$ sont les contraintes normales selon les trois axes L, R et T

$\sigma_{LR}, \sigma_{TR}, \sigma_{TL}$ sont les contraintes de cisaillement selon les trois plans LR, TR et TL

Les constantes élastiques et les propriétés physiques de quelques essences communément utilisées dans la construction du génie civil sont exposés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques élastiques de différents bois résineux et feuillus (Navi et al. 2005)

	Résineux			Feuillus		
Constantes	Epicéa	Douglas	Sapin	Peuplier	Chêne rouge	Hêtre
Teneur en humidité (%)	12	12	13	14	12	11
Densité (g/cm ³)	0,36	0,59	0,31	0,4	0,6	0,74
E_L (MPa)	10700	16550	8020	6830	14800	14000
E_R (MPa)	649	1300	816	1190	1500	2880
E_T (MPa)	348	900	304	493	828	1160
G_{RL} (MPa)	533	1200	558	1000	967	1640

G_{RT} (MPa)	41	80	48	200	398	470
G_{TL} (MPa)	438	929	461	900	695	1080
v_{RL}	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,07
v_{TR}	0,3	0,41	0,25	0,37	0,33	0,36
v_{LT}	0,4	0,38	0,33	0,45	0,69	0,52

Des résultats expérimentaux sur de nombreuses essences permettent de proposer un classement pour ces grandeurs (Kolmann et Côté 1986 ; Guitard 1987). Le classement est donné par les équations (3.1), (3.2) et (3.3) pour les modules d'élasticité, les modules de cisaillement et les coefficients du Poisson respectivement. La maîtrise des variations de ces propriétés est indispensable à la bonne conception des structures en bois.

$$E_L > E_R > E_T \quad (3.1)$$

$$G_{LR} > G_{TL} > G_{TR} \quad (3.2)$$

$$v_{TR} > v_{TL} > v_{RL} > v_{RT} >> v_{LR} > v_{LT} \quad (3.3)$$

Le comportement du bois et le niveau de sa résistance dans une direction donnée ne sont pas les mêmes selon que le bois soit sollicité en traction ou en compression. Les courbes typiques contrainte-déformation du bois sollicité en traction et en compression parallèle au fil sont représentées sur la figure 8. La résistance à la rupture en compression axiale est pratiquement deux fois inférieure à la résistance à la rupture en traction axiale (Tableau 4). Le comportement du bois en traction est considéré comme fragile (Dill-Langer 2003) tandis qu'en compression longitudinale le comportement est qualifié comme ductile (François 1992). La résistance à la traction exercée perpendiculairement au fil est nettement inférieure à celle appliquée parallèlement au fil (Tableau 4). Donc, les sollicitations en traction perpendiculaire au fil doivent être le plus souvent possible limitées dans la conception des structures en bois.

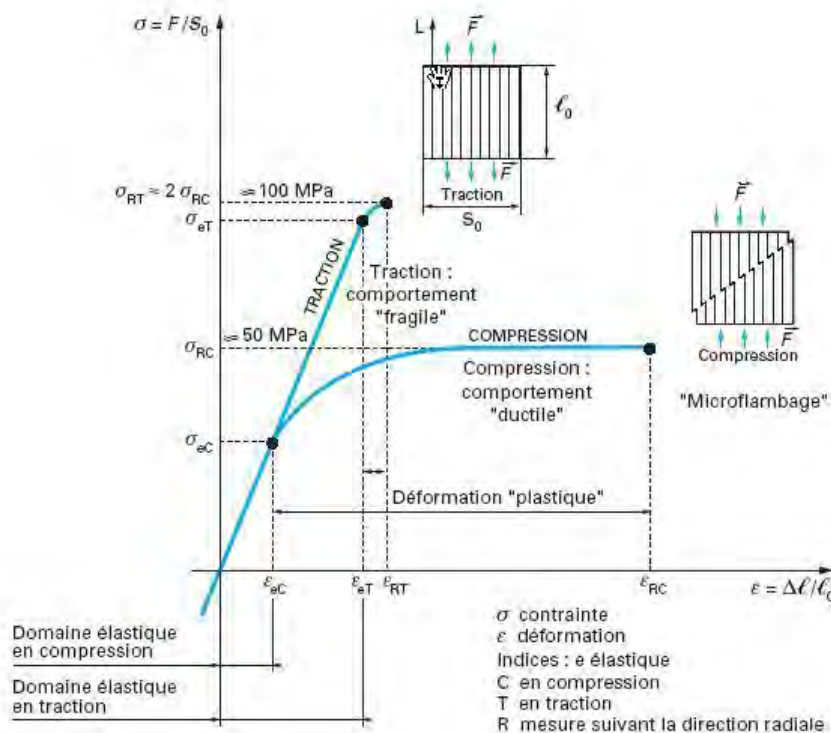


Figure 8 : Comparaison entre le comportement du bois en traction et en compression longitudinales (d'après Trouy et Triboulot 2012)

Tableau 4 : Contraintes de rupture en traction et compression de certaines espèces (CTBA 2007)

Essences	Résistance à la rupture en traction (MPa)		Résistance à la rupture en compression (MPa)	
	axiale	transversale	axiale	Transversale
Douglas	100 à 180	1,8	40 à 50	7,5 à 8
Sapin	90 à 100	1,2	35 à 45	6 à 8
Mélèze	100 à 120	1,8	40 à 55	9 à 10
Peuplier	80 à 100	2	30 à 40	7,5 à 10
Chêne	120 à 140	4	50 à 80	18 à 20

Les propriétés mécaniques du matériau bois dépendent fortement de la densité du bois. Cette dernière dépend de l'essence considérée. Elle est de l'ordre de 0,65 pour les feuillus et de 0,45 pour les résineux (Guitard 1987). Le Tableau 5 regroupe les valeurs de la densité globale de quelques essences. De plus, l'alternance BI/BF à l'intérieur d'un cerne annuel provoque une grande hétérogénéité de densité dans la direction radiale (Tableau 1).

Tableau 5 : Densités de certaines essences (Gérard et al. 2011)

Essences	Densité
Douglas	0,54
Epicéa	0,45
Sapin	0,49
Peuplier	0,45
Chêne	0,74

Généralement, les propriétés mécaniques du bois sont d'autant meilleures que sa densité est grande (Kollmann et Krech 1960 ; Johansson 2002 ; Da Silva et Kyriakides 2007 ; Grekin

et Surini 2008). Les figures 9 et 10 illustrent l'effet de la densité sur quelques propriétés mécaniques à l'intérieur d'une même essence et sur un ensemble d'essences.

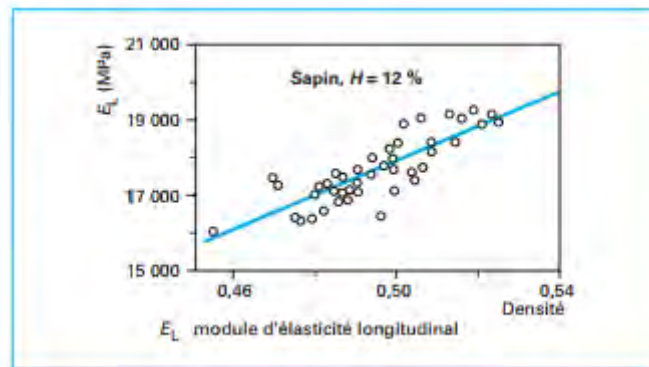


Figure 9 : Influence de la densité sur le module d'Young longitudinal du sapin (d'après Trouy et Triboulot 2012)

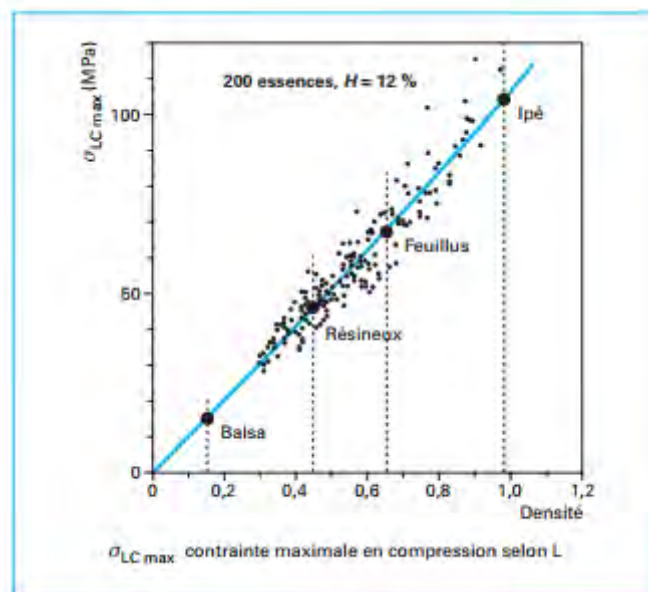


Figure 10 : Influence de la densité sur la contrainte maximale en compression longitudinale de différentes essences (d'après Trouy et Triboulot 2012)

I.2.3- Conclusion

Cette première sous-partie a permis de mieux appréhender la structure complexe du matériau bois et son influence sur son comportement mécanique. Dans la prochaine sous-partie, on va aborder l'utilisation du matériau bois dans le domaine de la construction ainsi que les différents types de pathologies développées par les structures en bois.

I.3- Utilisation du bois en construction

Nous présentons dans cette partie les avantages d'utilisation du matériau bois en construction. Ensuite une revue sera présentée sur l'utilisation du bois dans les ouvrages d'art ainsi que les différentes pathologies qui menacent les structures en bois.

I.3.1- Le bois en tant que matériau de construction

Le matériau bois occupe, depuis les origines, une place importante dans le domaine de la construction, en tant que matériau de structure, en particulier dans le domaine du génie civil telle que la construction des ouvrages d'art. Malgré un déclin de son utilisation après la révolution industrielle au profit d'autres matériaux comme le béton et l'acier, les

préoccupations environnementales actuelles ont remis le bois dans le paysage de la construction. Aujourd'hui, l'utilisation du bois se répand de plus en plus en couvrant une large gamme de constructions, bâtiments publics comme civils, culturels, agricoles et industriels, ou encore ouvrages d'art. Le bois présente en effet de nombreux avantages. En tant que ressource naturelle renouvelable, le processus de transformation du bois est peu coûteux en énergie. A titre de comparaison, la transformation d'une tonne de bois pour faire du bois de construction consomme environ 1MJ alors que la dépense énergétique de production d'une tonne de béton est égale à 4 MJ et 60MJ pour une tonne d'acier (Triboulot et Reitz 2000 ; Gagliardini 2014). Outre ces aspects énergétiques, le bois est un matériau écologique permettant la lutte contre l'effet de serre. Il est considéré comme un puits de carbone. En effet, les constructions en bois permettent de stocker du CO₂ pendant toute la durée de leurs vies (Gagliardini 2014). Pour cette raison, plusieurs engagements environnementaux mondiaux tendent vers une utilisation massive du matériau bois dans la construction. Parmi ces engagements, la loi sur l'air promulguée le 31 décembre 1996, contient un paragraphe qui concerne le bois (Ghossein 2004) : « pour répondre à l'objectif de la présente loi, un décret en Conseil d'Etat fixe les conditions dans lesquelles certaines constructions nouvelles devront comporter une quantité minimale de matériau en bois » (loi numéro 961236, titre VII, article 21-5). On trouve aussi le protocole de Kyoto de 1997 via l'application d'une charte visant à augmenter les proportions de bois dans le domaine de la construction (Ghossein 2004).

Outre son aspect écologique, l'un de grands avantages du bois réside dans sa légèreté et son rapport poids/résistance mécanique élevé. Le tableau 6 compare les critères de performance du bois avec les autres matériaux de construction (Triboulot et Reitz 2000). Les résultats obtenus montrent que les bois, plus spécifiquement les résineux, selon des critères de qualité, ont des propriétés mécaniques supérieures à celles des matériaux classiques de construction (Tableau 6). Ceci justifie la performance élevée du matériau bois en tant que matériau de construction.

Tableau 6 : Critères de performance de différents matériaux (Triboulot et Reitz 2000)

Matériaux	Module d'élasticité E (MPa)	Densité (ρ)	Critère de qualité pour une colonne Racine carrée de E/ ρ	Critère de qualité pour un panneau Racine cubique de E/ ρ
Acier	210 000	7,8	59	7,7
Titane	120 000	4,5	77	11,0
Aluminium	73 000	2,8	99	15,0
Béton	15 000	2,5	49	10,0
Matériau composite artificiel	200 000	2,0	225	10,0
Résineux léger	10 000	0,35	290	61,4
Feuillus	12 000	0,65	170	35,5

En outre, les progrès techniques des métiers du bois ont permis le retour de ce matériau sur le devant de la scène. En effet, plusieurs produits reconstitués ont été développés afin de réduire la variabilité intrinsèque du bois massifs. Parmi ces produits, le Bois Lamellé-Collé (LC) qui est fabriqué à partir de lamelles collées entre elles sous pression. Les lamelles sont généralement fabriquées à partir des bois résineux particulièrement du bois de Douglas (Norme EN 14080 AFNOR 2013). La technique du LC permet de fabriquer des éléments structuraux en bois de grande portée (jusqu'à 40 m) et d'une hauteur de section maximale égale à 2 m (Nguyen 2010). L'avantage du LC est l'élimination du maximum des défauts observés sur les poutres de bois massifs, ce qui améliore la performance du matériau. En

outre, Il est possible de réaliser des formes courbes par un cintrage des lamelles avant collage. La figure 11 montre différentes formes d'ouvrages réalisés en bois LC.

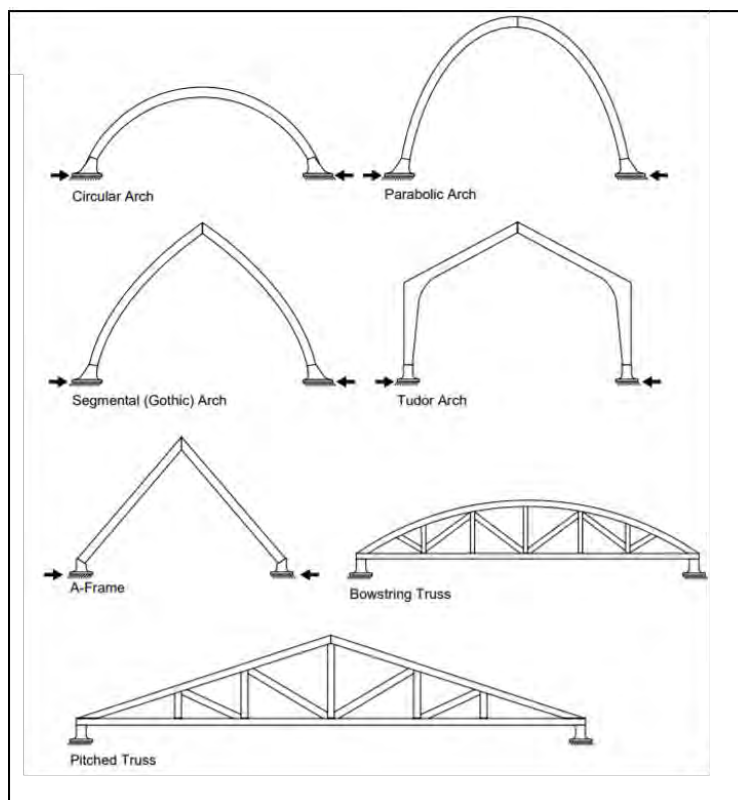


Figure 11 : Différentes formes réalisées en bois LC (Canadian Wood Council 2017)

La résistance d'une structure en bois LC dépend directement de la performance mécanique des bois lamellés qui la composent. Il existe alors un classement de la performance mécanique sur BLC. Le classement se présente sous la forme de deux lettres GL « Glulam », suivies d'un chiffre qui donne la valeur de la résistance en flexion puis d'une lettre soit *h* soit *c*. La lettre *h* désigne les BLC homogènes où toutes les lamelles appartiennent à la même classe mécanique. La lettre *c* désigne les BLC panachés où les lamelles appartiennent à des classes différentes. Les caractéristiques mécaniques des lamelles bois définies par la norme NF EN 1194 (AFNOR 1999) sont regroupées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Caractéristiques mécaniques du BLC selon la norme NF EN 1194 (CTBA 2007)

Symbole	Désignation	Unité	Lamellés collés homogènes				Lamellés collés panachés			
			GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
$f_{m,g,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	24	28	32	36	24	28	32	36
$f_{t,0,g,k}$	Contrainte de traction axiale	N/mm ²	16.5	19.5	22.5	26.0	14.0	16.5	19.5	22.5
$f_{t,90,g,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire	N/mm ²	0.40	0.45	0.50	0.60	0.35	0.40	0.45	0.50
$f_{c,0,g,k}$	Contrainte de compression axiale	N/mm ²	24	26.5	29	31	21	24	26.5	29
$f_{c,90,g,k}$	Contrainte de compression perpendiculaire	N/mm ²	2.7	3.0	3.3	3.6	2.4	2.7	3.0	3.3
$f_{v,g,k}$	Contrainte de Cisaillement	N/mm ²	2.7	3.2	3.8	4.3	2.2	2.7	3.2	3.8
$E_{0,g,mean}$	Module moyen axiale	kN/mm ²	11.6	12.6	13.7	14.7	11.6	12.6	13.7	14.7
$E_{0,g,05}$	Module axiale au 5 ^{ème} pourcentile	kN/mm ²	9.4	10.2	11.1	11.9	9.4	10.2	11.1	11.9
$E_{90,g,mean}$	Module moyen transversal	kN/mm ²	0.39	0.42	0.46	0.49	0.32	0.39	0.42	0.46
$G_{g,mean}$	Module de cisaillement	kN/mm ²	0.75	0.78	0.85	0.91	0.59	0.72	0.78	0.85
$\rho_{g,k}$	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	380	410	430	450	350	380	410	430

Le lamibois (LVL : Laminated Veneer Lumber) est un autre produit reconstitué. Il est couramment utilisé au même titre que le lamellé-collé dans les structures bois, surtout dans le cas où une haute performance et une très grande résistance mécanique sont exigées. C'est un panneau fabriqué par plusieurs placages déroulés de bois de faible épaisseur (3mm), purgés de

défauts et collés à chaud sous haute pression avec une résine phénolique. Le lamibois est fabriqué avec des essences résineuses (pin sylvestre, épicéa, mélèze). Les caractéristiques mécaniques du lamibois sont supérieures de l'ordre de 30% à celles du bois massifs et du BLC (Girardon 2014).

I.3.2- Ouvrages d'art en bois

Au cours de ces vingt dernières années, un réel développement des ouvrages d'art en bois s'est fait sentir en France (Barbier et Joineau 2007 ; Le Roy 2013) et en Europe notamment dans les pays scandinaves et en Suisse (Gustafsson et al. 2010 ; Koch et al. 2016). Généralement ces ponts présentent une portée comprise entre 10 et 50 m. Ce type d'ouvrages est largement majoritaire sur le territoire national ainsi que dans la plupart des pays européens (figure 12). On constate donc que le matériau bois peut avoir une place importante dans le paysage à conditions que ses capacités structurales soient adaptées. Or, le tablier représente un des points délicats de la conception structurale des ouvrages d'art en bois vu que le bois possède de faibles résistances aux sollicitations transversales (traction, compression, cisaillement) (Didier et Tanis 2011). Donc, des tabliers mixtes associant le bois aux autres matériaux tels que le béton et l'acier sont développés afin d'avoir une structure rigide permettant la transmission des charges à l'ensemble de la structure porteuse et limitant les efforts de cisaillement.

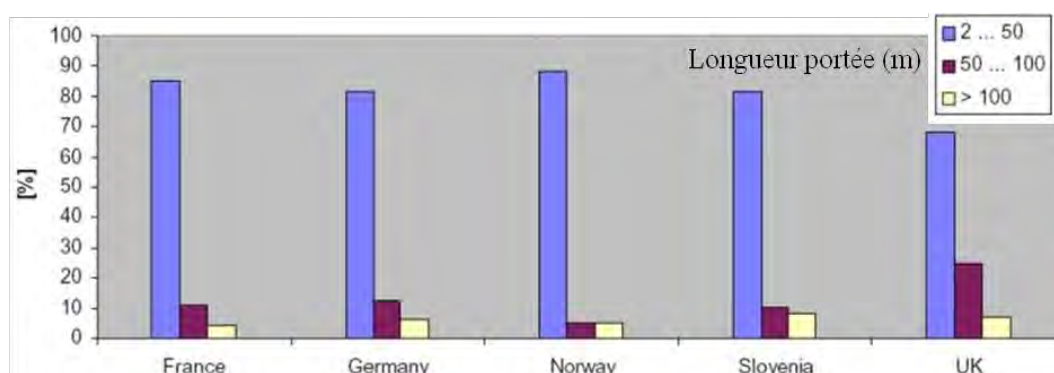


Figure 12 : Proportions des ponts de différentes portées en Europe (Le Roy 2013)

Par ailleurs, il existe deux principaux types d'ouvrages d'art en bois : les passerelles et les ponts routiers. Nous allons ensuite présenter quelques exemples d'ouvrages réalisés en France et en Europe :

Passerelle Pinot située à Blagnac (figure 13): C'est un pont en arc d'une portée de 36 m réalisé en 1998. La structure en arc permet de bénéficier du comportement ductile du matériau bois en compression. Ce pont est composé principalement d'une structure en arc auto-ancré en bois lamellé-collé de pin de classe GL24 et d'une dalle en béton-armé (Barbier et Joineau 2007).



Figure 13 : Passerelle Pinot (d'après CEREMA 2008)

Pont sur la Dore situé dans Puy de Dôme (figure 14) : C'est un pont couvert construit en 1994. Il possède une structure porteuse en treillis contenant des poutres en lamellé-collé de pin sylvestre. La portée de cet ouvrage est égale à 33 m (Barbier et Joineau 2007).



Figure 14 : Pont sur la Dore (d'après CEREMA 2008)

Pont de Merle situé à Corrèze (figure 15) : C'est un ouvrage de 57m de long construit en 1999. Sa structure est composée de béquilles. Ces dernières travaillent en compression et permettent de réduire les portées effectives. Les éléments de ce pont sont fabriqués en bois lamellé-collé de Douglas purgé d'aubier de classe GL30.



Figure 15 : Pont de Merle (Tourisme Corrèze.fr)

Pont d'Älvsbacka situé à Skelleftea en Suède (figure 16) : C'est un pont récent construit à l'été 2011. La structure porteuse de ce pont est fabriquée en bois lamellé-collé en épicéa non-traitée. Une peinture jaune claire est appliquée sur la totalité de la structure afin de la protéger. Ce pont est d'une longueur totale de 180 m avec une portée de 130m (Björngrim 2015).



Figure 16 : Pont d'Älvsbacka (crédit photo : Imen Yahyaoui)

Il existe aussi des ponts mixtes bois-béton. L'association de ces deux matériaux permet d'alléger la structure et de faire travailler chaque matériau dans son domaine de prédilection. Le principe de l'association de ces deux matériaux consiste à faire travailler les poutres en bois en traction alors que la dalle en béton prend en charge les efforts de compression. En effet, le béton présente une résistance à la compression élevée et une résistance limitée en traction. La résistance à la compression pour un béton durci peut atteindre 30 à 60 MPa tandis que celle en traction est égale à 1/10ème de sa résistance à la compression (Mbarga 2009) (Tableau 8). La résistance en traction longitudinale du matériau bois est beaucoup plus élevée que celle du béton (Tableau 8).

Tableau 8 : Comparaison entre la masse volumique et les propriétés mécaniques du béton, de l'acier et du bois (Gagliardini, 2014)

Matériau	g [kN/m ³]	σ_t [MPa]	σ_c [MPa]	E [MPa]
Béton	24	3	40	30 000
Acier	77	500	500	210 000
Bois	6	40	30	10 000

On peut citer le pont de Riou (figure 17), construit en 2015, situé sur la commune de Lantosque, dans les Alpes-Maritimes. Ce pont est composé de dalles en béton préfabriquées connectées à des poutres en bois lamellé-collé de Douglas. Il représente le premier pont routier en bois-béton connecté en France. En effet, les quatre poutres en bois sont dotées de plaques métalliques. Chaque plaque contient six goujons sur la face supérieure pour pouvoir poser ultérieurement les dalles de béton (figure 18). La longueur du pont est de 15 m.



Figure 17 : Pont du vallon du Riou de Lantosque (d'après nice-matin.fr 2016)



Figure 18 : Système de connexion métallique sur la face supérieure des poutres en bois (d'après Renaudin et Jandin 2017)

Face à cette place intéressante occupée par le bois dans le domaine de la construction, il se pose le problème de la dégradation prématurée des ouvrages réalisés en bois. En effet, la durée de vie des ouvrages en France, pourtant récents, est trop souvent inférieure à vingt ans (Berthelémy 2007). Cette dégradation est engendrée par plusieurs types de pathologies que l'on développera dans le paragraphe suivant.

I.3.3- Pathologies des structures en bois

Les structures en bois sont susceptibles de se dégrader avec le temps. Cette dégradation être due à plusieurs facteurs. Les pathologies observées sont parfois complexes et résultent de nombreuses interactions (Lavisci 2001). Il existe deux types principaux de pathologies qui peuvent se présenter dans les structures en bois : les pathologies d'origine biologique et celles d'origine mécanique. Les pathologies d'origine biologique sont engendrées par les attaques des insectes xylophages, à l'état de larves ou adultes, et/ou par les champignons (Gambetta et al. 1999). Il existe plusieurs types d'insectes à l'origine de ces dégradations importantes dans le matériau bois comme les termites, les capricornes de maisons, les vrillettes ... Le dégât structural le plus important est engendré par les attaques des termites qui décomposent totalement la matière ligneuse (figure 19) pour extraire des éléments nutritifs ce qui mène à une perte totale de résistance mécanique de l'élément attaqué (Lartigau 2013).



Figure 19 : Dégâts des termites sur une poutre en I utilisée dans une structure (Pestcons wordpress)

En ce qui concerne les champignons, il existe deux grandes familles qui menacent les structures en bois : les champignons lignivores et les champignons lignicoles (Pignolet 2008, Lartigau 2013). La formation des champignons de la première famille « lignivores » engendre une dégradation mécanique du matériau bois. En effet, ces champignons se nourrissent de la matière ligneuse ce qui mène à une décomposition et à une destruction des fibres du bois. Donc, l'élément attaqué perd sa résistance mécanique dans un premier temps et est détruit totalement ensuite. Les champignons lignivores sont répertoriés selon l'altération qu'ils créent dans le bois. On distingue donc trois types de pourritures: fibreuse, cubique et molle (figure 20). Le développement de ces champignons dans les structures en bois est engendré par une humidification du bois trop élevée (entre 20% et 80%) (Aubagnac et al. 2008). La figure 21 montre une pourriture sur une passerelle engendrée par des attaques fongiques développées au niveau des fentes infiltrées d'eau.

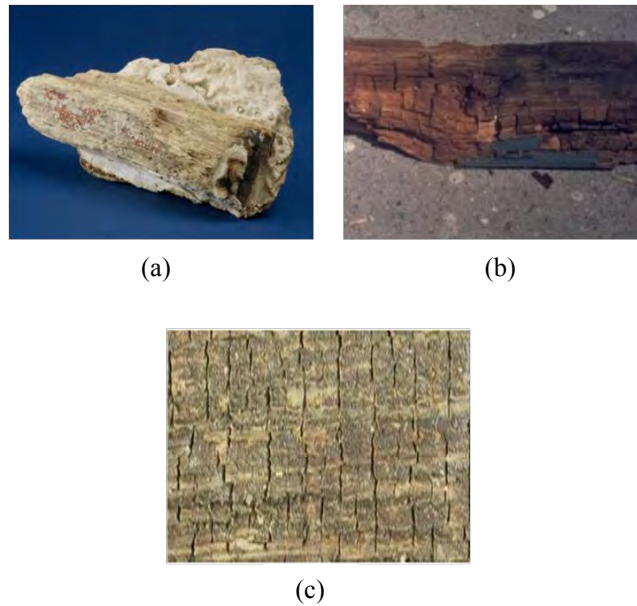


Figure 20 : Différents types des pourritures du bois (a) pourriture fibreuse (blanche), (b) pourriture cubique (brune) et (c) pourriture molle (expert-bois.fr)



Figure 21 : (a) Pourriture sur une passerelle conduisant à sa fermeture (b) détail de la zone pourrie (Aubagnac et al. 2008)

En revanche, les champignons lignicoles n'engendrent pas de dégradations mécaniques. Ils consomment des substances présentes à l'intérieur des cellules du bois ce qui perfore les parois mais n'altère pas significativement les propriétés mécaniques du matériau bois. Ils engendrent donc des dégradations d'ordre esthétique tel que la modification de couleur et d'aspect du bois (figure 22).



Figure 22 : Bleuissement sur charpente (renovation.fr)

Au sujet des pathologies d'origine mécanique, elles sont en général le reflet d'erreurs initiales soit au niveau des études (conception ou calcul) (Lavisci 2001, Aubagnac et al. 2008) soit au niveau de la fabrication et de la mise en œuvre. Les origines des défauts mécaniques peuvent être soit une fragilité au niveau d'un assemblage ou un travail excessif du bois. A titre d'exemple, la figure 23 montre une rupture au niveau d'un assemblage inadapté entre un arbalétrier et une contrefiche. L'origine de cette rupture est une erreur au niveau de la conception. En effet, l'assemblage est prévu pour travailler en compression alors qu'il était sollicité principalement en traction.



Figure 23 : Rupture au niveau d'un assemblage insuffisant (d'après Aubagnac et al. 2008)

L'excès du travail du bois est engendré soit par un chargement excessif, soit par une mauvaise transmission des efforts ou encore par une conception inadaptée. Les pathologies mécaniques résultant de ce travail excessif apparaissent généralement sous forme de fissures et de fentes. Les figures 24 et 25 montrent des ruptures provoquées par une sollicitation trop importante en traction transversale et en traction longitudinale respectivement.



Figure 24 : Rupture du bois sous sollicitation de traction transversale (d'après Aubagnac et al. 2008)



Figure 25 : Arrachement des fibres de bois sous sollicitation de traction longitudinale (d'après Aubagnac et al. 2008)

Certaines fissures trouvent leurs origines à proximité d'un défaut dans le matériau bois tels que les nœuds. Ces derniers sont considérés comme des inclusions qui peuvent affaiblir de manière significative la résistance en flexion et en traction et affecter la rigidité du matériau bois (Grazide et al. 2013). L'influence d'un nœud sur les caractéristiques mécaniques du bois est due à l'interruption de la continuité et/ou au changement dans la direction des fibres du bois associées au nœud. A titre d'exemple, la figure 26 montre la rupture d'une panne causée par un nœud.

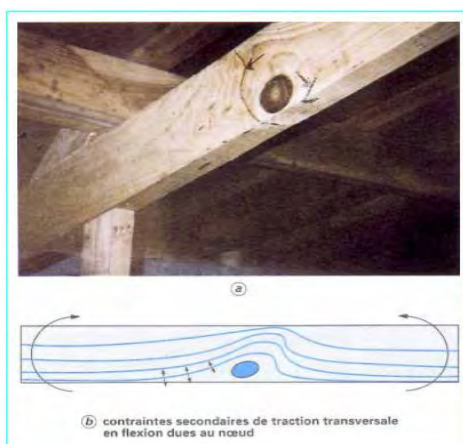


Figure 26 : Fissure au niveau d'un nœud de grande taille dans une panne (d'après Biger 1997)

I.3.4- Conclusion

Malgré les atouts du bois cités auparavant, les problèmes majeurs restent la durabilité et les performances mécaniques de ce matériau. La fragilité du matériau bois aux efforts transversaux (traction, compression) et sa faible résistance au cisaillement longitudinal ainsi que sa fragilité au changement d'humidité réduisent la durée de vie des structures en bois. En effet, la durée de vie d'une structure en bois exposée directement aux intempéries, même si elle est construite en bois traité ou naturellement durable, est trop souvent inférieure à vingt ans (Barbier et al. 2006).

Afin de faire évoluer le matériau bois et développer de nouvelles structures, de nombreux chercheurs ont proposé de coupler le bois à d'autres types de matériaux. En effet, l'association des matériaux ayant de propriétés complémentaires permet d'optimiser le fonctionnement des structures en utilisant chaque matériau dans son domaine de prédilection. On se propose maintenant de passer en revue les structures multi-matériaux à base de bois.

I.4- Structures multi-matériaux à base de bois

Nous présentons dans cette partie les différentes configurations de renforcement du bois par des matériaux composites.

I.4.1- Renforcement du bois par des matériaux composites

Les structures en bois sont très sensibles aux intempéries lorsqu'elles sont exposées directement à celles-ci. De plus, comme on a vu auparavant, le matériau bois présente de faibles propriétés mécaniques notamment en traction transversale et en cisaillement longitudinal, ce qui limite son utilisation en flexion. Donc l'introduction récente des matériaux composites pour le renforcement des structures s'avère une alternative très prometteuse. L'utilisation de cette technologie dans le béton est plus développée et l'on peut trouver facilement de nombreux cas concrets. On peut citer l'exemple du pont de Wotton au Québec dont le tablier est renforcé par des polymères renforcés de fibres (PRF) de carbone et de verre (Benmokrane et al. 2002) (figure 27). Cette technique permet d'améliorer la durabilité des ouvrages en béton et d'éviter la corrosion.



(a)



(b)

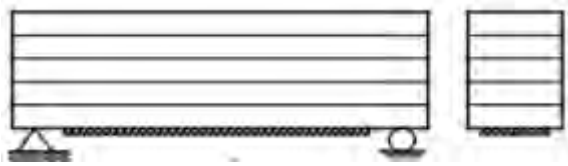
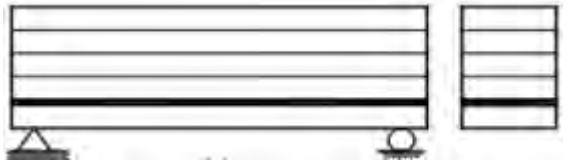
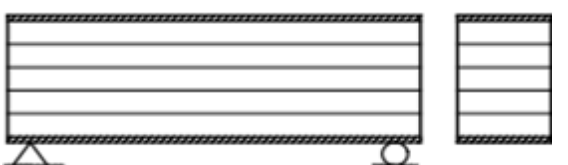
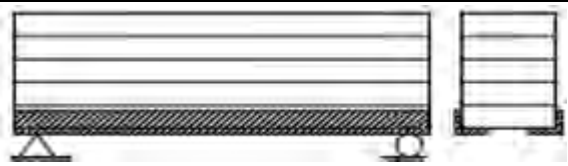
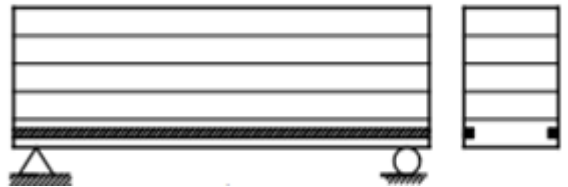
Figure 27 : (a) Pont de Wotton (b) armatures en matériaux composites à base de fibres de verre (Benmokrane et al. 2004)

Dans le cas du bois, depuis 40 ans, plusieurs chercheurs ont étudié la possibilité de renforcer des poutres en bois par des matériaux composites. L'objectif de ce renforcement est d'améliorer la tenue du bois pour une utilisation en structure ainsi que d'exploiter des essences de bois habituellement non exploitables (en titre d'exemple le bois de peuplier est

abondant en France mais ses faibles propriétés mécaniques freinent son exploitation dans le domaine de la construction). Par ailleurs, les poutres en bois utilisées sur des ouvrages d'art sont fortement sollicitées en flexion sous l'effet des charges du trafic routier et/ou piéton. Donc, plusieurs travaux de recherche ont été menés sur l'utilisation des matériaux composites pour renforcer la tenue du bois aux efforts de flexion (Lacroix 2000 ; Fiorelli et Dias 2003 ; Borri et al. 2005).

Les principales configurations de renforcement des poutres en bois sont résumées dans le tableau 9. Ces configurations consistent généralement à renforcer la zone tendue de la poutre. Ce choix est motivé par le fait que l'endommagement des poutres en bois sollicitées en flexion présente fréquemment une rupture en traction (Lacroix 2000, Nguyen 2010).

Tableau 9 : Principales configurations de renforcement de poutres en bois par des polymères renforcés de fibres

Types de configurations	Zone de renforcement	Schématisation
(1)	Renforcement de la dernière lamelle de la poutre par collage d'une couche de composite dans la zone tendue.	
(2)	Renforcement de la zone tendue de la poutre en bois lamellé-collé par collage d'une couche de composite entre les deux dernières lamelles du bois.	
(3)	Renforcement de la poutre en bois massif ou en bois lamellé-collé par collage de couches de composite à la fois dans la zone comprimée et la zone tendue.	
(4)	Renforcement des angles de la dernière lamelle de bois de la poutre avec du composite.	
(5)	Renforcement de la poutre au niveau de la zone tendue par des barres de composite (Utilisation de la technique Near Surface Mounted : réalisation des rainures dans les poutres afin de mettre en place les barres de renforcement).	

Les résultats obtenus pour la configuration (1) montrent une augmentation au niveau de la résistance et la rigidité des poutres renforcées par rapport aux poutres non-renforcées. Par contre, le mode de rupture diffère d'une étude à l'autre. En effet, les résultats des travaux de

Lacroix (2000) menés sur le renforcement des poutres en bois de peuplier par une couche de carbone montrent une augmentation de résistance de 40% à 70% en comparant avec les poutres non-renforcées. Ceci conduit à une rupture dans la zone comprimée. Fiorelli et Dias (2003) ont aussi montré une amélioration de la rigidité de 15% à 30% dans leurs travaux menés sur le renforcement des poutres en bois de pin par des PRF carbone et verre. L'endommagement dans cette étude s'est produit tout d'abord dans la zone comprimée par écrasement des fibres, puis dans la zone tendue.

La configuration (1) (Tableau 9) est testée aussi pour le cas d'un tablier de pont à l'échelle 1 (figure 28) conçu par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) dans le cadre d'un projet européen NR2C (New Roads Construction Concepts) qui s'intéresse aux ponts du futur (Ben Mekki et al. 2007). Le tablier a une portée de 10 m contenant quatre poutres en bois lamellé-collé d'épicéa. Les zones inférieures des poutres sont renforcées par un stratifié 12 plis carbone/époxy. La rupture se produit dans la zone de traction (figure 29).



Figure 28 : Tablier d'un pont mixte bois/béton/composite testé au LCPC (d'après Ben Mekki et al. 2007)



Figure 29 : Rupture de la poutre dans la zone tendue (d'après Ben Mekki et al. 2007)

Nguyen et al. (2010) ont renforcé la zone tendue des poutres en bois massif d'épicéa de portée 1,6 m par une couche de composite en carbone UD (0°). L'utilisation des polymères

renforcés de fibres carbone procure une augmentation de rigidité de 16,3% et une amélioration de résistance en flexion de 23,44%. De plus, ils ont observé que le comportement devient plus ductile en présence du renforcement (figure 30). Deux modes de rupture ont été observés. Le premier mode est en traction du bois observé sur toutes les poutres non renforcées et pour certaines poutres renforcées (figure 31). Le deuxième mode se développe par plastification du bois en compression.

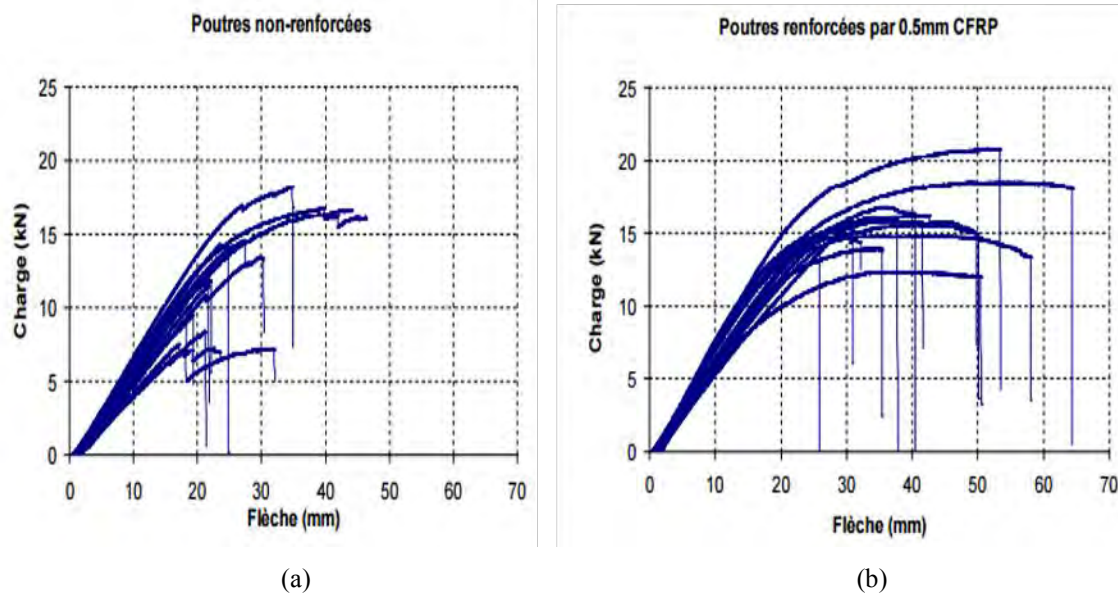


Figure 30 : Comportement en flexion pour des poutres en bois (a) non-renforcées (b) renforcées par du carbone (d'après Nguyen 2010)



Figure 31 : Rupture en traction des poutres en bois (a) poutres non-renforcées (b) poutres renforcées (d'après Nguyen 2010)

Le renforcement de la configuration (2) (Tableau 9) a été utilisé par Dagher et al. (1996) sur des poutres en bois de pruche du Canada (Eastern Hemlock) dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques de ce bois. Les poutres renforcées présentent un gain de résistance en flexion de 33% à 55% par rapport aux poutres non renforcées. La même configuration a été testée par Romani et Blaß (2000) sur des poutres en bois lamellé-collé d'épicéa. Les résultats montrent un gain de résistance de 50%. La rupture s'est produite généralement dans le bois au-dessus et en dessous des couches renforcées ainsi que dans la zone comprimée, au niveau des aboutages (figure 32).

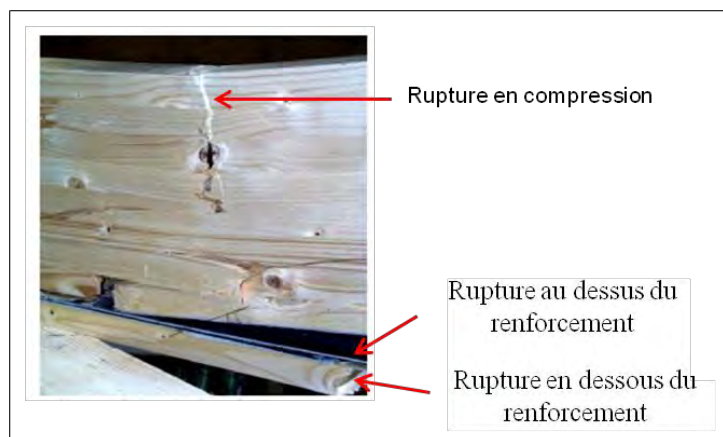


Figure 32 : Différents types de ruptures observés sur les poutres renforcées par des couches de carbonées (Blaß et Romani 2000)

Le renforcement de la configuration (3) (Tableau 9) a été utilisé par Hernandez et al. (1997) sur des poutres en bois lamellé-collé de peuplier. Des polymères renforcés de fibres de verre ont été utilisés pour ce renforcement. Ils ont constaté que l'augmentation de la rigidité en flexion pour ce type de renforcement est plus faible que celle obtenue pour le type de renforcement (1) (13% en moins). La rupture finale des poutres renforcées se fait toujours dans la partie tendue.

Le renforcement de type (4) (Tableau 9) a été utilisé par Borri et al. (2005) sur des poutres en bois d'épicéa. Un gain de 55% au niveau de la charge maximale et de 30,3% au niveau de la rigidité a été observé.

La dernière configuration, type (5) (Tableau 9), a été étudiée par Gentile et al. (2002). Les résultats des poutres de Douglas renforcées soumises à une sollicitation de flexion ont montré une amélioration de 46% au niveau des propriétés de flexion. La rupture dans ce cas s'est produite majoritairement dans la zone de compression (60% des poutres).

En conclusion, le renforcement de la zone tendue d'une poutre en bois par une seule couche de PRF (polymères renforcés de fibres) procure des améliorations de rigidité et de résistance du bois. De plus, le renforcement permet de diminuer la dispersion expérimentale des résultats. En effet, l'écart-type de la résistance en flexion dans les travaux menés par Ogawa (2000) varie entre 6% à 8% tandis que celui des poutres non-renforcées varie entre 10% à 80%.

En revanche, le renforcement par une seule couche de composite n'empêche pas l'apparition de la fissure critique qui conduit à la rupture catastrophique de la poutre en flexion comme c'est le cas dans la majorité des études citées auparavant. En effet, la rupture démarre dans la partie tendue puis après une bifurcation la fissure se propage dans le sens longitudinal sous contrainte de pelage et de cisaillement (en mode mixte I+II). Ce phénomène est parfaitement visible sur le tablier testé par le LCPC (figure 29). Intéressée au comportement à la fissuration des poutres de structure en flexion, une autre équipe du laboratoire LCPC composée de Le Roy et Nguyen ont proposé un multi-renforcement (Nguyen et Le Roy 2010). Cette proposition est motivée par l'idée d'arrêter la propagation de la fissure critique avant qu'elle ne traverse la poutre. Ils estiment alors que l'insertion d'une autre couche de carbone sur le chemin de la fissure permet d'arrêter sa propagation en mode I. Les calculs numériques de renforcement ont conduits les chercheurs à proposer un multi-renforcement de la poutre par trois couches de carbone afin de répondre aux effets d'échelle. Dans leur étude expérimentale, des poutres en bois lamellé-collé de pin sylvestre de classe mécanique GL28 ont été fabriquées. Ces poutres ont une dimension de 105 mm (largeur) x

165 mm (hauteur) x 3300 mm (longueur). Chaque poutre se compose de cinq lamelles de bois. Trois plaques de composite à fibres de carbone ont été insérées au niveau de la zone tendue comme il est montré sur la figure 33. Les poutres renforcées sont testées en flexion. L'objectif de leur étude est d'étudier le rôle de chacune des trois lames de carbone lors de l'apparition de la fissure dans la zone tendue renforcée. Donc, il est intéressant d'éviter tout autre mode d'endommagement qui peut se produire lors de l'essai. Pour ce faire, les chercheurs ont ajouté une dalle en béton au-dessus de la poutre (figure 33) afin d'empêcher toute rupture en compression. Ils ont aussi renforcé les extrémités de la poutre par un tissu de fibres de carbone pour éviter le mode de rupture en cisaillement.

Les résultats obtenus montrent que les poutres renforcées présentent une rigidité et une résistance deux fois supérieure aux poutres non-renforcées. En ce qui concerne la rupture, les chercheurs ont constaté que les trois lamelles de carbone insérées dans la zone tendue ne jouent pas le même rôle face à la rupture. La première lamelle de carbone (figure 33) permet de retarder l'apparition de la première fissure de traction en augmentant la résistance de la poutre par rapport aux poutres non-renforcées. En effet, la rupture des poutres renforcées apparaît à une charge comprise entre 137 kN et 157 kN tandis que celle des poutres non-renforcées apparaît à une charge comprise entre 62 kN et 100 kN. La deuxième lamelle de carbone (figure 33) empêche la propagation de la fissure de traction à la lamelle de bois supérieure et évite le déclenchement du cisaillement. Ils n'ont pas arrivé à identifier le rôle de la troisième lamelle de carbone (figure 33) puisqu'elle est moins sollicitée. Les chercheurs ont conclu que le nombre de couches de renforcement nécessaire dépend de la hauteur de la poutre. Il est intéressant de multiplier les couches de carbone pour les poutres de grande hauteur par contre il est suffisant de ne renforcer que la face inférieure par une seule couche de carbone pour les poutres de faible hauteur.

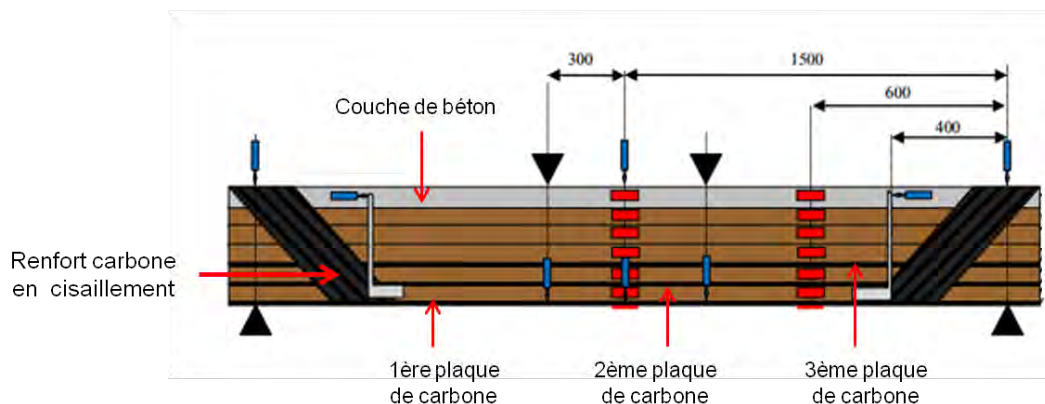


Figure 33 : Modèle d'une poutre en bois lamellé-collé avec un multi-renforcement (d'après Nguyen et al. 2010)

I.4.2- Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie l'intérêt mécanique du renforcement du bois par des matériaux composites. Aujourd'hui, on constate un grand intérêt de l'Europe pour le développement des structures multi-matériaux à base de bois. Cet intérêt apparaît à travers les différents projets réalisés au laboratoire LCPC tels que le projet NR2C (New Roads Construction Concepts) évoqué auparavant. Les structures mixtes à base de bois sont donc à la fois originales et mécaniquement très intéressantes, chaque matériau ayant un rôle important dans la performance de la structure. Cependant, le comportement à la rupture de ces structures multi-matériaux n'est pas encore bien connu et maîtrisé. Donc, afin de garantir une sécurité accrue de ces structures mixtes, il s'avère primordial de maîtriser l'évolution de leurs endommagements et les différents mécanismes qui contribuent à la rupture finale de la structure. L'endommagement est souvent contrôlé et étudié par différentes méthodes de

contrôle non-destructif (CND). Parmi ces différentes méthodes, l'émission acoustique (EA) permet de répondre à différents objectifs : détecter et localiser l'endommagement précoce et son évolution, mais également d'identifier les mécanismes d'endommagement.

II- Suivi de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois

II.1- Introduction

Cette partie commence par présenter quelques moyens utilisés pour le suivi et le contrôle des ouvrages d'art classiques (acier, béton) ou en bois. Ensuite on s'intéresse à l'utilisation de l'émission acoustique pour le suivi de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois. Le principe de fonctionnement de cette méthode sera présenté dans un premier temps. Comme les structures mixtes à base de bois sont en cours de développement, aucune application concrète de l'EA n'a été réalisée sur ce type de structure, donc les paragraphes suivants s'intéressent à l'utilisation de l'EA pour le suivi de l'endommagement des principaux matériaux qui constituent les structures multi-matériaux à base de bois notamment le bois et les composites.

II.2- Méthodes disponibles pour le suivi et l'évaluation des ouvrages d'art

La surveillance est un élément fondamental des politiques de gestion des ouvrages d'art. Dans la majorité des cas, elle permet d'initier le déclenchement des mesures de sécurité lorsque l'état de l'ouvrage le nécessite en fournissant des détails indispensables pour la programmation d'un système de maintenance.

Le contrôle de la santé des ouvrages se fait classiquement par inspection visuelle. Cette dernière permet de fournir des informations utiles sur l'état de détérioration visible comme par exemple la présence de défauts et l'apparition de fissurations. Les inspections visuelles rentrent dans le cadre de la surveillance périodique IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art) visant à classer l'état des différents ouvrages selon une typologie établie à l'avance. Cependant, les inspections visuelles ne sont pas en mesure d'évaluer la résistance ou les dégradations internes de la structure (Aubagnac et al. 2008). Donc, la mise en place d'un protocole de surveillance périodique ne dispense pas les gestionnaires de recourir à d'autres moyens de veille et d'évaluation tels que les techniques de contrôle non destructif ou la surveillance continue. Parmi ces moyens on peut citer :

- **Les méthodes électromagnétiques** : Parmi les techniques électromagnétiques d'auscultation les plus employées en génie civil, on peut citer la technique radar (Dérobert 2003). Cette technique se base sur la réflexion et l'atténuation d'ondes électromagnétiques rencontrant des hétérogénéités. L'analyse des temps d'émission et de réception permet l'identification des milieux investigués. Les applications de la technique comprennent la localisation des armatures présentes dans les ouvrages d'art (Dérobert 2003) et la détection des cavités sous les dalles en béton (Ostrowski 2005). Les limitations de cette technique sont l'impossibilité d'ausculter à l'intérieur des gaines métalliques ainsi que la diminution de la précision de la mesure avec la densité des renforcements et l'épaisseur d'enrobage. L'auscultation des ouvrages en bois par la technique radar a été étudiée par Muller (2003). Il a rapporté que cette technique est adaptée pour la détection des zones de pourritures dans les ponts en bois. Les radargrammes que l'auteur a obtenus sur une poutre d'un pont montrent clairement les fissures et les zones attaquées par les champignons. Par contre, le signal radar est fortement sensible à l'humidité du bois (Sbartai 2011). De plus, la constante

diélectrique, paramètre essentiel de la mesure, est sensible à l'orientation des fibres (Martinez-Sala et al. 2013).

- **Les méthodes radiographiques** : Ces méthodes consistent à réaliser un cliché radiographique à l'aide des rayons gamma produits par des sources radioactives ou en utilisant les rayons X produits par des sources électriques. Les méthodes radiographiques sont utilisées essentiellement pour l'évaluation de l'état des éléments de renforcement de précontrainte (tête, câbles) ainsi que pour la détection des vides d'injection dans les ouvrages d'art en béton et la détection de fils rompus (Guinez 1997, Ostrowski 2005). Le système SCORPION (radioSCOpie par Rayonnement Pour l'Inspection des Ouvrages en béton) développé par le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) a été utilisé pour l'évaluation de l'état du parc français d'ouvrages d'art en bétons précontraints. Ce système comporte un accélérateur linéaire, une passerelle de visite d'ouvrage ainsi qu'un enregistrement vidéo en temps réel. Par contre ces méthodes présentent plusieurs inconvénients. Elles sont lentes, lourdes à mettre en place et très onéreuses. En outre, l'application de ces méthodes ne permet pas une visualisation complète de l'ouvrage ausculté et le rayonnement en lui-même est très dangereux et n'autorise pas son utilisation en milieu urbain.
- **La méthode de suivi par émission acoustique** : Cette méthode consiste en une mesure par écoute passive avec contact qui permet de détecter les sources de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires. Elle permet d'évaluer en temps réel les cinétiques d'endommagement dans les matériaux soumis à des sollicitations et d'identifier les différents mécanismes de ruine qui se produisent (Shigeishi 2001). Cependant, cette technique ne permet de détecter que les défauts actifs. Le contrôle par émission acoustique a été utilisé sur des ouvrages en béton afin d'évaluer la résistance résiduelle des câbles de précontrainte dans des zones non accessibles (Vogel et Koppel 2003). La surveillance des câbles est un exemple d'application de cette méthode. En effet, un système de surveillance des câbles CASC (Contrôle Acoustique pour la Surveillance des Câbles) a été développé par le LCPC. Ce système a été installé sur le Viaduc de Merlebach, un pont en béton à poutres précontraintes. Il a permis la détection et la localisation précise (meilleure que +/- 10cm) des ruptures (Tissier et al. 2005). En revanche, l'application de la technique d'EA sur les ouvrages d'art est limitée par la difficulté de dissocier les signaux émis par des mécanismes de fissuration par rapport aux bruits de fonctionnement du pont. Ces bruits représentent 98% des signaux recueillis (Hamstad et McColskey 1997). Plusieurs chercheurs ont constaté que le choix du capteur est primordial afin d'éliminer le maximum de bruits parasites (Hamstad et McColskey 1997, Sison et al. 1998). Le principe de fonctionnement de la technique de l'EA est présenté dans le paragraphe suivant.

II.3- Suivi de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois par EA

II.3.1- Présentation de la méthode EA

Définition et historique

L'émission acoustique est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires, résultant de micro-déplacements locaux internes au sein d'un matériau soumis à une sollicitation statique ou dynamique (norme AFNOR NF A09-350). La technique de l'émission acoustique consiste donc à détecter ces ondes élastiques afin de récupérer des

informations en temps réel sur le comportement mécanique du matériau (Perrin 2009, Sibil 2011).

Les premières recherches menées sur l'émission acoustique ont été réalisées au début du 20^{ème} siècle, quand les scientifiques ont rapporté la présence de sons audibles qui accompagnent la déformation des matériaux notamment le fameux « cri » de l'étain lors du maillage de ce dernier. Le véritable démarrage de la technique de l'émission acoustique est marqué par l'étude scientifique de Kaiser en 1950. L'irréversibilité des phénomènes sources d'EA appelée effet Kaiser est rapportée dans cette étude. Ensuite, la technique commence à être utilisée dans l'industrie. Le contrôle des cartes de la fusée POLARIS en 1964 présente la première application industrielle de la technique de l'EA (Boulanger 1993). Depuis 1980, la technique a été développée dans de nombreuses applications (Roget 1990). Ces dernières vont de l'investigation physique des matériaux à la surveillance en service de réservoirs et d'appareils sous pression (Lackner et Dusek 2008) en passant par la surveillance de fabrication et d'usinage (Kek et Grum 2008), la surveillance de machines tournantes et le contrôle et l'évaluation des matériaux composites (Skawinski et al. 2008).

Détection, acquisition, traitement et analyse des signaux d'EA

La détection d'une onde mécanique sur la surface d'un matériau et sa conversion en un signal d'émission acoustique sont assurées par un capteur généralement de type piézoélectrique (Roget 1988). Il existe deux grandes familles de capteurs piézoélectriques utilisés en émission acoustique (Huguet 2002). Les capteurs « large bande » qui possèdent une bande passante dans une zone étendue de fréquences allant jusqu'au MHz. La deuxième famille s'appelle « capteurs résonnants ». Ils possèdent une bande de sensibilité moins large autour d'une fréquence de résonance. Ils sont généralement plus sensibles que les capteurs « large bande » sur cette gamme de fréquence restreinte. Le choix du capteur peut être conditionné par le type d'analyse recherchée. En effet, une source d'EA ne peut être détectée par un capteur que si ce dernier possède les bonnes caractéristiques et que la source est suffisamment énergétique. Le capteur est couplé à la surface du matériau soit par la mise en place d'un fluide (classiquement un gel de silicone) et d'une pression de maintien soit par un couplage solide (colle, céramique...) soit par un couplage avec un guide d'onde interposé. Le dernier type de couplage est utilisé lorsque l'ambiance de la structure à contrôler est non-supportable par le capteur. La qualité du couplage est validée par le test normalisé Hsu-Nielsen (Nielsen 1980). L'utilisation d'un réseau de capteurs sur la même structure permet de localiser les sources émissives. En effet, en fonction des temps d'arrivée d'un signal acoustique aux différents capteurs, on peut remonter par triangulation aux coordonnées de l'événement acoustique. Ceci nécessite l'insertion de la distance entre les capteurs ainsi que la vitesse de propagation dans le logiciel d'acquisition.

En réalité, les capteurs constituent les premiers éléments d'une chaîne d'acquisition d'EA. Cette chaîne est généralement composée, en plus des capteurs, de préamplificateurs et d'un système d'acquisition (figure 34). Les préamplificateurs sont reliés directement aux capteurs. Ils permettent l'amplification et le conditionnement des signaux ainsi que l'amélioration du rapport signal sur bruit et le filtrage des fréquences non désirables. Les gains des préamplificateurs varient de 20, 40 à 60 dB (Roget 1988). Des filtres passe-haut et passe-bas peuvent être aussi incorporés afin d'optimiser le rapport signal sur bruit. Le système d'acquisition est composé d'une carte. Cette dernière permet la gestion de la configuration des paramètres d'acquisition, la numérisation des signaux et la visualisation des graphes d'acquisition. Le système d'acquisition permet enfin le stockage de ces données.

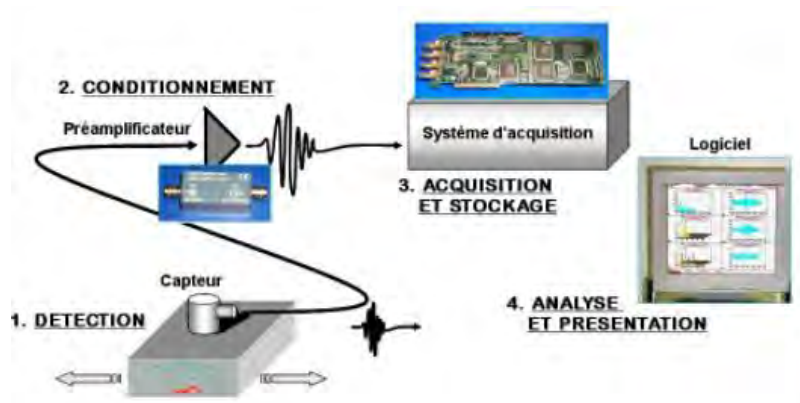


Figure 34 : Schéma d'une chaîne d'acquisition d'émission acoustique (MISTRAS 2004)

Les signaux acoustiques stockés par le système d'acquisition feront ensuite l'objet d'un traitement et d'une analyse afin de différencier les différents mécanismes sources. Pour éliminer le maximum de signaux parasites, un seuil de déclenchement est établi. Ce seuil doit permettre de s'affranchir le plus possible du bruit de fond tout en conservant le maximum d'informations provenant du matériau étudié. Le seuil est déterminé avant l'essai en utilisant les sources Hsu-Nielsen (Nielsen 1980). Outre l'élimination des sources parasites, le seuil permet également de discrétiser les signaux. Les salves discrétisées peuvent être caractérisées dans le domaine temporel par des paramètres de forme (figure 35a) et dans le domaine spectral par des paramètres fréquentiels (figure 35b). Les détails de différents paramètres sont fournis en annexe 1.

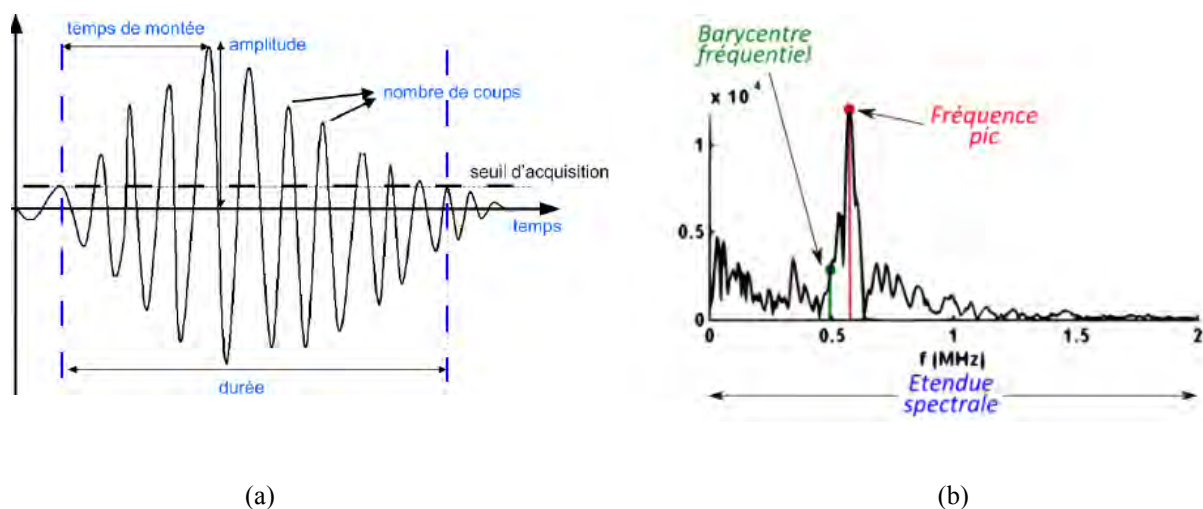


Figure 35 : Descripteurs acoustiques (a) paramètres temporels (d'après Scida et al. 2011) (b) paramètres fréquentiels (d'après Le Gall 2016)

En exploitant les différents paramètres issus des salves acoustiques appelés aussi descripteurs, plusieurs types d'analyses peuvent être réalisés. Naturellement ces méthodes d'analyses ont évolué en concordance avec les progrès technologiques de traitement des données. Dans cette partie, on va citer les différents types d'analyses. Les résultats de ces travaux seront présentés dans les prochaines parties qui s'intéresseront au suivi par EA de l'endommagement du matériau bois et des matériaux composites.

- L'analyse temporelle : permet d'étudier l'évolution d'un descripteur de la salve en fonction du temps (Benzeggagh et al. 1992 ; Chen et al. 1992 ; Barre et al. 1994 ; Ceysson et al. 1996 ; Huguet 2002).

- L'analyse statistique : permet la séparation des mécanismes sources d'EA à travers l'analyse des courbes de distribution cumulées des salves en fonction d'un descripteur (Boinet 2004).
- L'analyse de corrélation : consiste à tracer l'évolution d'un descripteur de salve acoustique en fonction d'un autre. Plusieurs groupes de signaux peuvent apparaître dans cette analyse. Chaque groupe peut être attribué à un mécanisme spécifique (Saliba 2012)
- L'analyse fréquentielle: consiste à analyser le contenu fréquentiel des salves par une transformée de Fourier (De Groot et al. 1995 ; Masera et al. 2011 ; Lu et al. 2011) ou à travers une décomposition en ondelettes du signal (Subba Rao et Subramanyam 2008 ; Oskoueï et al. 2009).

Les méthodes d'analyses évoquées présentent certaines limites. En effet, la variation des différents descripteurs de salve (amplitude, énergie, durée...) d'un essai à l'autre en fonction du matériau, du type de capteur, du type de couplage et du système d'acquisition empêche la transposition directe des résultats obtenus dans une étude à une autre. De plus, dans la majorité des travaux, les zones d'amplitudes associées à des endommagements spécifiques, présentent des recouvrements. Cela augmente l'incertitude d'attribution des signaux à des mécanismes d'endommagement spécifiques en se basant uniquement sur l'amplitude.

Il existe une possibilité pour contourner ce problème à travers l'analyse simultanée de plusieurs paramètres (analyse statistique multi-variables) en utilisant les outils de classification statistique.

- Analyse statistique multi-variables : La méthode d'analyse statistique multi-variables permet de déterminer les ressemblances et les différences entre les signaux en analysant simultanément plusieurs paramètres (temporels, fréquentiels). En effet, chaque signal d'émission acoustique est assimilé à un vecteur constitué de n paramètres. Grâce à l'analyse statistique multi-variables, les signaux d'EA peuvent être divisés en classes de signaux. Chaque classe peut correspondre à un mécanisme d'endommagement spécifique (Huguet 2002, Godin 2011, Sibil 2011, Hamdi 2012, Munoz 2015, Lamy 2016). Plusieurs algorithmes de segmentation sont disponibles (max-min distance, forgy, cluster, isodata, k-means...). L'algorithme k-means est le plus répandu (Papass et al. 2001; Kostopoulos et al. 2007 ; Moevus et al. 2008 ; Marec 2008 ; Hamdi 2012 ; Kempf et al. 2014 ; Munoz 2015). Le principe de cet algorithme consiste à l'optimisation de la répartition des signaux en classes de manière à ce que les classes soient les plus compactes possibles.

II.3.2- Suivi de l'endommagement du bois par EA

Dans la littérature, contrairement aux autres matériaux (composites, béton, acier), les travaux consacrés à l'utilisation de l'EA pour le suivi de l'endommagement du matériau bois ne sont pas nombreux. En effet, le comportement mécanique du bois dépend de la sollicitation, du type d'essence, de sa structure anatomique, de l'humidité absorbée etc.... Ceci engendre une grande variabilité au niveau de l'activité acoustique. La généralisation des résultats d'une étude à une autre devient très difficile. La partie suivante commence par exposer l'influence de différents paramètres (type d'essence, type de sollicitation, structure du bois...) sur la réponse acoustique. Ensuite, les différentes méthodes d'analyse employées pour identifier les mécanismes d'endommagement sont présentées

Influence de l'essence et de la sollicitation sur la réponse acoustique

L'émission acoustique a été appliquée sur différents types d'essences afin de comparer leurs réponses. La première étude comparative a été réalisée par Ansell (1982). Trois essences

résineuses (Douglas, pin de Paraná et pin Sylvestre) ont été sélectionnées pour cette étude en se basant sur leur degré d'hétérogénéité introduite par les proportions de bois final (BF) au niveau du cerne annuel. En effet, le Douglas est considéré comme bois hétérogène vu les transitions remarquables entre le bois initial (BI) et le bois final (BF). La structure du pin de Paraná est plus uniforme au niveau des cernes de croissance en comparant avec la structure du Douglas. Le pin Sylvestre a une structure intermédiaire. Des essais de traction parallèle au fil ont été réalisés sur des éprouvettes rectangulaires (15 cm x 10 cm x 0,25 cm). Un capteur piézoélectrique PZT-5 (fréquence de résonance 200 kHz) a été utilisé et les signaux sont filtrés entre 100 kHz et 300 kHz. L'auteur a constaté une influence de la structure du matériau bois sur la réponse acoustique. En effet, le bois avec une transition importante entre BI et BF émet plus de signaux que le bois avec une structure uniforme (Tableau 10). En outre, le bois qui possède une structure hétérogène commence à émettre des signaux à 5%-10% de la déformation à la rupture tandis que le bois dont la structure est plutôt uniforme n'émet des signaux qu'à partir de 20% de la déformation maximale.

Tableau 10 : Illustration des propriétés mécaniques de différentes essences testées ainsi que le nombre de signaux acoustiques enregistrés à la rupture (Ansell 1982)

Material	Failure stress	Failure strain	Modulus of elasticity	Total counts at failure	Work of fracture	Density
	MNm ⁻²	%	GNm ⁻²	k counts	kJm ⁻²	kgm ⁻³
Scots pine	85.4 (16.0)	0.76 (0.10)	11.3 (1.88)	14.6 (8.6)	23.0 (4.1)	505
Parana pine	80.1 (11.2)	0.70 (0.13)	12.0 (3.01)	9.9 (5.2)	16.7 (2.7)	498
Douglas-fir	70.3 (23.0)	0.53 (0.17)	13.4 (1.92)	38.5 (19.5)	24.1 (3.2)	543

Quelques années plus tard, Vautrin et Harris (1987) ont utilisé la technique d'émission acoustique pour suivre l'endommagement de deux feuillus (chêne et hêtre) et un résineux (Douglas) sollicités en flexion 4-points. Le même équipement acoustique que pour le travail d'Ansell (1982a) a été utilisé dans cette étude. En revanche, les auteurs se sont aperçus qu'aucune ressemblance ne peut être identifiée au niveau de la forme et de l'évolution de l'activité acoustique des différentes essences utilisées dans les deux études. Par contre, dans leur étude, Vautrin et Harris ont constaté que les courbes présentant le nombre de salves cumulées ont quasiment la même forme d'évolution pour les trois essences étudiées avec une intensification de la réponse acoustique au niveau de la rupture des éprouvettes (figure 36). Ils ont aussi noté que le Douglas commence à émettre des signaux dans la partie linéaire de la courbe contrainte-déplacement (figure 36c) contrairement aux deux feuillus qui restent quasi-silencieux dans cette phase (figure 36a et 36b). Les auteurs ont trouvé que le Douglas génère plus de signaux pendant son endommagement. Ils ont conclu que les résineux sont plus émissifs que les feuillus. Cette constatation est approuvée par Reiterer et al. (2000) dans leur étude réalisée sur trois feuillus (aulne, chêne et frêne) et deux résineux (épicéa et pin) sollicités en mode I. Ils ont constaté que le nombre de coups cumulés est plus important pour les résineux que pour les feuillus (figure 37). Ils ont expliqué ce résultat par le fait que les résineux ont un comportement plus ductile que les feuillus.

Par contre, Chen et al. (2006) ont constaté que les feuillus sont plus émissifs que les résineux. En effet, ils ont utilisé l'EA pour suivre l'endommagement d'éprouvettes en bois de résineux (épicéa) et en bois de feuillus (Lauan rouge) sollicitées en torsion statique. Les résultats montrent que les feuillus ont produit plus d'événements acoustiques que les résineux (figure 38).

Donc, on peut conclure que les signaux recueillis lors de l'endommagement de bois de résineux ne sont pas toujours plus élevés que ceux recueillis lors de l'endommagement de bois de feuillus. Bien que liée à l'essence, la réponse acoustique dépend aussi du type de sollicitation ainsi que de la position du capteur par rapport à l'endommagement (Aicher 2001, Varner 2011).

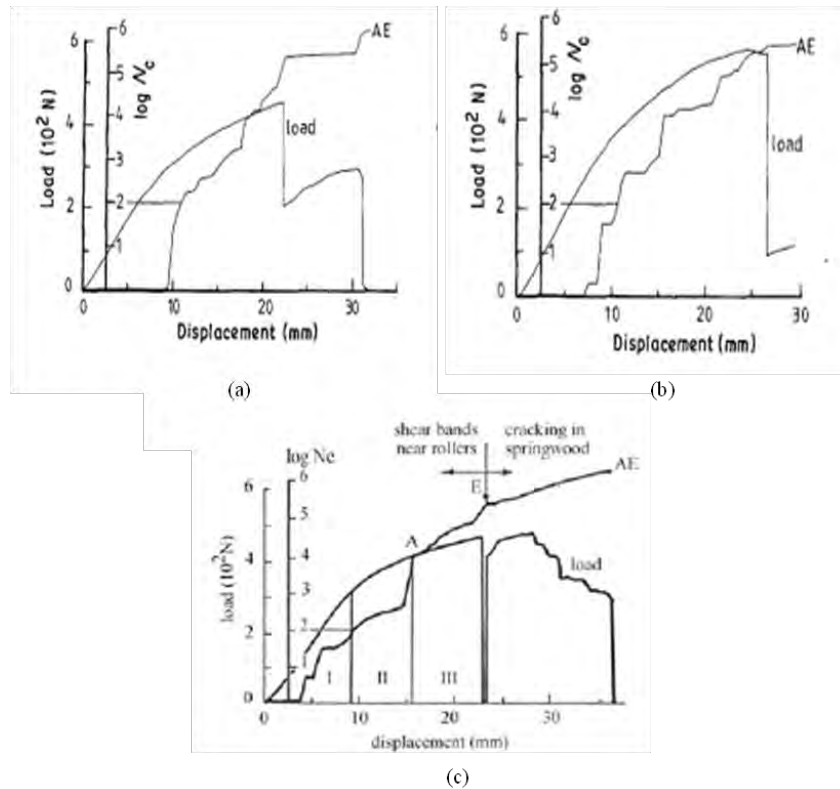


Figure 36 : Evolution de la charge et du nombre de salves cumulées en fonction du déplacement (a) éprouvette de hêtre, (b) éprouvette de chêne, (c) éprouvette de Douglas (d'après Vautrin et Harris 1987)

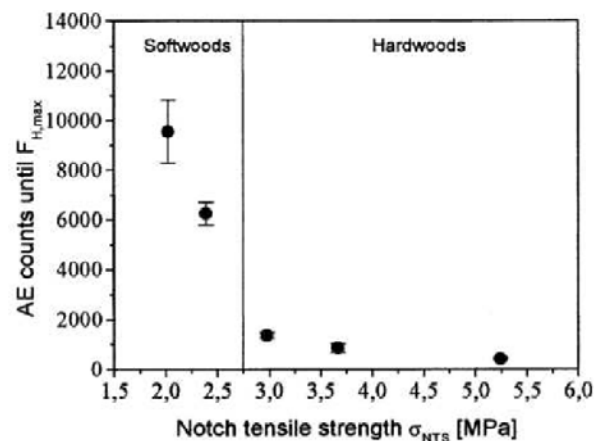


Figure 37 : Nombre de coups en fonction de la contrainte pour des bois de résineux et des bois de feuillus (d'après Reiterer 2000)

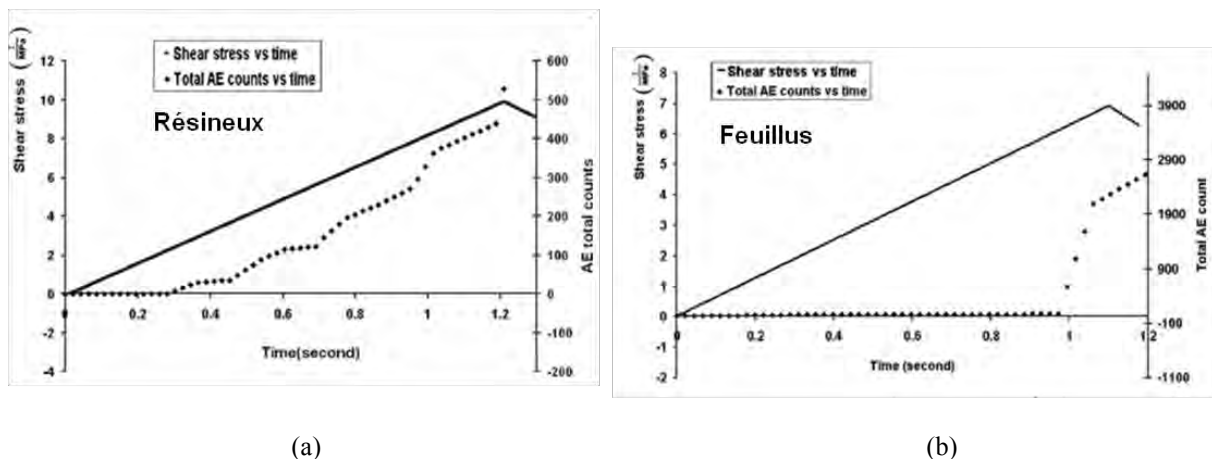


Figure 38 : Nombre de coups cumulés en fonction du temps comparé à l'évolution de la charge en fonction du temps lors d'un essai de torsion statique sur des bois (a) résineux (b) feuillus (d'après Chen et al. 2006)

Identification des mécanismes d'endommagements

Dans la littérature, l'investigation par EA est souvent complétée par des techniques d'observation (MEB, tomographie...) pour identifier les mécanismes d'endommagement du matériau bois.

Dans son étude comparative réalisée sur trois essences résineuses sollicitées en traction parallèle au fil, Ansell (1982) a divisé la réponse acoustique en terme de croissance de l'endommagement en « lentes émissions » et « rapides émissions ». La première classe est attribuée à la propagation graduelle des microfissures au niveau de la paroi cellulaire. Or, l'augmentation de l'activité acoustique est attribuée soit au cisaillement inter-laminaire au niveau des plans de faiblesse tels que les interfaces entre le BI et le BF ou les interfaces entre les rayons ligneux et les trachéides, soit à la rupture fragile des trachéides. Ces mécanismes ont été observés à l'aide d'une microscopie électronique (figure 40).

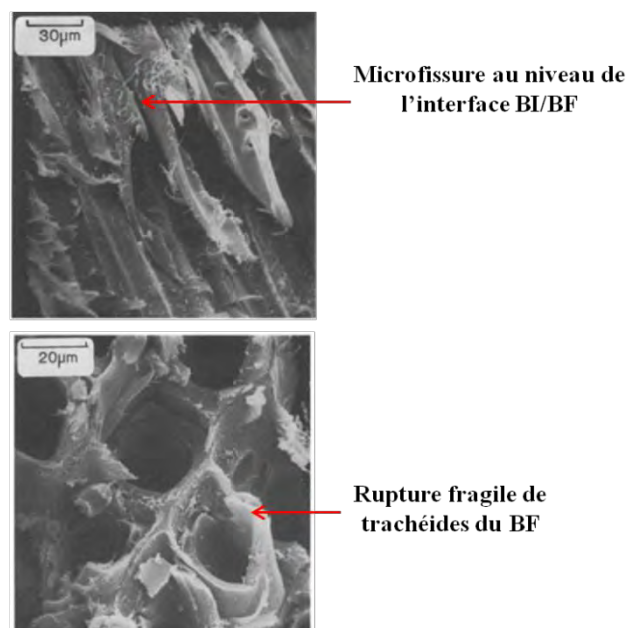


Figure 39 : Certains mécanismes d'endommagement identifiés dans le bois de Pin Sylvestre sollicité en traction longitudinale (d'après Ansell 1982)

L'analyse simultanée des mécanismes d'endommagement et des courbes de l'activité acoustique a permis à Vautrin et Harris, dans leur étude mentionnée dans le paragraphe précédent (page 43) sur le bois de Douglas sollicité en flexion quatre-points, d'établir un critère à partir duquel l'endommagement est considéré comme critique. En effet, ils ont divisé la courbe d'activité acoustique en trois zones (figure 40) :

- Zone I : Correspond à la partie linéaire de la courbe charge-déplacement. Le nombre de signaux enregistrés dans cette phase est inférieur au seuil établi pour que l'endommagement soit considéré comme significatif (seuil égal à 100 signaux)
- Zone II : Caractérisée par une diminution puis une augmentation au niveau de la pente de l'évolution de l'activité acoustique. L'endommagement n'est pas visible à l'œil. Par contre les observations microscopiques réalisées permettent de distinguer des bandes de cisaillements orientées à 45° dans la partie comprimée de la poutre.
- Zone III : Caractérisée par une intensification de l'activité acoustique. Des endommagements au niveau du BI et de l'interface BI/BF dans la partie tendue de la poutre ont été observés.

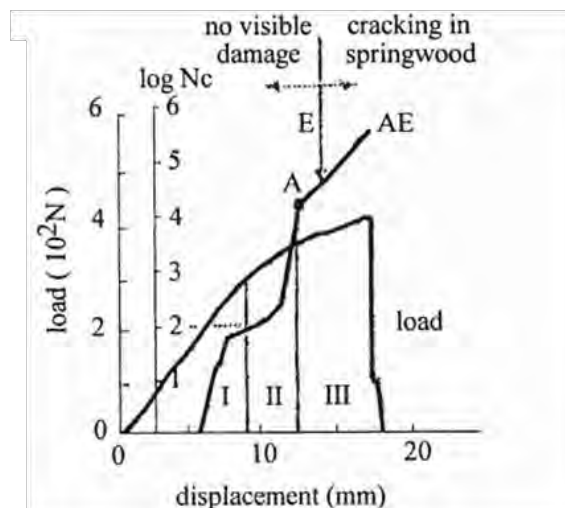


Figure 40 : Les différentes phases de l'activité acoustique pendant l'endommagement du bois de Douglas (d'après Vautrin et Harris 1987)

Dans la même étude, pour le bois de hêtre, Vautrin et Harris, ont observé à l'aide d'une microscopie électronique que l'endommagement a commencé dans la zone tendue de la poutre au niveau du BI du premier cerne annuel, ensuite, une fissuration longitudinale s'est propagée au niveau de l'interface BI/BF. Quant à l'origine de l'endommagement du bois de chêne, les auteurs ont mentionné un cisaillement inter-laminaire aux niveaux des interfaces fibres/rayons ligneux et fibres/vaisseaux.

Avec le progrès technologique du traitement des données, les méthodes d'analyse des signaux acoustiques recueillis lors de l'endommagement du matériau bois ont évolué. Afin d'identifier la signature acoustique associée aux différents mécanismes d'endommagement du matériau bois sollicité mécaniquement, les travaux récents utilisent la méthode d'analyse multi-variables, introduite dans le paragraphe (II.3.1) de ce chapitre. Cependant, jusqu'à aujourd'hui, peu d'études dans la littérature ont été réalisées sur l'application de cette méthode d'analyse dans le domaine de l'endommagement du matériau bois. Trois études peuvent néanmoins être citées par la suite.

Baensch et al. (2015) ont étudié l'émission acoustique collectée lors d'un essai de traction longitudinale sur des éprouvettes miniatures en épicea. L'essai est réalisé in-situ dans un micro-tomographe. Deux capteurs miniatures de type M321 (fournis par Fuji Ceramics Corp., Shizuoka, Japan) ont été utilisés dans cette étude, leur fréquence de résonance est comprise entre 300 kHz et 800 kHz. Les signaux enregistrés ont été classés par une méthode de reconnaissance de forme à l'aide d'un algorithme de traitement statistique développé par Sause et al. (2012). Cet algorithme se base sur l'analyse simultanée de différents paramètres fréquentiels obtenus à partir des transformées de Fourier. Ces paramètres sont présentés sur la figure 41. Deux classes de signaux ont été identifiées (figure 42). Une première classe (A_L) (figure 42) caractérisée par un pic fréquentiel pondéré PFP (PFP= racine carré du produit du pic fréquentiel et du barycentre fréquentiel) égal à 340 kHz tandis que la deuxième classe (B_L) (figure 42) est caractérisée par un PFP égale à 580 kHz. Les observations tomographiques réalisées simultanément avec le suivi par EA (figure 43) ont permis l'attribution de ces deux classes à des mécanismes spécifiques. En effet, la première classe est attribuée à la séparation lente entre les parois cellulaires, tandis que la deuxième classe est attribuée aux fissurations des parois cellulaires.

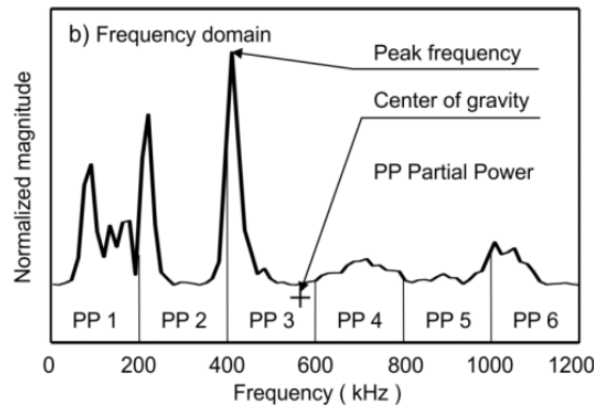


Figure 41 : Les descripteurs fréquentiels utilisés dans la classification (d'après Baensch et al. 2015)

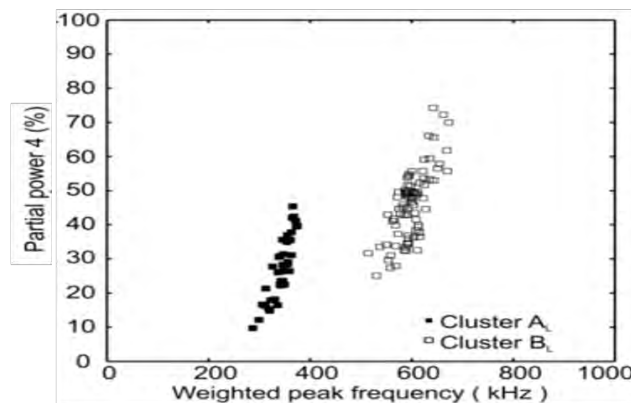


Figure 42 : Résultats de classification des signaux d'EA collectés lors d'un essai de traction longitudinale sur des éprouvettes miniatures en épicea (d'après Baensch et al. 2015)

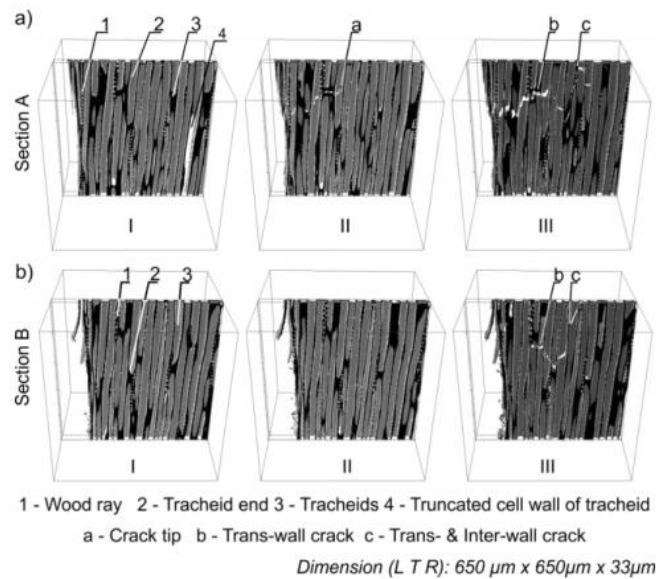


Figure 43 : Différents mécanismes d'endommagement identifiés par des observations tomographiques (a) dans le plan LT (b) dans le plan LR (d'après Baensch et al. 2015)

Dans ses travaux de thèse, Lamy (2016) a suivi l'endommagement d'éprouvettes de Douglas sollicitées en mode I. Les signaux sont enregistrés par le biais de quatre capteurs piézoélectriques Nano30 dont la fréquence de sensibilité est comprise entre 125 kHz et 750 kHz. Les signaux recueillis pendant ces essais font l'objet d'une analyse statistique multi-variables. La méthode de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a été utilisée pour classer les données. Le principe de cette méthode est de rassembler les signaux d'une manière itérative selon un critère de ressemblance défini au préalable et basé sur la distance entre les individus. Les résultats de cette classification ont permis de séparer quatre groupes des signaux. Les formes des signaux de chaque classe ont été analysées. Afin de labelliser les différentes classes, une analogie avec les formes des signaux types de mécanismes d'endommagements des matériaux composites a été réalisée (figure 44). Il a donc attribué la classe 1 à la rupture de fibre, la classe 2 à la fissuration de la matrice (rupture de la paroi primaire pour le bois), la classe 3 à la décohésion entre les fibres et la paroi primaire des cellules et la classe 4 au délaminage (décollement de la paroi primaire).

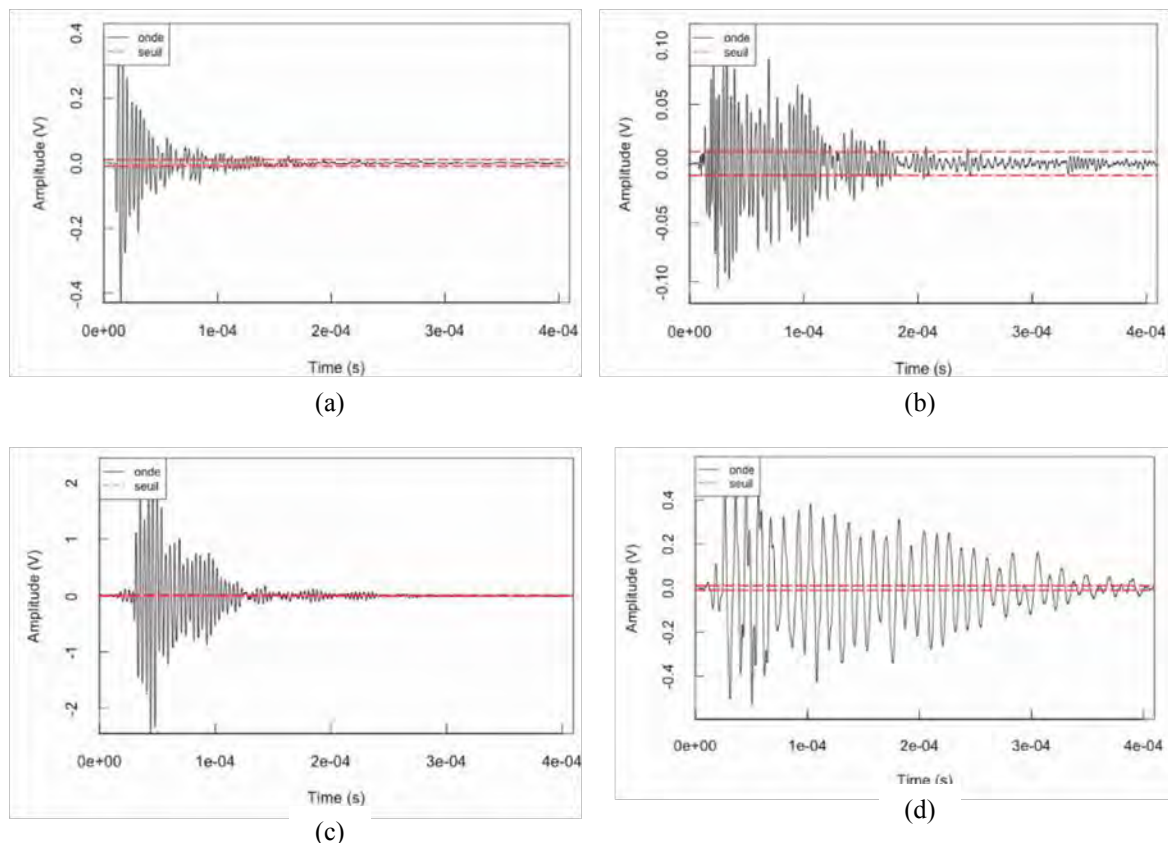


Figure 44 : Formes d'onde typiques pour les quatre familles d'endommagement du matériau bois identifiées par Lamy (2016) (a) classe 1, (b) classe 2, (c) classe 3 et (d) classe 4 (d'après Lamy 2016)

Sur le même type d'essai, Diakhate et al. (2017) ont suivi par EA la propagation des fissures sur des éprouvettes DCB (Double Cantilever Beam) de Douglas et de Sapin blanc. Les signaux sont enregistrés par le biais de deux capteurs piézoélectriques d'une gamme fréquentielle variant entre 200-750 kHz (fréquence de résonance égale à 450 kHz). Les signaux recueillis font l'objet d'une classification statistique à l'aide de l'algorithme des k-moyennes. Quatre descripteurs de salve acoustique ont été sélectionnés à travers une étude de la corrélation des paramètres. Les descripteurs pertinents sont : l'amplitude, le nombre de coups, le pic fréquentiel et le barycentre fréquentiel. Le critère de Davies et Bouldin (détails donnés dans annexe 3) est utilisé pour sélectionner le nombre optimal de classes qui est égal à trois dans cette étude. Les auteurs ont mentionné que les classes peuvent être parfaitement séparées et caractérisées par deux paramètres (le pic fréquentiel et le nombre de coups) (figure 45a). La caractérisation de ces trois classes est donc réalisée en se basant sur ces deux paramètres et est résumée dans le tableau 11. L'attribution des classes à des mécanismes spécifiques a été réalisée à l'aide d'une localisation de différentes classes sur le chemin de fissuration (figure 45b) et à l'aide d'une observation macroscopique. Par conséquent, la classe 1 est attribuée aux microfissurations dans le bois, la classe 2 est attribuée à la propagation de la pointe de fissure ainsi que la classe 3 est attribuée à la rupture des fibres.

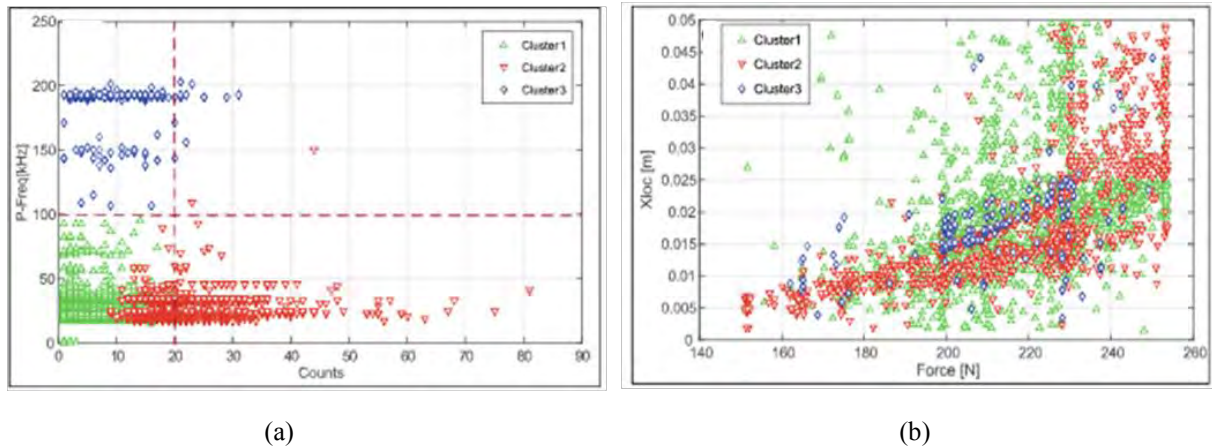


Figure 45 : Résultats de la classification (a) répartition des trois classes en fonction du nombre de coups et du pic fréquentiel (b) localisation des trois classes suivant l'axe de la propagation de la fissure (d'après Diakhate et al. 2017)

Tableau 11 : Caractérisation des trois classes identifiées en terme de pic fréquentiel et du nombre de coups (Diakhate et al. 2017)

Classes Paramètres	Pic fréquentiel	Nombre de coups
Classe 1	Inférieur à 100 kHz	Inférieur à 20
Classe 2	Inférieur à 100 kHz	Supérieur à 20
Classe 3	Supérieur à 100 kHz	Inférieur à 20

II.3.3- Suivi de l'endommagement des matériaux composites par EA

Durant le processus de dégradation des matériaux composites soumis à une sollicitation mécanique, quatre principaux modes d'endommagement peuvent intervenir (figure 46) (Berthelot 1999, El Guerjouma et al. 2001). La technique d'émission acoustique a été largement utilisée pour étudier ces différents mécanismes (Benzeggagh et al. 1992 ; Chen et al. 1992 ; Huguet 2002 ; Kostopoulos et al. 2007 ; Loutas et al. 2009 ; Lu et al. 2011 ; Godin et al. 2011 ; Masmoudi 2013 ; Munoz 2015).

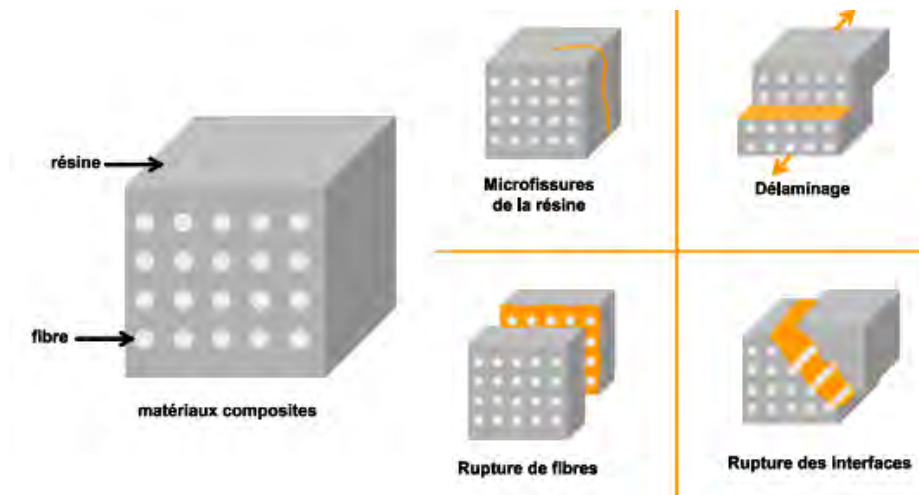


Figure 46 : Schématisation des principaux modes d'endommagement des matériaux composites (d'après Marec 2008)

Afin de différencier ces modes d'endommagement à partir des signaux enregistrés, les premières études ont été consacrées à l'analyse d'un seul paramètre d'EA (Benzeggagh et al. 1992; Chen et al. 1992; Barre et al. 1994; Ceysson et al. 1996). Dans ces travaux, l'amplitude a été considérée comme un paramètre discriminant pour les différents types d'endommagement au sein des matériaux composites. En effet, chaque mode de ruine est associé à une gamme d'amplitude spécifique: de 40 dB à 50 dB pour la fissuration matricielle (Benzeggagh 1992 ; Ceysson et al. 1996), de 60 dB à 70 dB pour la décohésion fibre-matrice (Kotiskos et al. 1999), de 60 dB à 100 dB pour les ruptures de fibres (Chen et al. 1992 ; Benzaggagh et al. 1992 ; Kotiskos et al. 1999) et 62 dB pour le délaminage (Ceysson et al. 1996). Ces zones d'amplitudes varient d'une étude à l'autre selon le type d'essai et le type de matériau. De plus, dans la plupart des travaux, les gammes de fréquences bien identifiées par rapport à un endommagement spécifique, présentent des recouvrements et rendent incertaine l'attribution d'un signal à un mécanisme ayant réellement lieu, lorsque son amplitude est comprise dans une gamme de recouvrement (Huguet 2002).

Pour contourner ce problème, certaines études proposent une corrélation entre les différents paramètres de salve. Dans les travaux d'Uenoya (1995), les signaux enregistrés pendant des essais de flexion sur des composites stratifiés fibre de verre/matrice époxy ont été analysés en fonction de leurs amplitudes et de leur temps de montée. Trois classes ont été séparées. La présence de trois mécanismes d'endommagements (fissuration matricielle, décohésion et rupture de fibres) a été identifiée. En revanche, la présence des recouvrements liés à la proximité spatiale des classes empêche l'attribution des signaux à leurs mécanismes sources.

Certains chercheurs se sont intéressés à l'analyse de contenu fréquentiel des signaux afin d'attribuer une fréquence spécifique à chaque mécanisme d'endommagement. Les hautes fréquences sont attribuées aux ruptures de fibres, les fréquences intermédiaires sont attribuées à la décohésion fibre-matrice et au délaminage et les faibles fréquences sont attribuées à la fissuration matricielle (Ramirez et al. 2004). Dans les études de Giordano et al. (1998) et de Oskoueï et al. (2009), la rupture des fibres est identifiée aux alentours d'une fréquence de 400 kHz et à une fréquence supérieure à 300 kHz dans l'étude de De Groot et al (1995). La bande fréquentielle propre à la décohésion fibre/matrice varie de 240 kHz à 310 kHz et celle de la fissuration matricielle varie entre 90 kHz et 200 kHz (De Groot et al. 1995 ; Oskoueï et al. 2009, Lu et al. 2011).

Or, les méthodes paramétriques conventionnelles se sont avérées limitées en terme d'identification des mécanismes sources puisqu'elles présentent des zones de recouvrement. Afin de contourner ce problème, des techniques d'analyse statique multi-variables, basées sur des méthodes de reconnaissance de forme sont utilisées. Ces méthodes ont permis d'identifier et d'attribuer des signatures acoustiques aux mécanismes complexes d'endommagement de composites lors de sollicitations mécaniques (Huguet 2002, Godin 2011, Hamdi 2012, Masmoudi 2013, Munoz 2015). En titre d'exemple, l'étude de Munoz (2015) a travaillé sur le suivi par EA de l'endommagement de composites carbone/époxy sollicités en traction et en fatigue. Une classification des signaux recueillis a été réalisée à l'aide de l'algorithme des k-moyennes. Les jeux de descripteurs pertinents sélectionnés sont l'amplitude, le temps de montée, l'énergie et la durée. Un nombre de classes optimal égal à trois a été validé par le critère de Davies et Bouldin. La classe caractérisée par une forme d'onde de durée courte, un temps de montée moyen et une énergie et une durée relativement faible est attribuée à la fissuration matricielle. Celle attribuée à la décohésion fibre/matrice est caractérisée par un temps de montée important, une durée, une énergie et une amplitude moyenne. Quant à la rupture des fibres, la classe des signaux associée est caractérisée par un temps de montée très court, une durée assez importante, une forte énergie et une haute amplitude. Ces résultats concordent bien avec les travaux de (Huguet 2002, Godin et al. 2011, Hamdi 2012, Masmoudi 2013). A travers ces analyses, des formes d'ondes typiques associées aux différents mécanismes d'endommagement ont été proposées (figure 47).

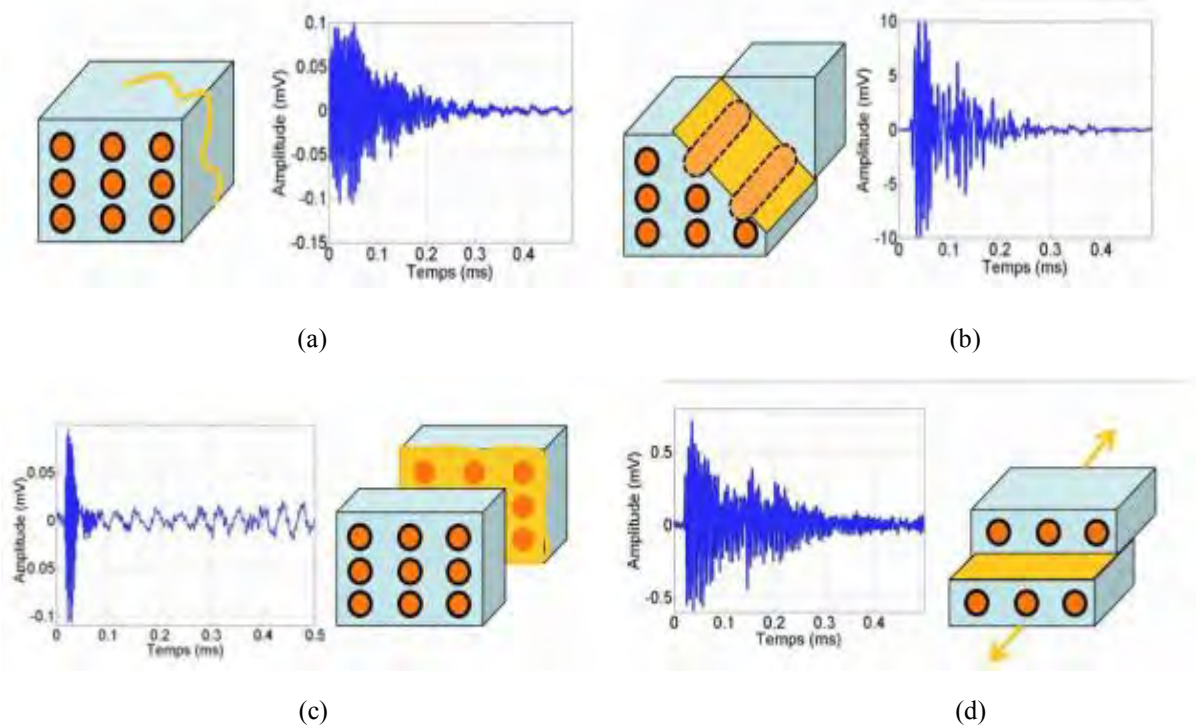


Figure 47 : Forme d'ondes de différents modes d'endommagement des matériaux composites (a) fissuration de matrice, (b) décohésion fibre/matrice, (c) rupture de fibre et (d) délaminage (d'après Hamdi 2013)

III- Conclusion

Ce chapitre bibliographique a permis de comprendre l'intérêt mécanique des structures multi-matériaux à base de bois ainsi que la complexité des phénomènes d'endommagement de ces structures. Ce chapitre bibliographique a également mis en évidence l'intérêt primordial du suivi de leurs endommagements afin d'éviter leurs détériorations et garantir la sécurité des usagers. Il est donc nécessaire de mettre en place une méthode de suivi fiable et facile à mettre en œuvre. Dans cette perspective se situe la technique de l'émission acoustique (EA). En effet, l'EA permet la détection précoce des défauts évolutifs, la localisation des sources acoustiques ainsi que la caractérisation et l'identification de différents mécanismes d'endommagement. De plus, la technique d'EA a fait ses preuves pour le suivi et l'identification des mécanismes d'endommagement de plusieurs types de matériaux notamment les matériaux composites. En revanche, l'utilisation de la technique d'EA dans le domaine du bois n'a pas connu le même développement. En effet, le traitement et l'interprétation des signaux recueillis ne sont pas aisés puisque la réponse acoustique dépend de plusieurs facteurs (essence, structure anatomique de bois, type de sollicitation...). Les résultats les plus encourageants sur l'identification par EA des mécanismes d'endommagement du matériau bois sont obtenus en utilisant une approche basée sur les analyses statiques multi-variables. Mais, ces travaux sont très limités. Chaque étude est effectuée pour une seule essence soumise à un seul type de charge. Les investigations sont très intéressantes, mais loin d'être suffisantes pour fournir des conclusions convaincantes.

Comme nous l'avons indiqué dans l'introduction de cette thèse, l'ambition de ce projet de recherche est de développer une méthode de contrôle non-destructive afin de suivre l'évolution de l'endommagement dans une structure multi-matériaux à base de bois. Nous avons décidé de focaliser ce travail sur la technique d'émission acoustique. La réalisation de ce projet commence naturellement par une étude sur le matériau bois, ce qui représente un grand challenge.

La présente étude vise à obtenir une meilleure compréhension de suivi par EA de l'endommagement du matériau bois. Si l'objectif affiché est l'utilisation de l'EA pour la surveillance des structures, un passage par des manipulations en laboratoire a été nécessaire pour valider les protocoles de mise en place.

Le chapitre suivant présente les matériels et les méthodes utilisés dans ce travail expérimental. Nous détaillerons les trois essences choisies et les méthodes expérimentales mises en œuvre pour étudier l'endommagement du matériau bois sous trois sollicitations quasi-statiques (traction, compression et flexion).

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

I- Introduction

Comme présenté dans le chapitre précédent, l'activité acoustique générée par l'endommagement du matériau bois varie en fonction de la structure microscopique de l'essence, et aussi du type de sollicitation. Dans ce travail de recherche, on propose de suivre la réponse acoustique de trois essences différentes sous trois types de sollicitations quasi-statiques. Dans la première partie de ce chapitre, après avoir expliqué le choix des trois essences étudiées, les caractéristiques de chaque essence sélectionnée seront présentées. Ensuite, les différentes configurations d'éprouvettes, la mise en place ainsi que les conditions utilisées pour les essais mécaniques seront détaillés. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée aux méthodes de contrôle-non-destructif (CND) utilisées, en particulier la technique d'émission acoustique. Les méthodes complémentaires utilisées dans cette étude sont aussi exposées dans ce chapitre telles que la thermographie infrarouge et la micro-tomographie à rayons X.

II- Les essences choisies et leurs caractéristiques

II.1- Introduction

Dans les travaux de cette thèse, trois essences différentes ont été étudiées, soit deux résineux : le Douglas appelé aussi pin d'Oregon (*Pseudo tsuga menziesii*) et le sapin pectiné (*Abies pectinata*) et un feuillu : le peuplier (*Populus*).

Le choix de ces trois essences est basé sur une logique spécifique. Comme l'objectif du projet de recherche dont cette thèse fait partie est d'étudier l'endommagement des structures à base de bois, il est logique de cibler une essence couramment utilisée dans les applications structurales. Notre attention s'est portée sur le Douglas, l'un des principaux bois de construction dans le monde grâce à sa durabilité naturelle et ses propriétés mécaniques intéressantes (Collardet et Besset 1988, Barbier et Joineau 2006). Afin de comparer les résultats du bois de Douglas avec une autre essence résineuse, notre choix s'est porté sur une essence locale abondante dans les forêts des Pyrénées qui est le sapin pectiné. En outre, le Douglas et le sapin pectiné possèdent deux structures différentes notamment au niveau des cernes annuels (cf. chapitre 2 partie II.2 et II.3). L'effet de cette structure sur la réponse acoustique sera intéressant à examiner. Dans le même contexte, le choix d'un troisième bois à étudier vient à compléter notre compréhension sur l'impact de la structure du matériau sur sa réponse acoustique. Il s'agit du peuplier, qui appartient aux bois feuillus et possède une structure homogène et une densité proche des deux résineux choisis (Tableau 12).

Tableau 12 : Densités des trois essences sélectionnées (Gérard et al. 2011)

Essences	Densités
Douglas	0,54
Sapin pectiné	0,49
Peuplier	0,45

Les paragraphes suivants présentent de manière détaillée les trois essences étudiées.

II.2- Le Douglas

Le Douglas, parfois appelé pin d'Oregon ou sapin de Douglas est un conifère originaire de la côte Ouest du continent nord-américain. Il a été importé en France après la seconde guerre mondiale pour un programme de reboisement. On estime aujourd'hui le massif de Douglas en France à 420 000 ha (IFN- campagne 2006 à 2010) plaçant ainsi la France au premier rang Européen parmi les producteurs de cette essence. La ressource de Douglas est principalement regroupée au centre de la France, essentiellement dans cinq régions : le Limousin, la Bourgogne, la région Rhône-Alpes, l'Auvergne et la région Midi-Pyrénées (figure 48). Concernant la région de Midi-Pyrénées, le bois de Douglas représente la deuxième essence résineuse peuplant cette forêt (8 Mm³ soit 20% du volume de résineux) (figure 49).



Figure 48 : Concentration des peuplements de Douglas en France (Bailly et de Champs 2012)

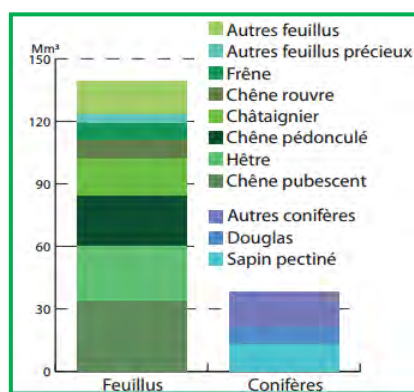


Figure 49 : Volume de bois des forêts Pyrénéennes (d'après IFN 2010)

Nom Scientifique: *Pseudotsuga menziesii*

Famille: Pinaceae

Caractéristiques particulières : Les cernes d'accroissement du Douglas sont très apparents, grâce au bois final nettement plus dense et plus coloré que le bois initial (Venet 1986) (figure 50). Le duramen est nettement distinct de l'aubier. Ce dernier a une couleur jaunâtre tandis que le duramen a une couleur rose (figure 50). Les poches de résines y sont fréquentes et les canaux résinifères ont une taille moyenne et sont localisés majoritairement dans le bois final (Outahyon 2008).

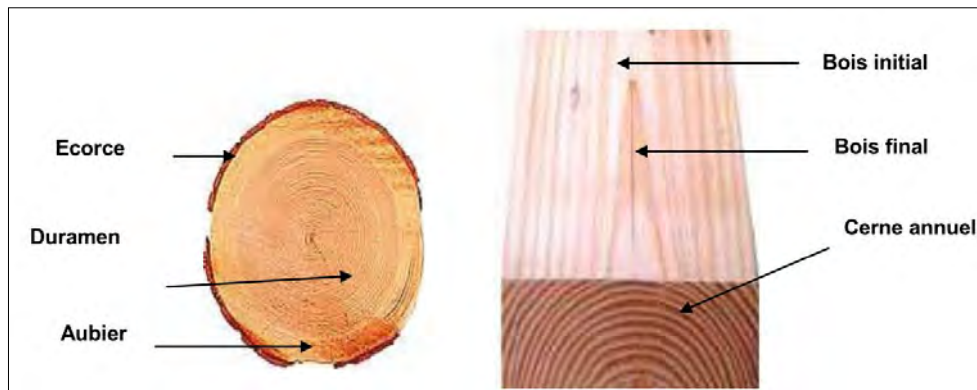


Figure 50 : Bois de Douglas (d'après Outahyon 2008)

Description anatomique (Venet 1986) : Le bois de Douglas contient des trachéides axiales, des rayons ligneux unisériés (une seule couche de cellules) (figure 51a), des trachéides radiales et des canaux sécréteurs radiaux (canaux résinifères). La transition entre le BI et le BF est brutale (figure 51b).

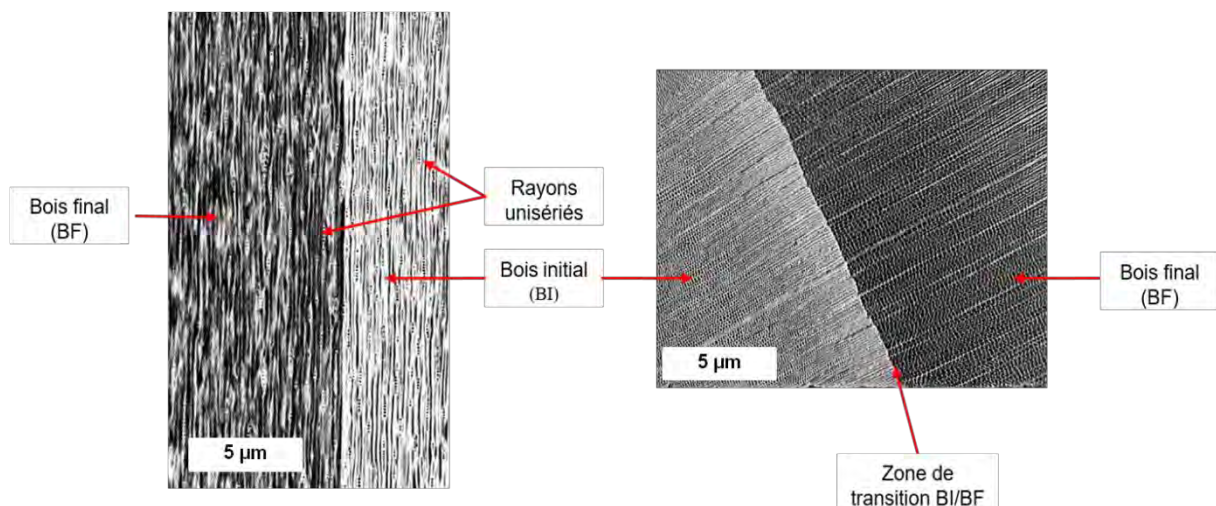


Figure 51 : Microstructure du bois de Douglas obtenue par Micro-tomographie à rayons X « EasyTom 130 » (a) coupe tangentielle-longitudinale (b) coupe transversale montrant la transition entre BI et BF

Durabilité : Le bois de Douglas purgé d'aubier est naturellement durable. Or, il existe des classes d'emploi, définies par la norme Européenne NF EN 335-1, qui établissent le lien entre la durabilité d'un bois et son utilisation. Le bois de Douglas est identifié dans la classe d'emploi 3, c'est-à-dire qu'il peut être utilisé sans traitement dans une structure exposée en continu aux intempéries et à une humidité supérieure à 20% (Norme NF EN 335-1).

Caractéristiques mécaniques et utilisations : Les caractéristiques mécaniques du bois de Douglas sont élevées comparativement aux autres essences résineuses commercialisées en France. La figure 52 illustre la variation du module d'élasticité en fonction de la largeur moyenne des cernes des principales essences résineuses (Bailly et de Champs 2012). On voit que la rigidité du Douglas pour une largeur de cerne donnée est nettement supérieure aux autres. Cela explique pourquoi le bois de Douglas est fréquemment utilisé dans la construction telle que la grosse charpente, l'ossature des maisons individuelles, les hangars, la

construction navale (pont et mâture), et les ouvrages du génie civil (ponts, rails de sécurité des autoroutes, traverses de voie ferrée) (Collardet et Besset 1988).

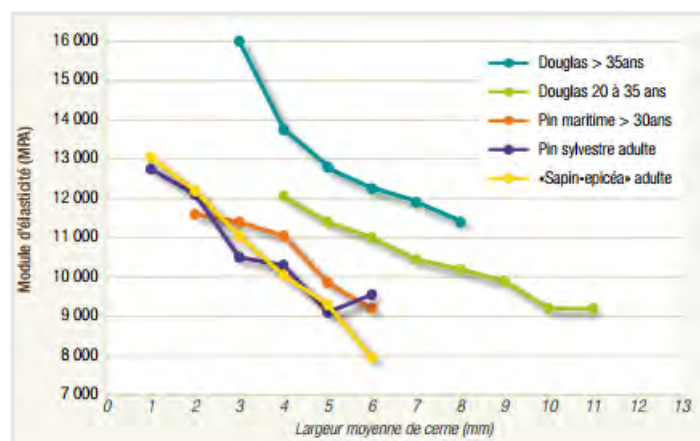


Figure 52 : Module d'élasticité des principales essences résineuses commerciales françaises (d'après Bailly et de Champs 2012)

II.3- Le sapin pectiné

Le sapin pectiné, parfois appelé sapin blanc ou sapin commun, est un conifère de la famille des pinacées. Le sapin pectiné est le résineux le plus important des forêts Pyrénéennes. Cette essence représente plus du tiers du volume de résineux de la région (13 Mm³ soit 35% du volume résineux) (figure 49).

Nom Scientifique: *Abies pectinata* D.C.

Famille: Pinaceae

Caractéristiques particulières: Le sapin pectiné est un bois à aubier non distinct. Le duramen a une couleur pouvant aller de blanc mat à rosé pâle. Le bois de sapin pectiné est tendre et léger. Il possède des cernes marqués. En effet, le bois final se présente sous forme d'une fine bande rougeâtre qui divise deux bandes du bois initial quasi blanc (figure 53).



Figure 53 : Bois de sapin pectiné (www.forestry.gov.uk)

Description anatomique (Venet 1986) : Le sapin est un bois à accroissement apparent, le bois final est bien marqué avec ses trachéides à parois nettement plus épaisses, plus denses et plus colorées que celles des trachéides du bois initial. Le passage entre les deux types de bois (BI et BF) est progressif (figure 54a et b). Les rayons ligneux sont unisériés (une seule couche de cellules) et très fins (figure 54a).

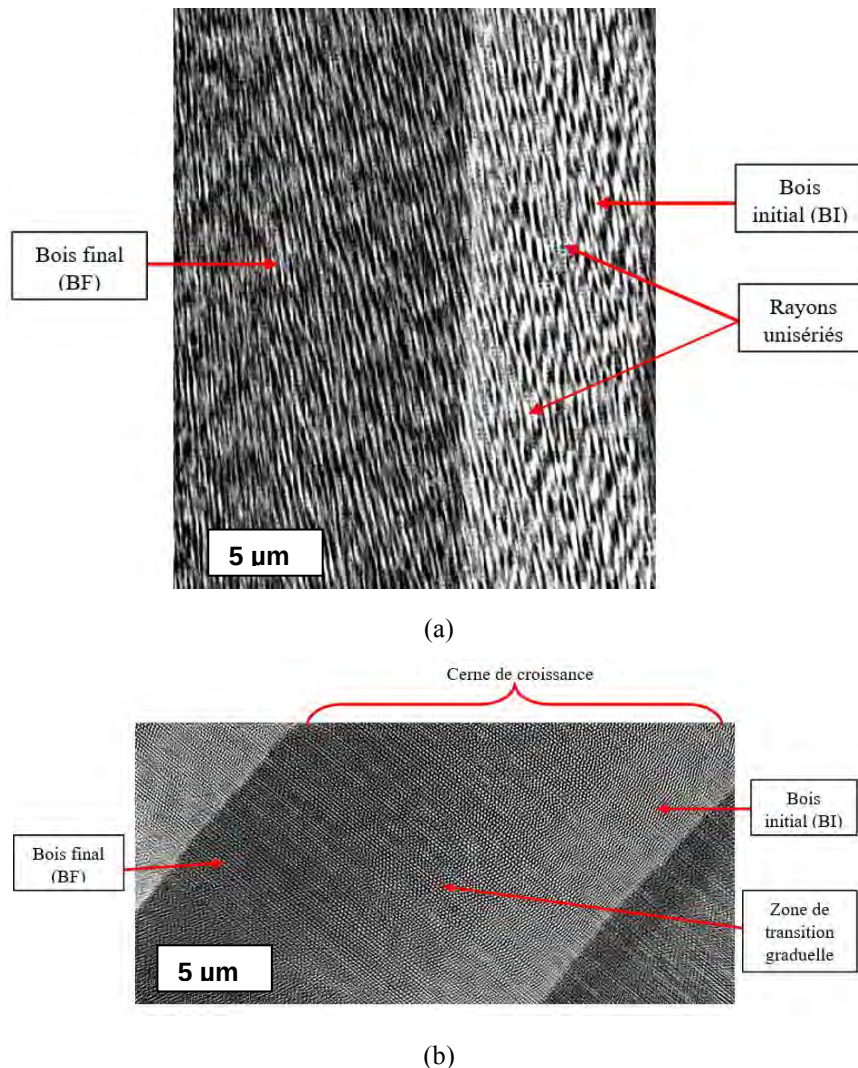


Figure 54 : Microstructure du bois de sapin pectiné obtenue par Micro-tomographie à rayons X « EasyTom 130» (a) coupe tangentielle-longitudinale (b) coupe transversale montrant le passage entre bois initial/bois final

Durabilité : Le duramen et l’aubier du bois de sapin pectiné sont non durables. Pour cette raison, le bois de sapin pectiné est identifié dans la classe d’emploi 1, c’est-à-dire qu’il doit être utilisé à l’intérieur dans une construction non exposée aux intempéries et à l’humidification (taux d’humidité toujours inférieur à 20%).

Caractéristiques mécaniques et utilisations : Le bois de sapin possède des propriétés mécaniques légèrement faibles par rapport aux autres résineux (figure 52 : sapin-épicéa est l’appellation commerciale du sapin pectiné). Il est montré par une étude menée en 2011 par le syndicat mixte des Pays d’Oloron Haut Béarn que cette essence locale du massif des Pyrénées est de qualité largement suffisante pour une utilisation en charpente traditionnelle (source : Midi-Pyrénées bois). En effet, les échantillons testés sont classés en classes mécaniques C24 et C30 (Cf. classes mécaniques chapitre 1 partie I.3.1). Le bois de sapin pectiné représente aussi un excellent bois de menuiserie (placages, meubles...).

II.4- Le peuplier

Le peuplier est un feuillus appartenant à la famille de Salicacées. C’est une essence à croissance rapide qui représente environ 230 000 ha sur l’ensemble de la France métropolitaine (source : Enquêtes Annuelles de Branche 2012). Le peuplier est aussi une essence présente dans les forêts de Midi-Pyrénées.

Nom scientifique : *Populus*

Famille : Salicacées

Caractéristiques particulières: Le bois de peuplier est perçu comme très tendre et léger, de couleur blanche, parfois grisâtre ou teinté brun très pâle. Le duramen est blanc à blanc jaunâtre. L'aubier est non-distinct. Aussi, le passage entre bois de printemps et bois d'été est beaucoup moins distinct. De plus, il présente moins des défauts que les autres essences. Pour ces raisons, le bois de peuplier est considéré comme un bois homogène (figure 55).



Figure 55 : Bois de peuplier (<http://www.bellforestproducts.com>)

Description anatomique : Le peuplier est un feuillu à pores diffus (Trouy 2012). Il présente une répartition uniforme de ses vaisseaux à l'intérieur du cerne. Les groupes de vaisseaux radiaux sont très fréquents, contenant 2 à 6 pores tangents (Venet 1986) (figure 56). A l'échelle microscopique, il est possible de distinguer les cernes de croissance puisqu'il existe une limite de cerne correspondant à la position du cambium en hiver, lors de l'arrêt de la croissance. Cette limite est marquée par une légère différence entre le bois formé à la fin du cerne et le bois formé au début du nouveau cerne (Trouy 2012). La figure 56 montre un changement au niveau des tailles des vaisseaux à la fin du cerne de l'année n et au début de cerne de l'année $(n+1)$. Le peuplier possède aussi des rayons ligneux unisériés (une seule couche de cellules).

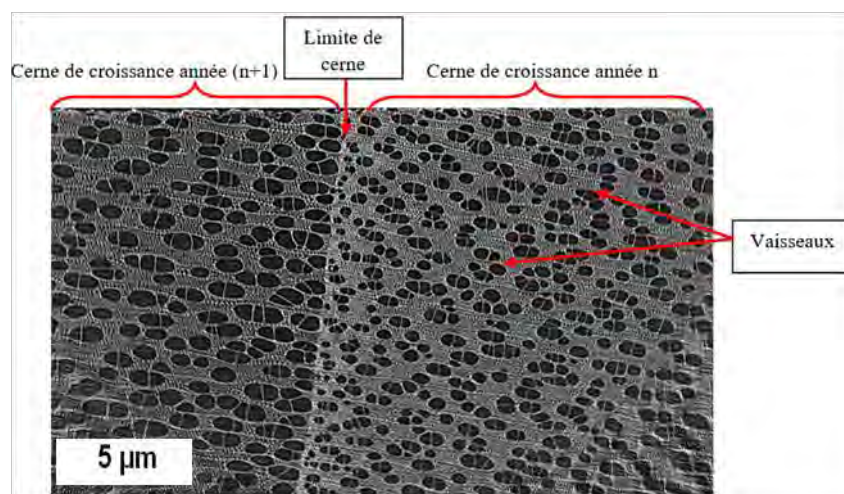


Figure 56 : Microstructure du bois de peuplier obtenue par Micro-tomographie à rayons X « EasyTom 130 » : coupe transversale

Durabilité : Le duramen et l'aubier de peuplier ont un caractère non-durable et ils sont sensibles aux attaques de champignons et d'insectes. Donc, l'utilisation du bois de peuplier à l'extérieur n'est pas possible sans traitement. Il est identifié dans la classe d'emploi 1 (utilisation intérieure).

Caractéristiques mécaniques et utilisations : Le bois de peuplier est très tendre et léger. En revanche, il possède une excellente résistance mécanique, lui conférant une utilisation optimale en usage structurel. En effet, aujourd'hui, en utilisant le peuplier, des industriels développent des produits innovants en bois massif ou en produits reconstitués pour des usages structurels (Techno-guide du peuplier 2016).

II.5- Conclusion

Les trois bois sélectionnés dans cette étude présentent une densité proche et des différences au niveau de leurs microstructures anatomiques. Ces dernières ont un impact significatif sur leurs propriétés mécaniques. A l'échelle du cerne, le passage brutal chez le Douglas entre le bois initial (BI) et le bois final (BF) induit des propriétés hétérogènes, tandis que la structure du bois de peuplier est considérée comme homogène puisque le passage entre BI et BF est non-distinct. Le sapin pectiné possède une structure intermédiaire par rapport aux deux bois cités précédemment, donc son hétérogénéité se classe entre le bois de Douglas et le bois de peuplier.

III. Essais mécaniques

III.1- Introduction

Comme nous le savons, le matériau bois est souvent utilisé dans la construction sous forme de poutres. Ces dernières sont généralement sollicitées en compression et en flexion. Or, le comportement du bois en flexion peut être déduit des mécanismes d'endommagements présents en traction et en compression. En effet, la flexion provoque une distribution de contraintes présentant à la fois un gradient de contraintes de traction et de compression de part et d'autre de la fibre neutre (Bodig et Jayne 1982, Pluvinage 1992, Brancheriau et Lanvin 2008). Afin de pouvoir identifier les mécanismes d'endommagement du matériau bois sollicité en compression et en flexion à partir des signatures acoustiques, en plus des essais de compression, des essais de traction ont été aussi réalisés dans un premier temps suivis des essais de flexion.

Les sollicitations quasi-statiques en traction, en compression et en flexion sont réalisées avec une machine d'essai électromécanique MTS® 20M de capacité maximale 100 kN. Cette machine est constituée d'un cadre fixe et d'une traverse mobile, qui sépare la machine en deux espaces de travail. Les essais sont réalisés via un logiciel de pilotage et d'acquisition à par l'intermédiaire d'un ordinateur. Le principe de chaque type d'essai, les conditions et les éprouvettes utilisées sont détaillés dans les paragraphes suivants. Avant chaque essai, les éprouvettes utilisées ont été conditionnées dans une enceinte climatique à la consigne de 20°C et 65% d'humidité relative (NF B51-002), pour obtenir une humidité du bois stabilisée aux alentours de 12%.

III.2- Essais de traction parallèle au fil

III.2.1- Eprouvettes

Les essais de traction parallèle au fil, ont été réalisés suivant la norme Française NF B 51-017 (AFNOR 1988). En effet, les éprouvettes de bois sans défauts visibles ont été débitées en un parallélépipède rectangle de section 20 mm x 20 mm dans les deux directions transversales

(R et T) et de 300 mm de longueur dans la direction longitudinale (L) (figure 57a). Ensuite, un profilage des éprouvettes est réalisé sur le plan (LR) (figure 57b). Ce profilage permet d'assurer que la rupture se produise au milieu de l'échantillon au niveau d'une zone parallépipédique centrale parfaitement calibrée. Les éprouvettes finales ont la forme du « os de chien ». Les dimensions de ces éprouvettes sont indiquées sur la figure 57c.

Des talons en acier de longueur 60 mm ont été collés sur les surfaces du plan (LR) de la zone rectangulaire aux extrémités de l'éprouvette comme montré par la figure 57b. Ces talons ont pour rôle principal un meilleur accrochage du mors sur l'éprouvette afin d'éviter le glissement de celle-ci. Ils protègent également les parties du bois insérées dans les mors d'une rupture prématurée à cause d'une compression latérale importante.

Les talons sont collés en utilisant une colle époxy bi-composants (ESK-48). Le mode opératoire utilisé est le suivant : les deux surfaces à coller sont ponçées à l'aide d'une toile émeri, dépoussiérées et dégraissées en première étape. Ensuite, une couche fine de colle époxy est appliquée et les deux surfaces sont ensuite assemblées. La colle sèche à l'air ambiant pendant quelques minutes puis une pression de 1 bar est appliquée pendant une durée de 30 min. Les éprouvettes sont testées au minimum 24 h après le collage des talons.

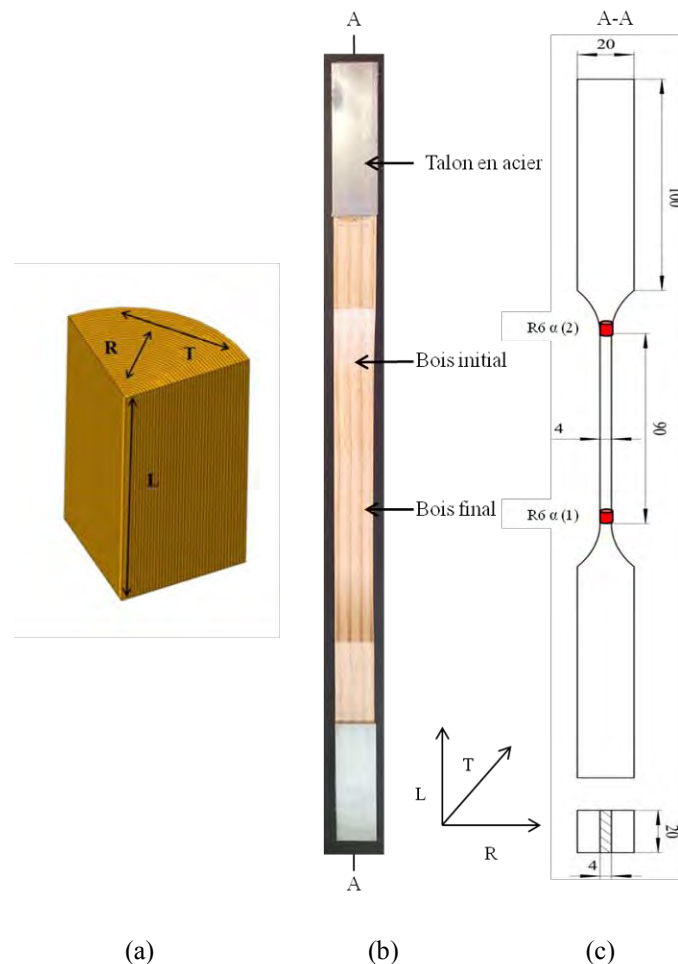


Figure 57 : Forme et dimensions des éprouvettes de traction (a) les trois directions du bois (L-R-T), (b) la configuration d'éprouvette de traction en bois de Douglas, vue plan (LR), (c) les dimensions d'une éprouvette en traction longitudinale selon la norme NF B 51-017 (AFNOR 1988)

Afin de garantir la représentativité des résultats, cinq éprouvettes par essence ont été testées. La désignation choisie pour les éprouvettes de traction suit la logique suivante : TXY.

T indique le type de la sollicitation (Traction), X indique le type d'essence (D : Douglas, S : sapin pectiné et P : peuplier) et Y indique le numéro de l'éprouvette du lot (Tableau 13). Les dimensions précises des éprouvettes sont données dans l'annexe 2.

Tableau 13 : Désignations des éprouvettes testées en traction longitudinale

Essences	Désignations des éprouvettes
Douglas	TD1, TD2, TD3, TD4 et TD5
Sapin pectiné	TS1, TS2, TS3, TS4 et TS5
Peuplier	TP1, TP2, TP3, TP4 et TP5

III.2.2- Conditions d'essais et paramètres mesurés

Le dispositif d'essai de traction est composé de deux mors auto-serrant permettant le maintien des éprouvettes pendant tout l'essai (figure 58). Le mors supérieur est encastré dans la traverse mobile, tandis que le mors inférieur est goupillé au cadre de la machine, donc immobile. Le déplacement de la traverse mobile est imposé à une vitesse de 2,5 mm/min dans le sens des fibres jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Cette vitesse de déplacement a été choisie selon la norme NF B 51-017 (AFNOR 1988) pour avoir une durée des essais comprise entre 1,5 et 2 min.

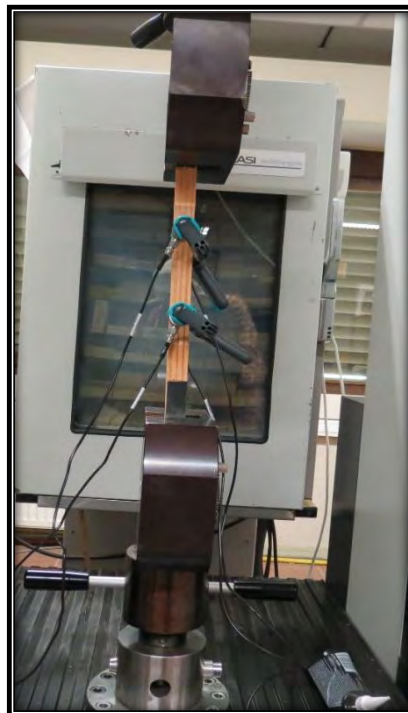


Figure 58 : Montage de traction longitudinale

Au cours de l'essai, l'évolution de la charge en fonction du déplacement a été enregistrée par le logiciel TestWorks. La contrainte maximale en traction ($\sigma_{\max T}$) exprimée en MPa a été calculée selon l'équation (4) :

$$\sigma_{\max T} = \frac{P_{\max}}{a \times b} \quad (4)$$

Où : $P_{\max}$ est la charge maximale en N, $a = 20$ mm et $b = 4$ mm dimensions de la partie calibrée de l'éprouvette de traction.

Afin de mesurer le module d'Young et le coefficient de Poisson, deux jauges de déformation de type EA-06-500GB-120 de résistance $120\ \Omega$ et de facteur de jauge 2,065 disponibles dans notre laboratoire ont été collées dans le sens du fil (L) et dans le sens transverse (R) sur la face de la partie calibrée des éprouvettes (figure 59). Chacune des jauges a été connectée à un pont d'extensométrie utilisé en quart du pont. Le module d'Young longitudinal (E_L) est déterminé par le coefficient directeur de la partie linéaire de la courbe représentant la contrainte (σ_L) en fonction de la déformation longitudinale (ε_L) (équation 5) et le coefficient de Poisson (ν_{LT}) par celui de la partie linéaire de la courbe représentant la déformation transversale (ε_T) en fonction de celle longitudinale (ε_L) (équation 6).

$$\sigma_L = E_L \varepsilon_L \quad (5)$$

$$\nu_{LT} = -\varepsilon_T / \varepsilon_L \quad (6)$$



Figure 59 : Positions des jauges sur une éprouvette de traction

III.3- Essais de compression parallèle au fil

III.3.1- Epreuves

Les essais de compression longitudinale ont été réalisés selon la norme NF B 51-007 (AFNOR 1985) sur des éprouvettes parallélépipédiques de dimensions 60 mm (L) x 20 mm (R) x 20 mm (T) (figure 60). Les éprouvettes ont été usinées avec précaution afin d'avoir des faces rigoureusement parallèles. Cinq éprouvettes ont été testées pour chaque essence. La désignation des éprouvettes est donnée dans le tableau 14. Les dimensions précises des éprouvettes sont données dans l'annexe 2.

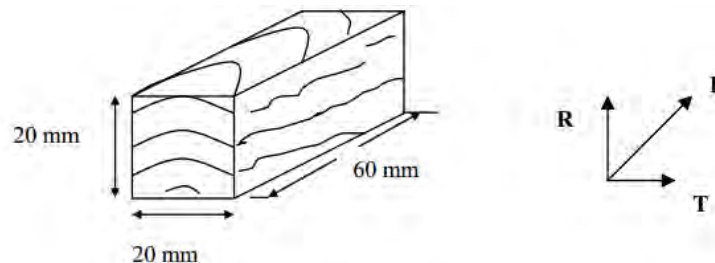


Figure 60 : Dimensions d'une éprouvette de compression parallèle aux fibres selon la norme NF B 51-007 (AFNOR 1985)

Tableau 14 : Désignations des éprouvettes testées en compression longitudinale

Essences	Désignations des éprouvettes
----------	------------------------------

Douglas	CD1, CD2, CD3, CD4 et CD5
Sapin pectiné	CS1, CS2, CS3, CS4 et CS5
Peuplier	CP1, CP2, CP3, CP4 et CP5

III.3.2- Conditions d'essais et paramètres mesurés

Le dispositif d'essai de compression est constitué de deux plateaux parallèles (figure 61a). Afin de limiter le frottement, une feuille de Téflon a été placée entre l'éprouvette et les deux plateaux. Une force de compression a été appliquée avec un déplacement imposé à 2 mm/min dans le sens du fil (normal au plan RT) (figure 61b). Elle augmente jusqu'à la charge maximale (P_{max}) au bout de 1,5 min-2 min, ce qui respecte la norme NF B 51-007 (AFNOR 1985). La contrainte maximale en compression ($\sigma_{max C}$) a été calculée selon l'équation (7).

$$\sigma_{max C} = \frac{P_{max}}{a \times b} \quad (7)$$

Si la charge maximale en compression P_{max} est en N, $a = 20$ mm et $b = 20$ mm dimensions de la section transversale de l'éprouvette, la contrainte maximale en compression est donc en MPa.

Sans jauges de déformation, le module d'élasticité effectif en compression (E_c) dans le sens longitudinal peut se mesurer à partir de la pente de la partie linéaire de la courbe force-déplacement selon l'équation (8) (figure 62).

$$E_c = k \frac{L_0}{S_0} \quad (8)$$

Où $L_0 = 60$ mm, la longueur initiale de l'éprouvette ; $S_0 = a \times b = 400 \text{ mm}^2$: section initiale de l'éprouvette ; k : la pente de la partie linéaire de la courbe force-déplacement (figure 62).

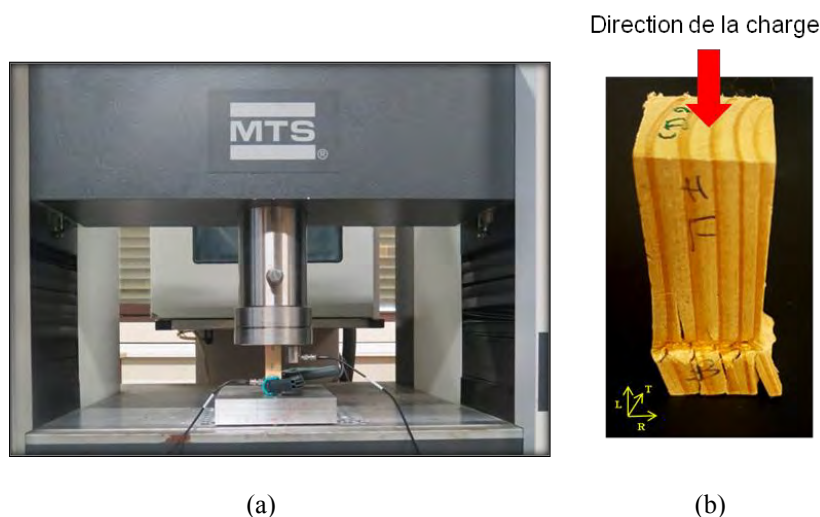


Figure 61 : (a) montage de compression (b) direction d'application de la charge

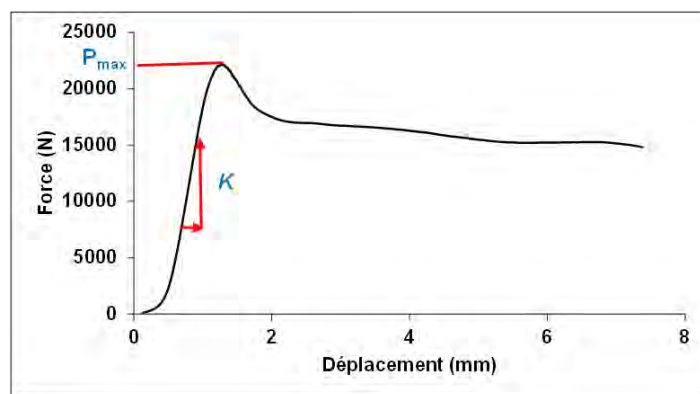


Figure 62 : Paramètres utilisés pour la mesure des propriétés mécaniques en compression

III.4- Essais de flexion 4 points

III.4.1- Eprouvettes

Les essais de flexion ont été réalisés selon la norme NF B 51-008 (AFNOR 1987). Les éprouvettes sont sous forme de barreaux prismatiques de dimensions 360 mm (L) x 20 mm (R) x 20 mm (T) (figure 63). Cinq éprouvettes ont été testées pour chaque essence. La désignation des éprouvettes est fournie dans le tableau 15. Les caractéristiques des échantillons testés en flexion d'un point de vue densité et dimensions précises des éprouvettes sont données dans l'annexe 2.

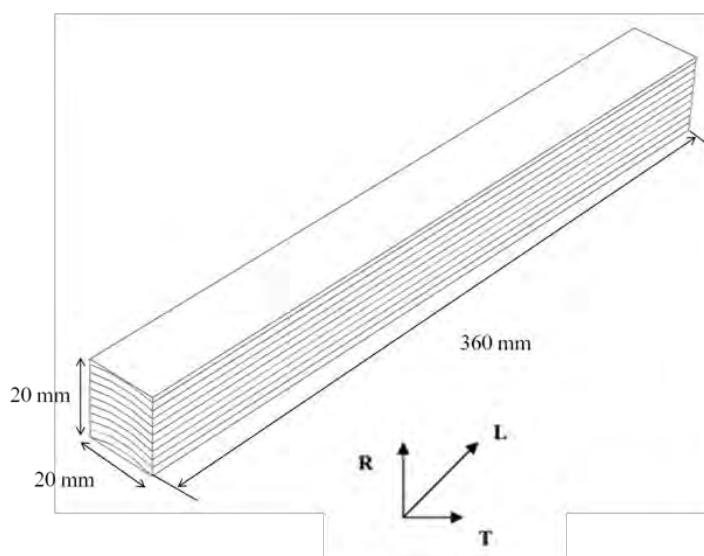


Figure 63 : Dimensions d'une éprouvette de flexion selon la norme NF B 51-008 (AFNOR 1987)

Tableau 15 : Désignations des éprouvettes testées en flexion

Essences	Désignations des éprouvettes
Douglas	FD1, FD2, FD3, FD4 et FD5
Sapin pectiné	FS1, FS2, FS3, FS4 et FS5
Peuplier	FP1, FP2, FP3, FP4 et FP5

III.4.2- Conditions d'essais et paramètres mesurés

Le dispositif d'essai de flexion 4-points est composé de deux appuis cylindriques supérieurs de diamètre 60 mm séparés d'une distance $L_s=160$ mm et de deux appuis inférieurs de même diamètre et séparés d'une distance $L_i= 320$ mm (figure 64a). Afin de solliciter le bois initial et le bois final, de la même façon, la norme NF B 51-008 (AFNOR 1987) exige d'appliquer une charge parallèlement aux cernes, c'est-à-dire que la charge doit être appliquée dans la direction T (normale au plan LR) (figure 64b). Les essais de flexion sont aussi effectués en mode de déplacement imposé, dont la vitesse est de 4 mm/min. Le choix de la vitesse de déplacement est basé sur la norme NF B 51-008 (AFNOR 1987), de sorte à atteindre la charge maximale au bout de 1,5 min à 2 min.

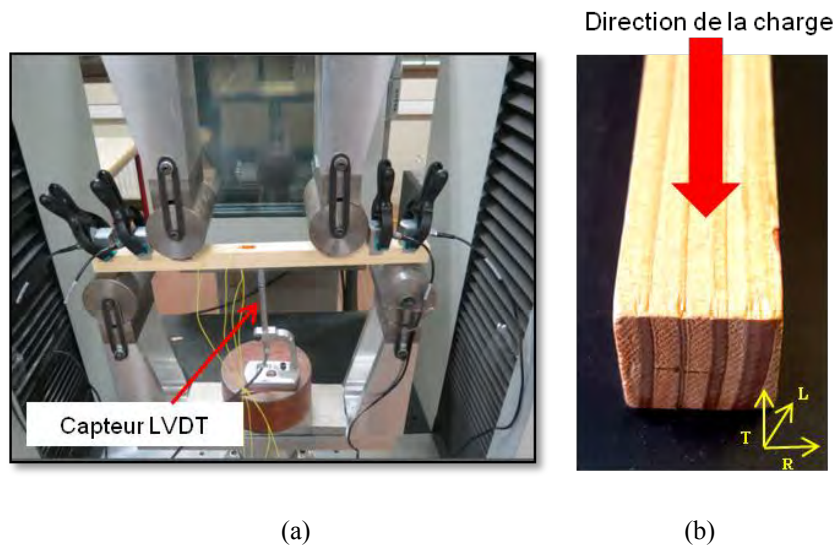


Figure 64 : Essai de flexion (a) Configuration de flexion 4-points (b) Direction d'application de la charge

La flèche a été mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement LVDT Solatron AX5S. Pour mesurer le module d'élasticité longitudinal en flexion, la norme NF B 51-016 (AFNOR 1987) exige un support normalisé pour l'instrument de mesure de la flèche, ainsi que trois cycles de chargement. Pour chaque cycle de sollicitation, la charge doit aller jusqu'à 600N suivi d'un déchargement jusqu'à 200 N, la flèche correspondante doit être mesurée en continu. Afin de pouvoir réaliser ces essais avec le matériel à notre disposition une adaptation de la norme a du être faite. Le capteur LVDT est donc installé sur le cadre de la machine. Un support immobile comme illustré par la figure 64a a été utilisé. On s'est servi des déplacements mesurés par le capteur LVDT pour déterminer le module d'élasticité en flexion selon l'équation (9) tout en gardant les principes de la norme. En effet, la courbe force-déplacement (qui est la flèche mesurée par le LVDT) a été retracée (figure 65), puis trois valeurs d'effort et de déplacement correspondants ont été récupérées sur la partie linéaire de la courbe. Les points considérés ont toujours été ceux imposés par la norme à savoir $F= 200$ N, $F=600$ N et $F=1000$ N (figure 65), sans réaliser les trois cycles de charge-décharge. On retient pour chaque éprouvette, le module moyen calculé pour les trois forces (200 N, 600 N et 1000 N).

$$E = \frac{P*(L_i-L_s)*(2L_i^2+2L_iL_s-L_s^2)}{8*a*b*3*f} \quad (9)$$

Soit E : le module d'élasticité en MPa ; P : la charge en flexion en N ; L_i : la distance entre les appuis cylindriques inférieurs en mm ; L_s : la distance entre les appuis cylindriques supérieurs

en mm ; a : la largeur mesurée sur l'éprouvette en mm ; b : la hauteur mesurée sur l'éprouvette en mm ; et : la flèche au centre de l'éprouvette en mm.

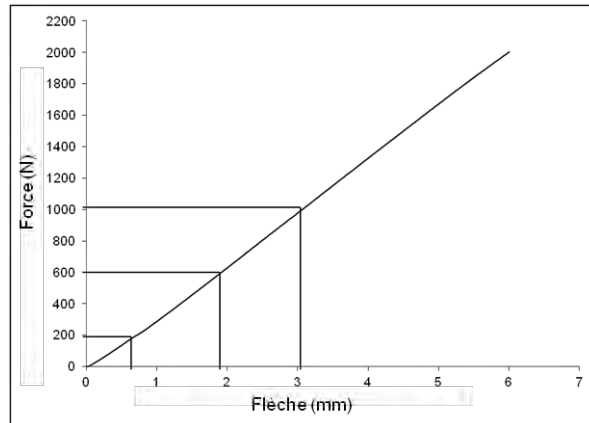


Figure 65 : Courbe charge-flèche (partie linéaire) indiquant les trois valeurs choisies pour déterminer le module d'élasticité longitudinal en flexion

Des jauges de déformation de type EA-06-500GB-120 de résistance 120 Ω et de facteur de jauge 2,065 ont été collées sur la face supérieure et la face inférieure d'une éprouvette de chaque essence afin de déterminer le module d'élasticité avec l'équation (10) et le comparer avec celui obtenu à l'aide de la flèche mesurée par le capteur LVDT.

$$E_{\text{jauge}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (10)$$

Où E_{jauge} est le module d'élasticité mesurée à partir de la déformation mesurée par la jauge (MPa) ; σ désigne la contrainte au point où la jauge a été collée (MPa), ε est la déformation mesurée par la jauge.

La contrainte maximale ($\sigma_{\text{max F}}$), exprimée en MPa, a été déterminée selon l'équation (11) en se basant sur la norme NF B 51-008 (AFNOR 1987).

$$\sigma_{\text{max F}} = \frac{3 P_{\text{max}} (L_i - L_s)}{2ab^2} \quad (11)$$

Où $\sigma_{\text{max F}}$ désigne la contrainte maximale en flexion (MPa) ; P_{max} est la charge maximale appliquée en flexion (N) ; L_i est la distance entre les appuis cylindriques inférieurs en mm ; L_s distance entre les appuis cylindriques supérieurs en mm ; a est la largeur mesurée sur l'éprouvette en mm ; b est la hauteur mesurée sur l'éprouvette en mm.

III.4- Conclusion

Trois types d'essais mécaniques normalisés (traction, compression et flexion) ont été mis en place pour suivre l'endommagement de trois essences de bois. Les configurations d'éprouvettes, les conditions d'essais et le dépouillement des résultats dépendent du type d'essai, mais ils sont indépendants de l'essence des trois bois étudiés. On se propose maintenant de passer à l'instrumentation de ces différents essais par les techniques de contrôle non destructif (CND) utilisées.

IV- Instrumentation des essais par les méthodes CND

IV.1- Introduction

Afin d'étudier l'endommagement du matériau bois sous différentes sollicitations quasi-statiques (traction, compression et flexion), nous avons mis en place un système de suivi par émission acoustique (EA). Afin de compléter les résultats obtenus par la technique d'EA, une autre méthode de suivi a été mise en place. Il s'agit de la thermographie infrarouge. Une technique d'observation par tomographie par rayons X a été aussi utilisée dans cette étude. Nous proposons donc dans cette partie de présenter les différents dispositifs expérimentaux utilisés pour le suivi des essais.

IV.2- Emission acoustique

IV.2.1- Choix du matériel d'EA

La technique d'émission acoustique permet de recueillir des salves acoustiques résultant de l'endommagement au sein du matériau par le biais de capteurs. Les signaux recueillis sont conditionnés par un préamplificateur et ensuite traités par une chaîne d'émission acoustique.

Le capteur représente le premier élément du dispositif d'acquisition d'EA. Donc, il est primordial de choisir un capteur approprié aux signaux qu'il devra acquérir. Pour le suivi de l'endommagement du matériau bois, les capteurs d'EA utilisés dans les différentes études de la littérature sont de type résonnant. Les fréquences de résonnance sont généralement comprises entre 150 kHz et 450 kHz (Ansell 1982; Vautrin 1987 ; Varner et al. 2012; Wu et al. 2014; Ritschel et al. 2013; Lamy et al. 2015; Diakhate et al. 2017). Or, le bois est un matériau très dispersif notamment à cause de son hétérogénéité. La propagation d'onde acoustique au sein du matériau bois s'accompagne d'une grande atténuation qui peut atteindre 1dB/cm (Bucur 2006 ; Landis 2008 ; Baensch 2015). Donc, il est nécessaire de sélectionner un capteur qui permet de recueillir le maximum de signaux lors de l'endommagement du matériau bois.

Quatre types de capteurs sont à notre disposition : trois capteurs résonnants R3α, R6α et R15α de fréquences de résonnance 30 kHz, 60 kHz et 150 kHz respectivement et un capteur large bande (WD) pouvant être utilisé dans une gamme de fréquences allant de 100 kHz à 1 MHz. Les courbes d'étalonnage de ces différents capteurs sont fournies en annexe 3. Afin de sélectionner le capteur approprié, une étude préliminaire a été réalisée en utilisant un capteur WD. Les signaux recueillis par ce type de capteur lors de l'endommagement du matériau bois montrent des pics fréquentiels inférieurs à 100 kHz et majoritairement entre 20 kHz et 50 kHz (figure 66). Donc, on peut en déduire que les capteurs R3α et R6α sont les capteurs les plus adéquats parmi ceux à notre disposition. Ces résultats sont en accord avec les constatations de Varner et ses co-auteurs (2012). En effet, ils ont utilisé un capteur résonnant de type AE 469 (fabriquant : Dakel ZD Rpety) de fréquence de résonnance comprise entre 150 et 300 kHz pour suivre l'endommagement de trois types de bois (chêne, épicéa et peuplier) en flexion 4-points. La distribution d'énergie en fonction des fréquences a été étudiée. Les résultats montrent des pics énergétiques à faibles fréquences (entre 20 et 60 kHz) pour les trois types de bois étudiés (figure 67). Ils ont proposé à la fin de leurs travaux d'utiliser des capteurs de faibles fréquences pour éviter la perte des signaux lors de l'endommagement du matériau bois.

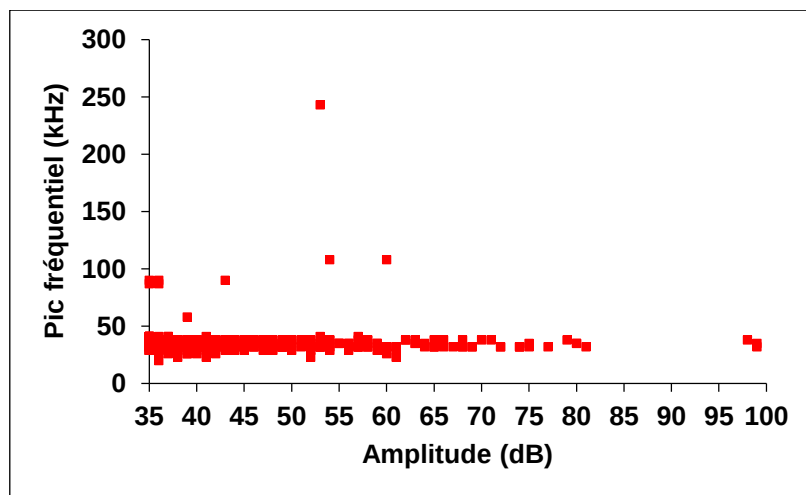


Figure 66 : Résultats obtenus par les capteurs WD

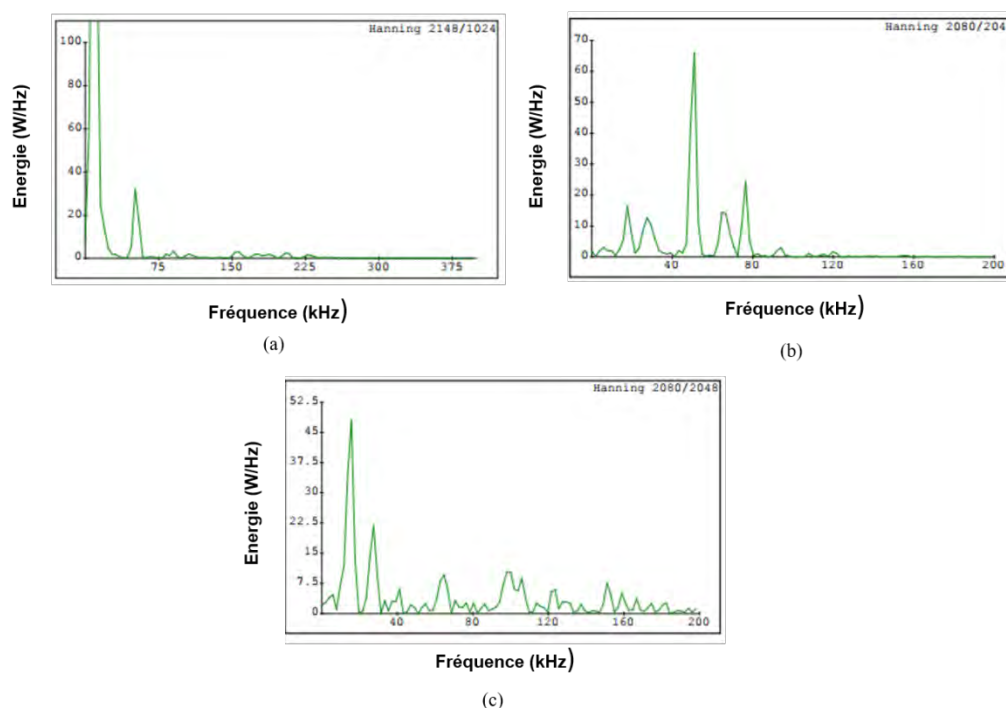


Figure 67 : Distribution de l'énergie en fonction de la fréquence des signaux recueillis lors de l'endommagement du bois de (a) chêne, (b) épicéa et (c) peuplier (d'après Varner et al. 2012)

Afin d'avoir une gamme d'auscultation plus large et complémentaire, les deux type de capteur R6 α et R3 α vont être utilisés simultanément dans la suite de la thèse. Les caractéristiques de ces deux capteurs sont montrées dans le Tableau 16. Leurs courbes d'étalonnage sont fournies en annexe 2.

Tableau 16 : Caractéristiques des deux capteurs utilisés dans cette étude (MISTRAS Group 2010)

Caractéristiques	R3a	R6a
Type	résonnant	résonnant
Diamètre (mm)	19	19
Fréquence de résonance (kHz)	30	60
Gamme de fréquence	25-70	35-100

Les capteurs sont couplés aux éprouvettes par une pression de maintien. Une couche de graisse silicone entre la céramique du capteur et la surface de l'éprouvette permet le transfert des ondes ultrasonores. Les signaux recueillis par les capteurs sont ensuite amplifiés à travers des préamplificateurs (modèle 2/4/6) dont la bande passante est comprise entre 20 et 1200 kHz et les gains sélectionnables sont 20 dB, 40 dB et 60 dB. Dans cette étude nous avons utilisé le gain à 40 dB. L'acquisition des signaux d'EA est effectuée à l'aide d'un système MISTRAS (Euro Physical Acoustics). Il comporte une carte d'acquisition de type PCI ayant huit voies d'entrée. Cette carte permet la numérisation de signaux acoustiques et l'extraction de différents paramètres de salve. L'ensemble du dispositif d'acquisition d'EA est montré sur la figure 68.

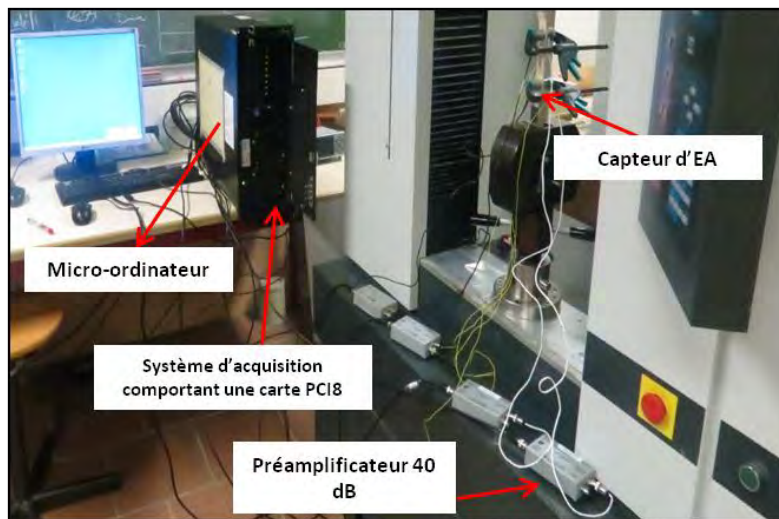


Figure 68 : Ensemble du dispositif d'EA

IV.2.2- Positionnement des capteurs

Le positionnement des capteurs sur la surface de l'éprouvette a une influence sur la forme du signal mesuré. Ce paramètre doit être étudié en fonction de l'atténuation du matériau mais également en fonction de la localisation de l'endommagement. Dans ce cadre, plusieurs configurations de positionnement des capteurs ont été testées sur les éprouvettes soumises à différents types de charges comprenant la traction, la compression et la flexion.

A- Positionnement des capteurs sur les éprouvettes de traction

Deux capteurs R6a sont montés en opposition avec deux capteurs R3a au niveau de la partie calibrée de l'éprouvette où l'endommagement doit avoir lieu (figure 69). Cette configuration permet ainsi la localisation des sources acoustiques dans les deux mailles formées par les deux couples de capteurs. La distance entre chaque couple de capteurs est de 90 mm.

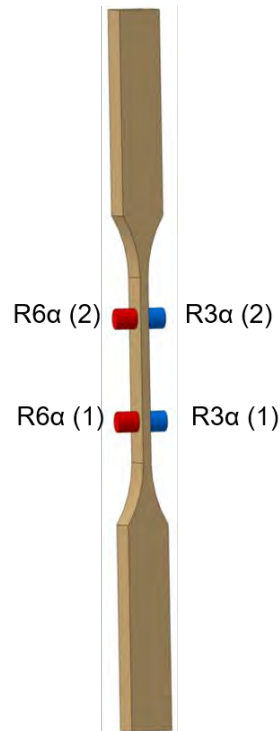


Figure 69 : Positionnement des capteurs sur une éprouvette de traction

B- Positionnement des capteurs sur les éprouvettes de compression

A cause de la faible longueur de l'éprouvette de compression (60 mm), il est difficile d'installer les quatre capteurs simultanément sur les faces de l'échantillon. On se limite donc à l'utilisation de deux capteurs R6α puisqu'ils possèdent une gamme de fréquences plus large que celle de R3α (Tableau 16). En outre, l'emplacement de l'endommagement macroscopique du bois sollicité en compression est aléatoire. Pour éviter de perdre des informations au cas où un endommagement se déclenche en dessous d'un capteur, la configuration 1 a été expérimentée dans un premier temps. Elle consiste à coller deux capteurs R6α au niveau des deux plateaux du montage de compression (figure 70). Le couplage des capteurs avec les surfaces des plateaux est réalisé par collage rigide en utilisant une colle HBM X60 bi-composants. La bonne rigidité de cette colle après le séchage permet une bonne propagation des ondes entre le capteur et la surface du plateau ainsi qu'un montage pérenne. Préalablement à l'application de la colle HBM X60, le capteur a été muni d'une plaque en aluminium collée sur la céramique du capteur avec une colle Loctite super glue 3 Universal Mini Trio ce qui permettra un démontage plus facile du capteur sans risque de dégradation.



Figure 70 : Configuration 1 : positionnement des capteurs sur les plateaux du montage de compression

Les résultats obtenus en utilisant cette première configuration montrent une zone muette dans l'enregistrement du capteur R6 α (1) positionné sur le plateau inférieur du montage de compression (figures 71a et 72a) tandis que l'enregistrement du capteur R6 α (2) positionné sur le plateau supérieur ne montre pas cette perte de signaux (figures 71b et 72b). Ce phénomène est engendré par la perte de couplage entre le plateau inférieur et le pied de l'éprouvette. En effet, le glissement entre l'éprouvette et le plateau inférieur empêche la propagation des signaux jusqu'au capteur et ceci très rapidement au cours de l'essai.

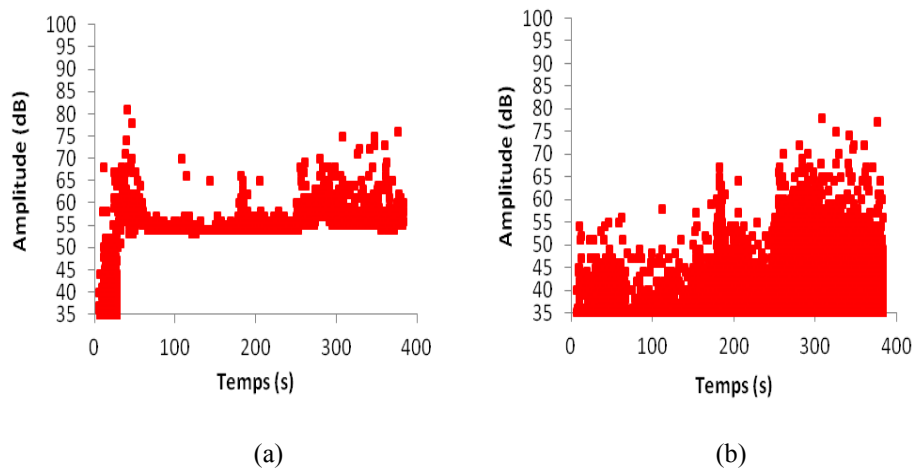


Figure 71 : Premier exemple de résultats de compression en utilisant la configuration 1 (a) signaux enregistrés par le capteur collé sur le plateau inférieur, (b) signaux enregistrés par le capteur collé sur le plateau supérieur

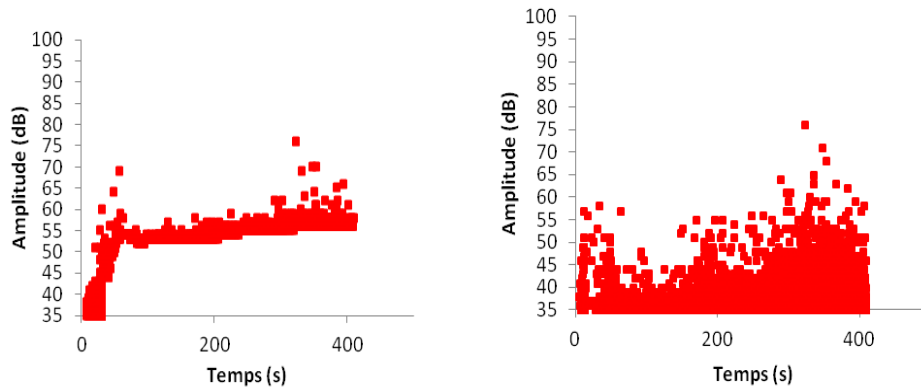


Figure 72 : Deuxième exemple de résultats de compression en utilisant la configuration 1 (a) signaux enregistrés par le capteur collé sur le plateau inférieur, (b) signaux enregistrés par le capteur collé sur le plateau supérieur de compression

Par conséquent, la configuration 2 a été proposée et testée avec pour objectif d'éviter de perdre des informations utiles lors de l'endommagement des éprouvettes sollicitées en compression. Ici, le capteur R6 α (1) a été placé au niveau du pied de l'éprouvette tout en gardant le deuxième capteur R6 α (2) collé au niveau du plateau supérieur comme dans la configuration 1 (figure 73).

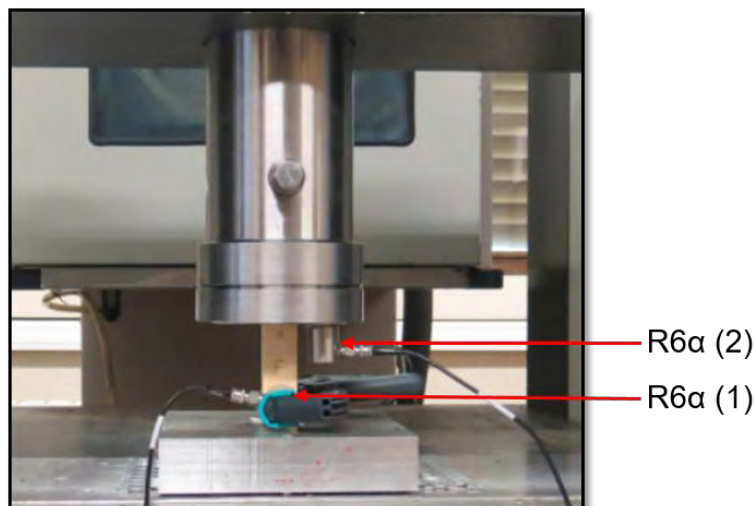


Figure 73 : Configuration 2 : positionnement des capteurs adopté pour l'essai de compression

Les résultats obtenus avec la configuration 2 montrent que les deux capteurs enregistrent la même allure d'évolution de l'activité acoustique (figure 74). Donc, la configuration 2 pour le positionnement des capteurs a été adoptée pour les essais de compression réalisés au cours de cette thèse.

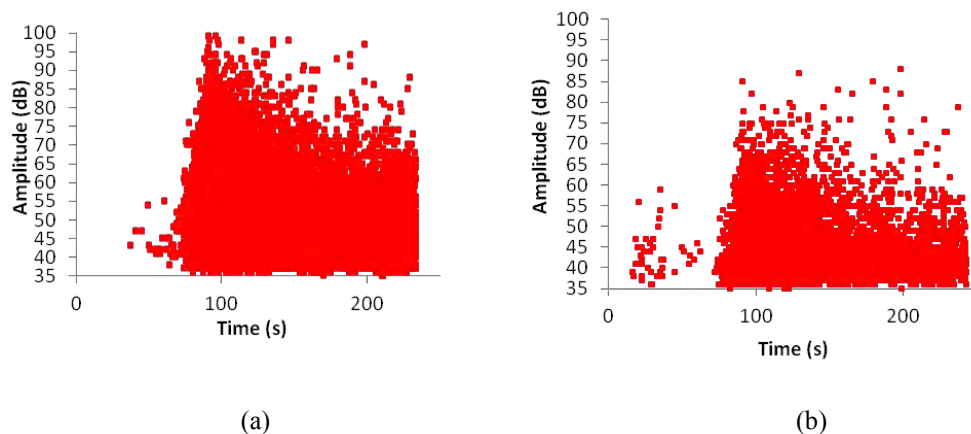


Figure 74 : Exemple de résultats de compression en utilisant la configuration 2 (a) signaux enregistrés par le capteur R6 α (1) collé au pied de l'éprouvette, (b) signaux enregistrés par le capteur R6 α (2) collé sur le plateau supérieur du montage de compression

C- Positionnement des capteurs sur les éprouvettes de flexion

Pour les essais en flexion 4-points, plusieurs configurations ont dû être étudiées afin d'optimiser le positionnement des différents capteurs sur l'éprouvette. La configuration 1 a été prise en considération. Elle consiste à installer les deux couples de capteurs (R6 α et R3 α) sur la face inférieure de l'éprouvette, puisque cette partie en tension est susceptible d'être endommagée en premier sous une sollicitation de flexion (Nguyen 2010). Or, la place disponible pour positionner des capteurs sur la face inférieure de l'éprouvette est insuffisante pour installer quatre capteurs à la fois. Donc, on a gardé le couple de capteurs R6 α sur la face inférieure et le couple de capteurs R3 α est placé sur la face supérieure (partie en compression) comme il est montré sur la figure 75. Le couplage des capteurs à l'éprouvette de flexion est assuré par une pression de maintien en utilisant des capuchons en aluminium et des pinces.

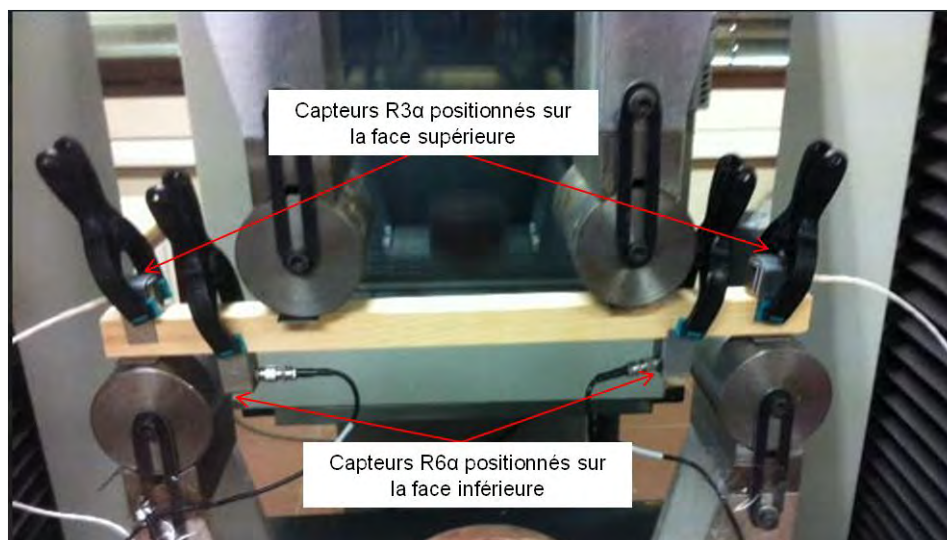
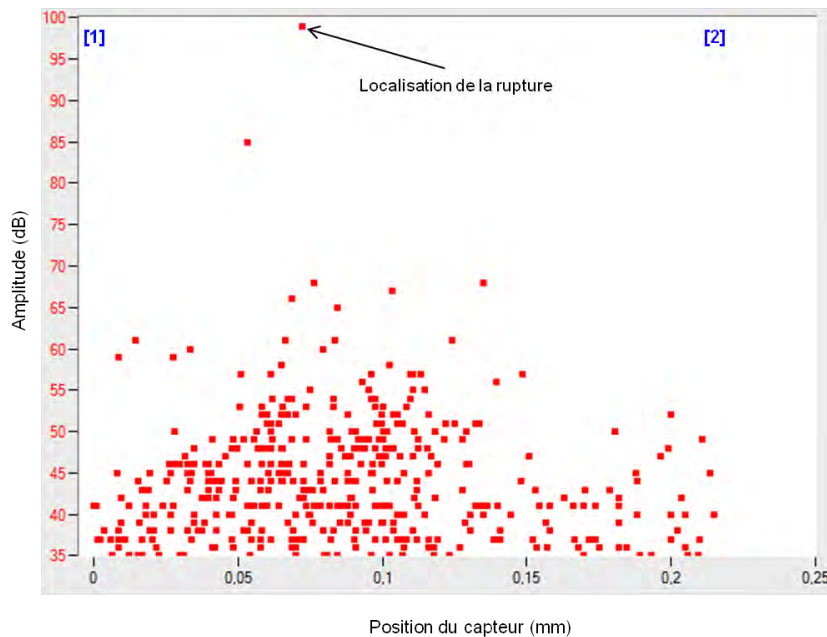


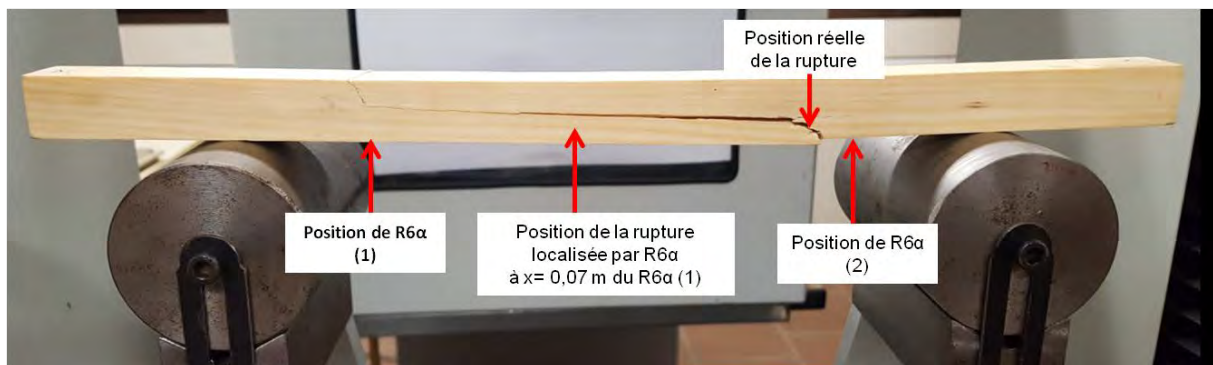
Figure 75 : Configuration 1 proposée pour le positionnement des capteurs sur une éprouvette de flexion

Pendant l'expérimentation de cette configuration, on a constaté que les capteurs R6 α perdent une certaine sensibilité à enregistrer les émissions acoustiques au fur et à mesure de la propagation de l'endommagement. De plus, une imprécision au niveau de la localisation des signaux par les capteurs R6 α a été également décelée. En effet, la position de l'endommagement obtenue par la maille des capteurs R6 α ne correspond pas à la localisation

post-mortem comme le montre la figure 76. Une explication peut être avancée en considérant que la vitesse de propagation des ondes au sein du matériau varie en fonction du niveau d'endommagement. Cette variation n'est pas prise en compte dans le paramétrage de l'acquisition des signaux acoustiques.



(a)



(b)

Figure 76 : (a) Localisation des sources d'EA par les capteurs R6 α , (b) Position de la rupture réelle et de la rupture localisée par les capteurs R6 α sur le faciès de rupture d'une éprouvette de flexion

Par conséquent, la configuration 2 a été proposée et testée dans l'objectif d'enregistrer et de localiser le maximum d'événements. Ici les deux couples de capteurs sont positionnés sur la face supérieure de l'éprouvette (figure 77). La précision de la localisation est améliorée par rapport à la configuration précédente. En effet, la position de la rupture localisée par les capteurs R6 α installés sur la face supérieure de l'éprouvette correspond bien à la position de la rupture réelle mesurée sur le faciès de rupture (figure 78). Donc, cette configuration a été adoptée pour tous les essais de flexion de ce travail. La distance entre les capteurs R6 α est de 260 mm et de 320 mm entre les capteurs R3 α .

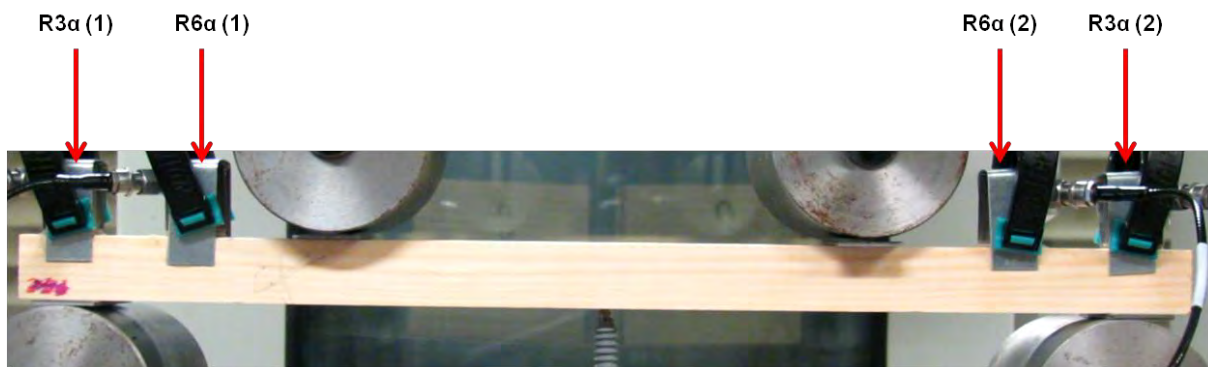
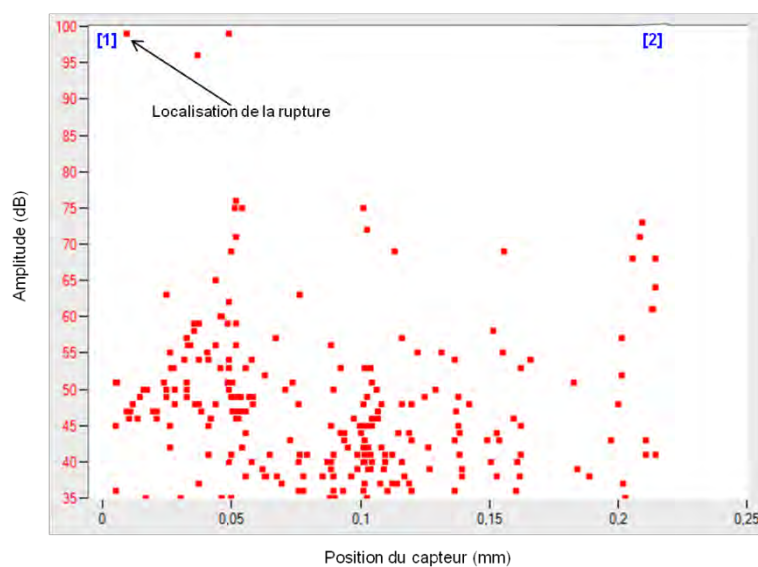
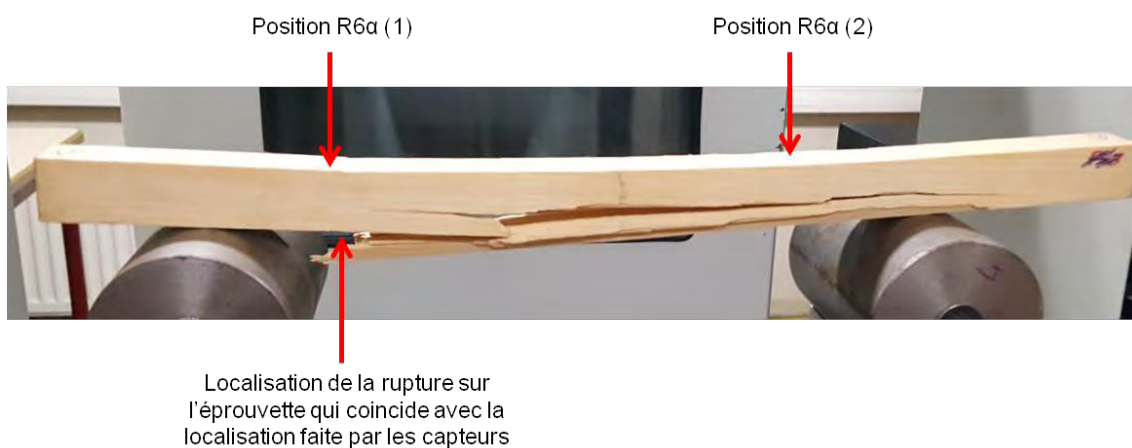


Figure 77 : Configuration 2 proposée pour le positionnement des capteurs sur une éprouvette de flexion



(a)



(b)

Figure 78 : (a) Position de la rupture localisée par les capteurs $R6\alpha$, (b) Position de la rupture réelle de l'éprouvette de flexion

IV.2.3- Réglage des paramètres d'acquisition

Après avoir sélectionné les types de capteurs à utiliser ainsi que leurs positionnements sur les différents types d'éprouvettes et après avoir mis en place le système d'EA, le réglage des paramètres d'acquisition est indispensable. Le seuil d'acquisition du système, qui représente l'amplitude minimale pour laquelle un signal d'EA est enregistré, est fixé en fonction du bruit environnant (la machine et les bruits extérieurs parasites). La valeur du seuil dans cette étude est fixée à 35 dB pour les trois types d'essais. Afin d'éliminer les bruits mécaniques parasites, des filtres analogiques sont appliqués aux signaux. Ces filtres sont :

- Filtre passe-haut : 20 kHz
- Filtre passe-bas : 400 kHz

Ces filtres coïncident avec les filtres imposés par la carte d'acquisition (la carte PCI8 permet une acquisition entre 20 et 400 kHz).

D'autres paramètres notables à régler sont les fenêtres d'acquisition temporelles glissantes qui permettent d'individualiser le début et la fin des salves d'EA. Le paramétrage de ces fenêtres a été effectué via les sources Hsu Nielsen (Nielsen 1960). Elles sont au nombre de trois (figure 79) :

- PDT (Peak Definition Time): Cette fenêtre permet la mesure du temps de montée et l'identification de l'amplitude maximale de la salve. Elle débute au premier dépassement du seuil et elle est reconduite si un nouveau maximum est mesuré dans le PDT. Dans notre étude il est fixé à 40 μ s.
- HDT (Hit Definition Time): Ce paramètre définit la durée d'acquisition d'une salve ou la détermination de la fin de la salve. Dans cette étude il est fixé à 200 μ s.
- HLT (Hit Lockout Time) : Cette fenêtre permet d'exclure d'éventuelles réflexions tardives dans les signaux d'EA. Le HLT débute à la fin du dernier HDT (Blassiau 2005). Elle est fixée à 300 μ s dans cette étude.

Ces valeurs vont définir la manière dont seront calculés les paramètres dans les signaux d'EA.

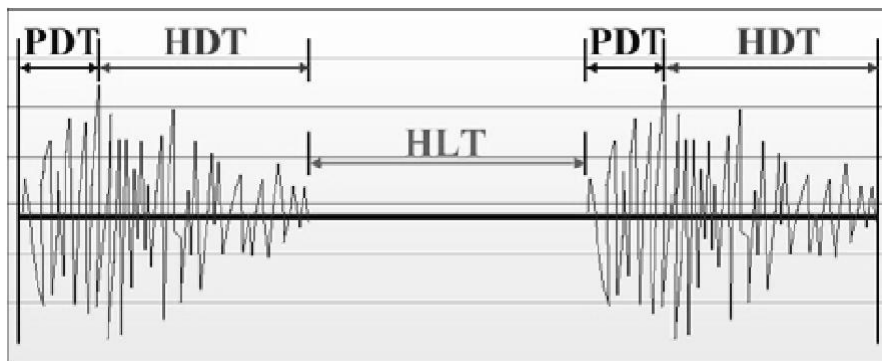


Figure 79 : Définition des fenêtres temporelles glissantes (d'après Saliba 2012)

IV.2.4- Validation de la mise en place du système d'EA et mesure de la vitesse de propagation

Cette partie va présenter un protocole proposé afin de valider la mise en place du système d'EA avant de lancer chaque essai et de garantir au maximum la répétitivité des essais mis en place.

La première étape consiste à vérifier la qualité du couplage des capteurs sur la surface de l'éprouvette. Pour ce faire, des cassés de mines (test Hsu-Nielsen) ont été réalisés sur la surface de l'éprouvette à côté de chaque capteur. Le couplage est validé si tous les cassés de

mines sont enregistrés comme des signaux d'amplitude maximale (99dB). De plus, le fonctionnement des capteurs et la transmission des salves acoustiques sont validés par le test AST (Auto Sensor Test).

Ensuite, afin de localiser les signaux acoustiques, la vitesse de propagation des émissions acoustiques est calculée. Le calcul de la vitesse est réalisé à l'aide des cassés de mines sur la surface de l'éprouvette en mesurant le temps de parcours des EA entre deux capteurs du même type (la distance entre les capteurs est connue). La vitesse est mesurée uniquement pour les essais de traction et de flexion. Pour l'essai de compression, étant donné que les deux capteurs ne sont pas positionnés directement sur le bois, on a utilisé les valeurs mesurées sur un essai de traction.

Le Tableau 16 présente les résultats des vitesses obtenues avec leurs écarts types pour les éprouvettes de traction et de flexion ainsi que les densités des trois essences. Ces vitesses mesurées sont cohérentes en comparaison de celles publiées dans la littérature, où la vitesse de propagation des ondes d'EA dans le matériau bois est comprise entre 4000 et 6000 m/s. On peut aussi noter que les vitesses augmentent avec l'augmentation de la densité du bois (Tableau 16) ce qui est cohérent avec les observations de Bucur (2006).

Il est intéressant de constater que les vitesses obtenues pour une essence donnée ne sont pas constantes. L'augmentation de la vitesse peut atteindre 20% quand on passe de l'éprouvette de traction à celle de flexion. Cette différence peut être liée à la géométrie de l'éprouvette puisqu'on ne génère pas les mêmes modes de propagation d'ondes acoustiques dans une éprouvette mince que dans une éprouvette plus épaisse. De plus, les rouleaux de flexion ont été posés sur les éprouvettes pendant la mesure de la vitesse ce qui peut gêner la propagation des ondes.

Tableau 16 : Vitesse de propagation des ondes acoustiques pour chaque type d'éprouvette et chaque essence de bois

Essence de bois	Epreuves de traction		Epreuve de flexion		Densité
	Vitesse (ms ⁻¹)	Ecart-type (ms ⁻¹)	Vitesse (ms ⁻¹)	Ecart-type (ms ⁻¹)	
Douglas	4747	420	5615	560	0,50 (±16%)
Sapin pectiné	4549	215	5296	164	0,42 (±23%)
Peuplier	4345	184	5080	115	0,41 (±7%)

Une fois que la vitesse de propagation des ondes est déterminée, la position des capteurs doit être précisée dans le logiciel AEwin. Deux paramètres permettant l'amélioration de la localisation des salves par le logiciel sont ensuite réglés. Ces paramètres dépendent de la distance entre les capteurs.

- Event Definition Value : Ce paramètre permet l'élimination des salves qui ne proviennent pas de la zone de localisation.
- Event Lockout Value : Ce paramètre permet le contrôle de l'intervalle entre deux événements consécutifs.

La dernière étape consiste à vérifier la maille de localisation. Pour ce faire, des cassés de mines à côté de chaque capteur et au milieu sont réalisés. La maille est vérifiée si chaque cassé de mine génère un signal correctement localisé.

IV.3- Thermographie infrarouge

La technique de thermographie infrarouge permet d'obtenir une image thermique traduisant une scène thermique dans un domaine spectral de l'infrarouge par le biais d'un appareillage approprié (Caniou 1991). La répartition spatiale en temps réel des températures apparentes sur la surface d'un échantillon est visualisée sous forme de thermogrammes (cartographies de température en 2D).

IV.3.1- Dispositif d'acquisition

Dans notre étude, sur des éprouvettes de traction, le suivi par thermographie infrarouge (TI) est réalisé simultanément avec le suivi par EA par le biais d'une caméra infrarouge FLIR Jade III Titanium SC7000 (figure 80a). Celle-ci possède un refroidisseur Stirling intégral, dont la gamme d'utilisation est de -20°C à 50°C . La résolution thermique fournie par le fabricant est de 25 mK° , son plan focal est de 320×256 pixels. Elle est équipée d'un capteur InSb. L'enregistrement et le traitement des données sont réalisés à l'aide du logiciel Altair.

Le protocole expérimental est simple. Dans la salle d'essai à température ambiante (autour de 20°C) et sans lumière, une caméra infrarouge est installée en face de l'échantillon à une distance de 83 cm (Figure 80b). La mesure est focalisée sur la zone centrale calibrée de l'éprouvette. Les capteurs d'EA ont été déplacés vers les sections rectangulaires (figure 80c) pour laisser la place aux mesures thermiques et éviter de perturber les mesures par des effets de réflexion dus aux capteurs d'EA. La distance entre les deux capteurs est de 180 mm.

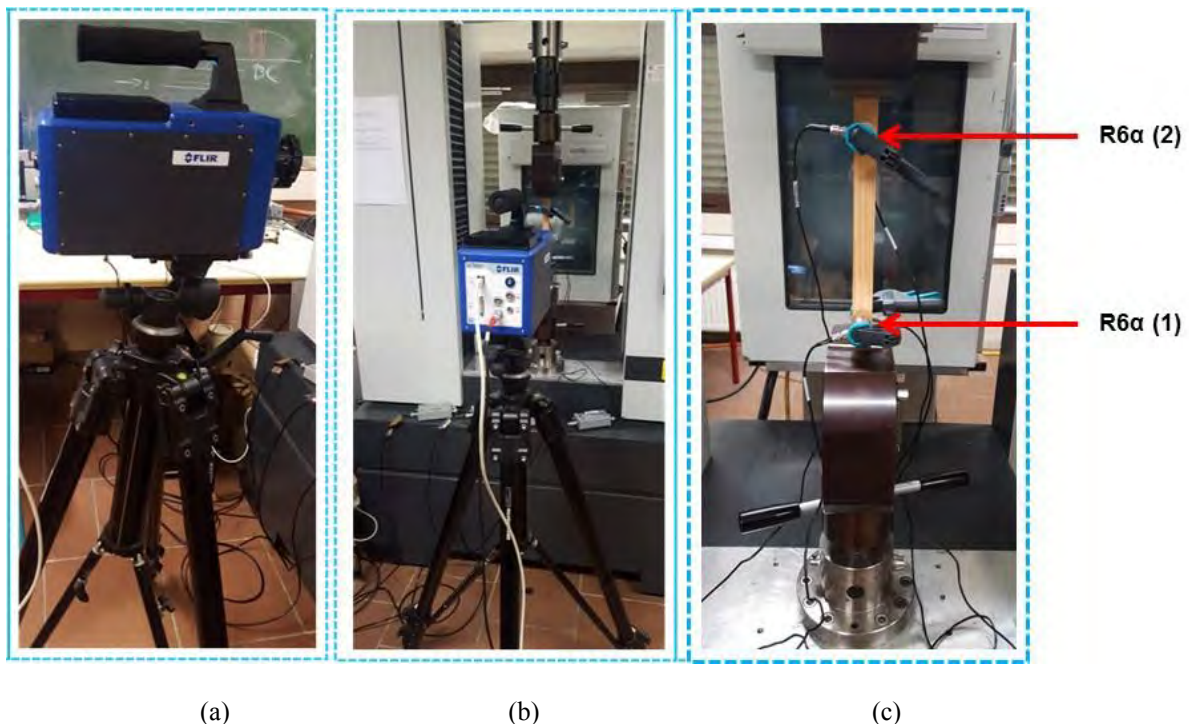


Figure 80 : (a) Caméra infrarouge FLIR (b) position de la caméra par rapport à l'éprouvette, (c) positionnement des capteurs d'EA sur la section rectangulaire d'une éprouvette de traction

IV.3.2- Réglage des paramètres d'acquisition

La réalisation des suivis par TI nécessite le réglage de certains paramètres :

- L'émissivité est fixée à 0,9 en se basant sur les résultats obtenus par Løpez et al. (2003)

- La fréquence d'acquisition choisie est égale à 150 Hz. En effet, la courte durée des essais nous permet de choisir une fréquence élevée sans générer des fichiers trop volumineux.

L'effet du bruit environnant a été limité par la mise en place d'une phase de post traitement. En effet, la température initiale de l'éprouvette a été soustraite au film pour mettre principalement en évidence les variations de températures produites par la sollicitation exercée sur l'éprouvette (équation (12)).

$$\Delta T = T - T_0 \quad (12)$$

Avec T : la température de l'éprouvette à l'instant t , T_0 : la température de l'éprouvette à l'instant t_0 .

IV.4- Micro-tomographie aux rayons X

IV.4.1- Principe physique

La tomographie aux rayons X est une méthode de contrôle non-destructif. Cette technique utilise une série de radiographies X de l'objet associé à différentes positions angulaires ce qui permet de reconstruire l'image tridimensionnelle de l'objet (Zhang 2012, Thiery 2013) (figure 81). Le principe physique de la tomographie X se base sur l'interaction entre le matériau et les rayons X. En effet, le matériau est traversé par un faisceau de rayons X d'intensité I_0 généré par un tube de rayons X. L'intensité dépend du coefficient d'atténuation (μ) de la matière traversée et aussi de l'épaisseur (x), suivant la loi de Beer-Lambert (Peix et al. 2000) (équation (13)).

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (13)$$

Où I : intensité du rayon transmis, I_0 : intensité du rayon émis, μ : coefficient d'atténuation

Le coefficient d'atténuation varie en fonction de l'épaisseur du matériau. Cette variation est utile pour reconstruire l'image dans le volume du matériau. L'échantillon est posé sur une platine tournante, ce qui permet d'avoir une série de radiographies sous différents angles. Un algorithme basé sur le principe de rétroprojection filtrée est utilisé pour reconstruire des coupes à partir de séries de radiographies acquises (Carmona 2009, Zhang 2012). L'image tridimensionnelle est obtenue à travers l'empilement de ces coupes.

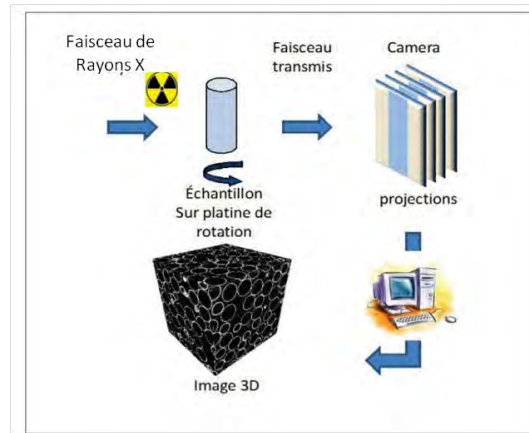


Figure 81 : Principe de la tomographie aux rayons X (d'après Zhang 2012)

IV.4.2- Matériel de mesure

Pour cette étude, un micro-tomographe à rayons X a été utilisé pour examiner certaines éprouvettes de traction. Il s'agit du modèle « EasyTom 130 » (figure 82), de puissance 2,2 kW, fabriqué par RX SOLUTIONS. Ses dimensions physiques sont de 1500x800x1500 mm³. La taille du détecteur est de 1920x1536 pixels. La résolution dépend de la distance entre l'objet et la source mais également de la taille de l'échantillon (Zhang 2012). Une meilleure résolution nécessite donc un échantillon de petite taille. Ce tomographe permet une résolution maximale des images de 4 µm pour un échantillon de 7x7x15mm. Pour 60 µm/pixel, un cube de 400x400x400 pourrait être ausculté.

Dans cette étude, on a commencé par la réalisation d'un scan global sur toute la partie calibrée de l'éprouvette de traction de dimensions (20 mm (R) x 4 mm (T) x 90mm (L)), la résolution dans ce cas est de l'ordre de 22 µm. A cette résolution, aucun endommagement ne pouvait être détecté lors des micro-endommagements de nos éprouvettes. Ensuite on a réalisé un scan local à une résolution de 14 µm ce que nous a permis de voir certains endommagement dans la structure du bois. La reconstruction du volume à partir des radiographies est effectuée par le biais du logiciel X.Act 2.0. Le traitement des images est réalisé par le logiciel ImageJ. Les résultats de ces observations seront présentés dans le chapitre 3 paragraphes II.7, III.7 et IV.7.

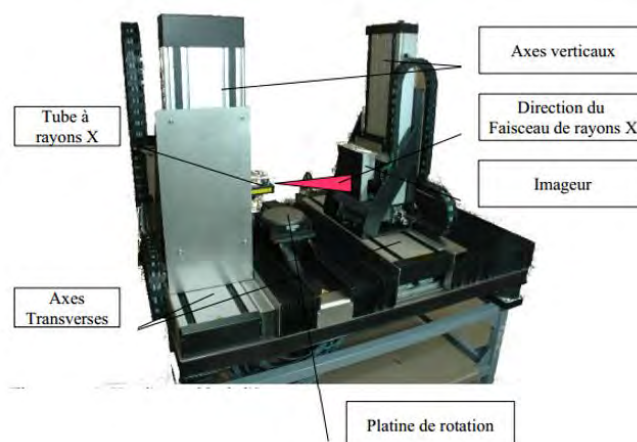


Figure 82 : Les principaux composants du micro-tomographe « EasyTom 130 »

IV-5. Instrumentation des essais : conclusion

La littérature ne contient pas de détails sur le matériel d'EA approprié pour le matériau bois. Donc, la mise en place d'un suivi par EA de l'endommagement de ce matériau a nécessité certaines études préliminaires comme le choix des capteurs, le positionnement de ces derniers sur les différents types d'éprouvette ainsi que le réglage des différents paramètres d'acquisition. Un protocole d'essai a été suivi afin d'optimiser la répétitivité des résultats. De plus, les deux autres techniques de CND (Tomographie aux rayons X et TI) sont rarement utilisées pour le suivi de l'endommagement du matériau bois. Donc, leurs mises en place a nécessité certaines adaptations et vérifications pour nos configurations d'essais.

V- Conclusion

Les trois essences utilisées dans cette étude sont le Douglas, le sapin pectiné et le peuplier, dont les deux premières appartiennent aux bois résineux et la dernière aux bois feuillus. Elles ont une densité proche, mais une structure anatomique très différente. L'hétérogénéité entre le BI et le BF est plus marquée chez le Douglas et négligeable chez le peuplier. Celle du sapin pectiné se situe entre le Douglas et le peuplier. L'influence de ces éléments sur l'activité acoustique va être exposée dans les chapitres suivants.

Les détails géométriques des éprouvettes de traction, de compression et de flexion, ainsi que les conditions utilisées pour les essais ont été décrits dans ce chapitre. Les résultats obtenus et discutés dans les chapitres suivants sont naturellement corrélés aux configurations d'essais choisies.

Les techniques de CND (thermographie infrarouge et tomographie aux rayons X) ont été décrites d'une façon succincte dans ce chapitre. Ces méthodes sont utilisées dans l'objectif de compléter les informations recueillies par l'émission acoustique. Elles ne sont effectuées que sur certaines éprouvettes de traction.

Le chapitre suivant est donc dédié au suivi des mécanismes d'endommagement d'éprouvettes sous sollicitation de traction longitudinale. Après une analyse des faciès de rupture et des propriétés mécaniques mesurées, nous essaierons d'identifier les différentes caractéristiques de l'activité acoustique enregistrée. Pour ce faire, une analyse statistique multi-variables est mise en place. L'objectif de cette analyse est d'identifier les groupes de signaux identiques. Une corrélation entre ces groupes de signaux et les endommagements des éprouvettes est ensuite présentée et complétée par les résultats obtenus par thermographie infrarouge et tomographie aux rayons X.

Chapitre 3 : Suivi de l'endommagement du matériau bois sous sollicitation de traction parallèle au fil

I- Introduction

L'endommagement du matériau bois sous sollicitation de traction longitudinale dépend non seulement de divers facteurs physiques tels que l'essence et sa structure anatomique, la densité, l'hétérogénéité des propriétés entre le bois initial (BI) et le bois final (BF), mais également de l'échelle d'étude. A l'échelle macroscopique, d'après Bodig et Jayne, 1982 et Pluvinage 1992, quatre modes de rupture dans le bois sollicité en traction dans le sens du fil, dit sens longitudinale (L), peuvent être distingués selon l'apparence des lignes de rupture finales sur les éprouvettes cassées (figure 83):

- Mode A : Rupture par fendage (splintering tension), où la ligne de rupture forme un zigzag irrégulier.
- Mode B : Rupture par combinaison de traction et de cisaillement, où la ligne de rupture est légèrement inclinée par rapport à la direction de la charge.
- Mode C : Rupture en cisaillement, où la ligne de rupture suit le plan de la contrainte de cisaillement maximale et s'incline à 45° par rapport à la direction de la charge.
- Mode D : Rupture fragile en traction, où la ligne de rupture suit le plan de la contrainte en tension maximale qui est perpendiculaire à la charge.

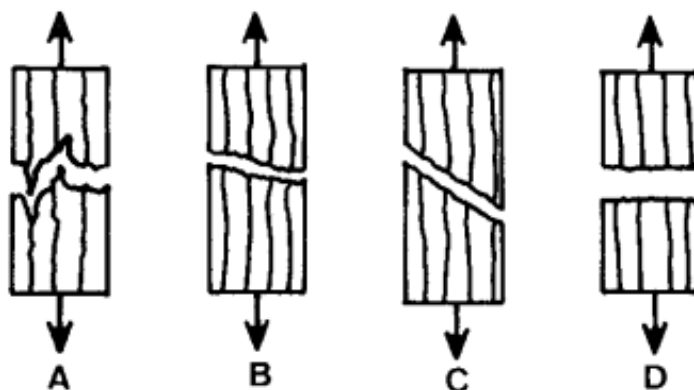


Figure 83 Modes de ruptures dans le bois en traction longitudinale (d'après Bodig et Jayne, 1982 et Pluvinage 1992)

- Mode A: Rupture par fendage (splintering tension)
- Mode B: Rupture par combinaison de traction et de cisaillement
- Mode C: Rupture en cisaillement
- Mode D: Rupture fragile en traction

Ces modes de rupture sont peu explicites, car les lignes de rupture finales dans les éprouvettes en bois résultent de la combinaison de la déformation normale et de l'initiation et de la propagation de fissures. Les modes B, C et D sont définis par le type de sollicitation, ils sont assimilés à des déformations dues à la contrainte de traction dans un matériau isotrope classique. En réalité, les lignes de rupture observées sur des éprouvettes en bois cassées en traction ne correspondent que très rarement à ces modes, car la fissuration y joue un rôle primordial. Par contre, le mode A, défini par la forme de la ligne de rupture, est toujours plus ou moins observé, puisque ce mode résulte non seulement de la déformation normale, mais également de la fissuration de différents types. En effet, à cause de la variation de la structure anatomique dans le bois, les mécanismes d'endommagement changent d'un point à l'autre au

sein du matériau. L'interaction de ces différents mécanismes provoque une ligne de rupture plutôt irrégulière définie comme la rupture par fendage (mode A).

Afin d'identifier les mécanismes d'endommagement du matériau bois sollicité en traction longitudinale, certains chercheurs ont recouru à des études fractographiques qui consistent à l'analyse microscopique des surfaces de rupture (Debaise et al. 1966 ; Akande et Kyanka 1989 ; Bodner et al. 1997). D'autres ont réalisé des essais in-situ dans une enceinte de microscopie à balayage électronique (MEB) (Sippola et Fruhmman 2002 ; Fruhmman et al. 2003). On cite ici les travaux de Fruhmman et al. (2003) menés sur des éprouvettes miniatures en bois d'épicéa (résineux). Leurs essais sont effectués avec arrêts et maintien de la charge à plusieurs stades (figure 84). Ensuite, l'identification des mécanismes d'endommagement est réalisée par MEB. Au point d'arrêt (2) (figure 84), ils ont observé une microfissure transversale qui traverse le bois initial (figure 85a). Cette microfissure se propage et s'élargit au stade de chargement (08) (figure 85b). Au point (14) les microfissures s'amorcent au bord du bois final (figure 85c) et elles se propagent le long de l'interface BI/BF au point (16) (figure 85d). Au point 19, la charge s'approche de son maximum puis est suivie par une chute brutale. A ce stade, à cause de la coalescence des fissures transversales et longitudinales, une bifurcation de la propagation de la fissure est observée, qui va du plan transversal vers le plan longitudinal. En effet, la fissure continue à se propager vers le bas au niveau du bord du BF (figure 85e). Le point (25) correspond à la rupture quasi-finale de l'éprouvette.

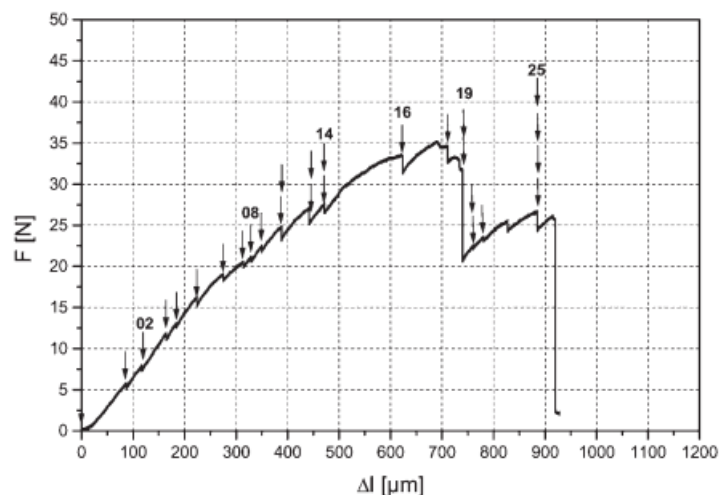


Figure 84 : Courbe force-déplacement des essais de traction arrêtés et in-situ sur une éprouvette en bois d'épicéa (d'après Fruhmman et al. 2003)

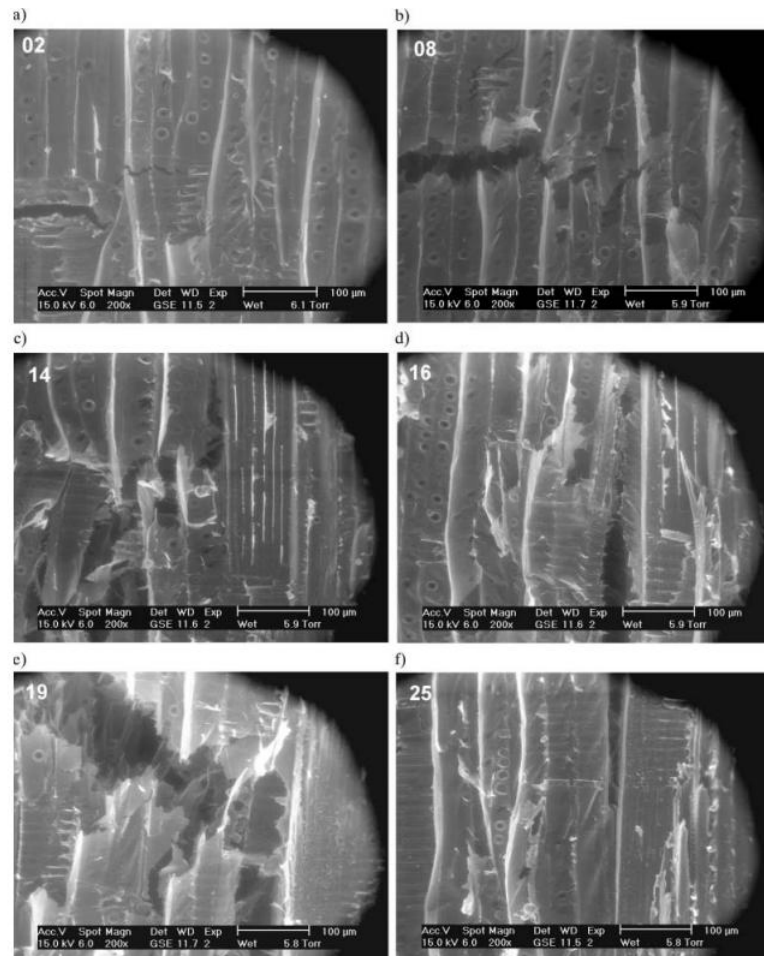


Figure 85 : Endommagements observés au microscope électronique à balayage (MEB) sur une éprouvette en bois d'écépica à différents stades de chargement (d'après Fruhmman et al. 2003)

A partir de ces observations ainsi que d'autres études dans la littérature (Akandi et al. 1989, Skagami et al. 2009), on propose à décomposer les mécanismes d'endommagement du matériau bois sollicité en traction longitudinale en trois principaux groupes à l'échelle microscopique ou/et à l'échelle mesoscopique (échelle du cerne de croissance). Cette classification ne peut pas être réalisée sans tenir compte de différents éléments anatomiques qui constituent le matériau bois. Rappelons que le bois résineux se compose de trachéides verticales (fibres) et horizontales (seulement dans certaines essences résineuses), des rayons ligneux constitués de cellules de parenchyme et des canaux résinifères (dans certaines essences), tandis que le bois feuillu contient des fibres libriformes et des fibres-trachéides (seulement dans certaines essences de feuillus), des rayons ligneux orientés dans le sens radial et des vaisseaux verticaux. Ces trois groupes d'endommagement sont illustrés par la figure 86:

Gr1- la microfissuration longitudinale due au cisaillement (figure 86a) :

- soit au niveau de l'interface BI/BF, soit dans le BI et dans le BF, à l'interface trachéide/trachéide, trachéide/rayon et trachéide/canal résinifère chez les résineux.
- soit au niveau de l'interface BI/BF, soit dans le BI et dans le BF, à l'interface fibre/fibre, fibre/rayon et fibre/vaisseau chez les feuillus.

Gr2- la microfissuration transversale due à la contrainte en tension (figure 86b) :

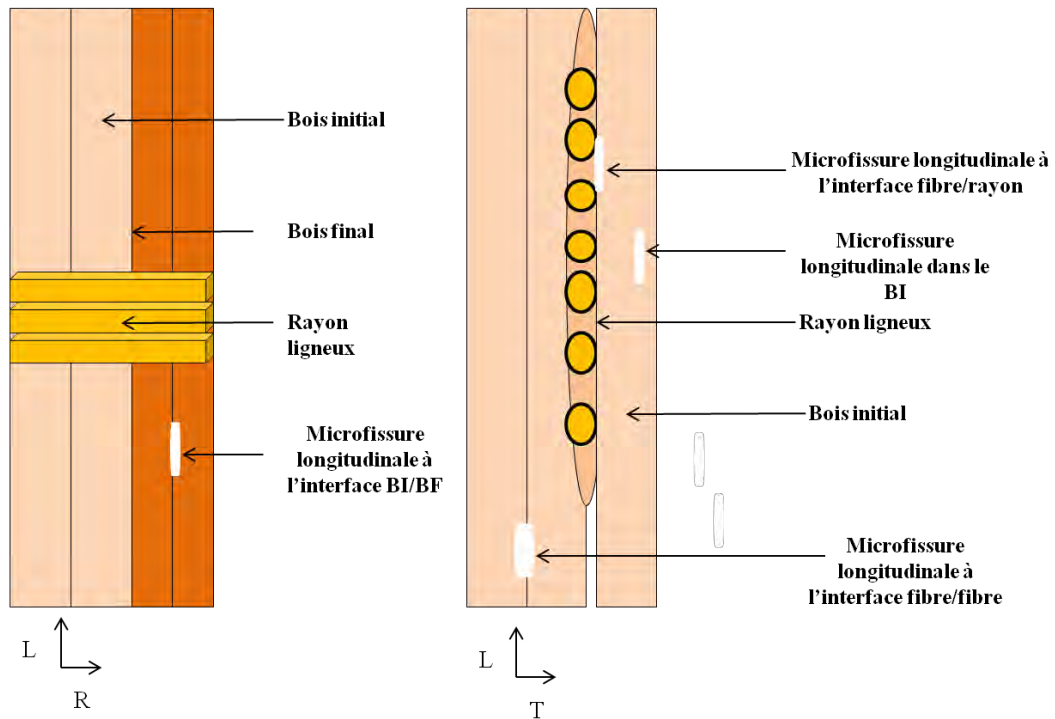
- dans la paroi des trachéides verticales, dans les rayons radiaux ou entre les trachéides radiales chez les résineux.

- dans la paroi des vaisseaux, dans les rayons radiaux ou dans la paroi des fibres chez les feuillus.

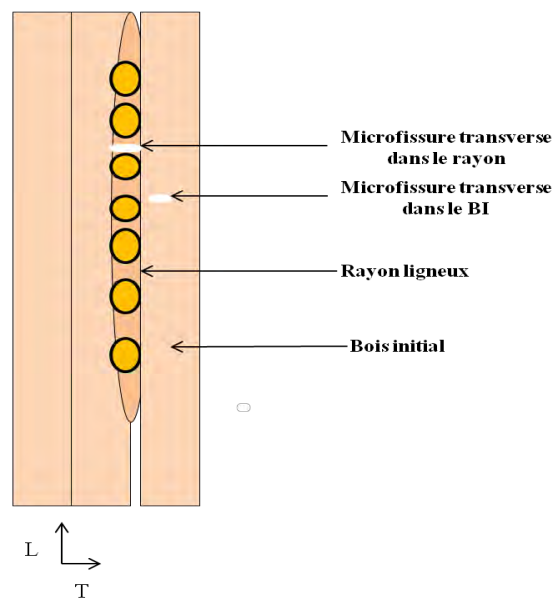
Gr3- la rupture des fibres due à la contrainte en tension (figure 86c) :

- dans le BI et dans le BF

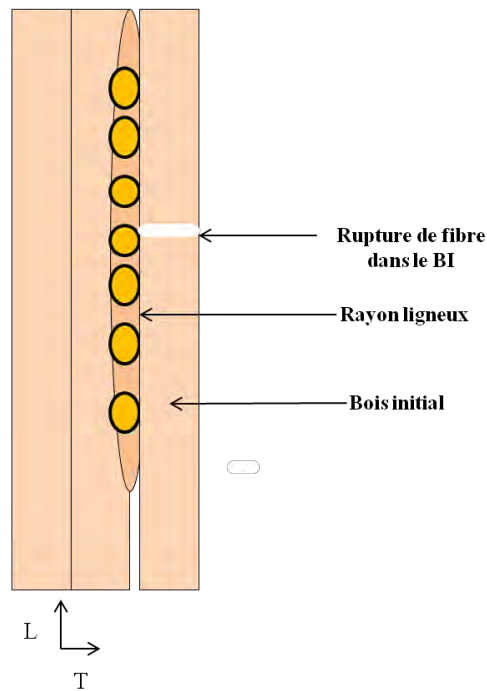
Selon l'essence du bois, même si la sollicitation est identique, la pondération de ces mécanismes n'est pas pareille, induisant des faciès de rupture différents.



(a)



(b)



(c)

Figure 86 : Regroupement des mécanismes d'endommagement du bois sollicité en traction longitudinale (a) microfissuration longitudinale dans le BI et BF, à l'interfaces BI/BF et Fibre/rayon (b) microfissuration transversale dans la paroi des trachéides ou à l'interface fibre/rayon (c) rupture des fibres

En général, à l'échelle micro/mesoscopique, le bois est un matériau orthotrope et hétérogène. La résistance à la microfissuration varie selon plusieurs facteurs tels que la structure de l'endroit à étudier, le type de contrainte appliquée et son orientation. Par exemple la résistance à la rupture des fibres dans le BF est supérieure à celle dans le BI (Kollmann et côté 1968 ; Fruhmman et al. 2003). Celle de l'interface fibre/vaisseau ou fibre/rayon diffère aussi à celle de l'interface BI/BF. Par conséquent, l'initiation des microfissures dépend plutôt d'un rapport de résistance (R) qui définit le risque de rupture. Il est défini comme suit (équation 14) :

$$R = \text{contrainte} / \text{résistance} \quad (14)$$

Ici la résistance au dénominateur est propre à la contrainte du numérateur. Cela signifie qu'elles sont même nature (contrainte; normale ou de cisaillement), de même orientation et dans le même sens (en traction ou en compression), et au même endroit (même microstructure). Le rapport ainsi défini est un coefficient sans unité. Il n'y aura pas d'endommagement si $R < 1$, tandis que la microfissure s'initie si $R = 1$. Par conséquent, le rapport R caractérise le risque d'endommagement.

A l'échelle macroscopique, l'évolution de l'endommagement se traduit en principe par la coalescence ou la propagation des fissures. Elle se caractérise plus aisément par l'application de la mécanique de la rupture, où la sollicitation par rapport aux fronts d'une fissure se décompose en trois modes élémentaires (figure 87a) :

- Mode I : mode d'ouverture d'une fissure, généré par une contrainte normale au plan qui contient la fissure.

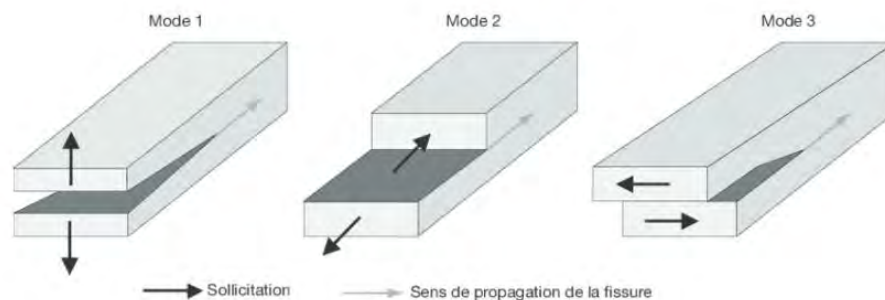
- Mode II : mode de glissement plan d'une fissure, provoqué par une contrainte de cisaillement qui agit tangentielle au plan de la fissure et perpendiculairement au front de la fissure.
- Mode III : mode de glissement anti-plan d'une fissure, obtenu par une contrainte de cisaillement tangentielle au plan de la fissure et parallèlement au front de fissure.

Dans un bois qui possède trois axes de symétrie : longitudinal L, radial R et tangentiel T, selon l'emplacement d'une fissure plane, on peut définir six types de propagation comme illustré par la figure 87b.

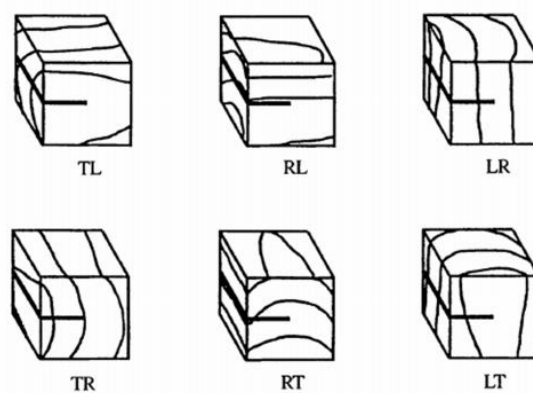
Le système de fissuration IJ ainsi présenté dans un repère (LRT) prend la signification suivante :

- I: indique le vecteur normal au plan qui contient la fissure.
- J: indique le vecteur normal au front de la fissure, ou vecteur indiquant la direction de propagation de la fissure

Prenons un exemple. Soit une fissure qui se trouve sur le plan (LT) dont le vecteur normal à ce plan est l'axe R, se propage dans la direction L, la propagation de la fissure est désignée comme le type RL. En réalité, ce système de dénomination suppose que la fissure se trouve initialement sur un plan orthotrope et se propage sur le même plan. Cette hypothèse n'est pas aberrante, car dans le matériau bois, les microfissures se trouvent principalement aux plans orthotropes, la bifurcation d'une fissure d'un plan à l'autre résulte d'une coalescence successive des deux fissures dans deux plans différents.



(a)



(b)

Figure 87 : (a) Les trois modes élémentaires de propagation de fissure (d'après Coutellier 2006) (b) systèmes de propagation de fissure dans le bois (d'après Benabou 2016)

En conclusion les concepts introduits dans cette partie vont être utilisés dans l'interprétation des résultats expérimentaux tout au long de ce chapitre.

De plus, dans les parties suivantes, on s'intéresse au suivi de l'évolution de l'endommagement par EA au sein des trois essences sollicitées en traction longitudinale. Ce travail consiste à observer le comportement mécanique global de chaque essence testée ainsi que les faciès de rupture associés; à déterminer la chronologie ainsi que la signature acoustique recueillie au cours des essais; à proposer une corrélation entre les signatures acoustiques et les mécanismes d'endommagement; et finalement de conclure sur les scénarios d'endommagement représentatifs pour chaque essence testée.

Les trois parties suivantes se consacrent à l'étude du comportement en traction dans le sens du fil du bois de Douglas, de sapin pectiné et de peuplier, respectivement. Ensuite une comparaison entre la réponse acoustique des trois essences sera présentée. Ce chapitre se terminera par une conclusion concernant le suivi de l'endommagement des trois essences testées en traction longitudinale.

II- Endommagement du Douglas sous sollicitation de traction parallèle au fil

II.1- Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à l'endommagement du bois de Douglas sous sollicitation de traction longitudinale. Le comportement et les propriétés mécaniques des cinq éprouvettes testées ainsi que leurs faciès de rupture seront analysés en premier lieu. Ensuite, une éprouvette représentative du lot sera sélectionnée pour être étudiée en terme d'activité acoustique. Les signaux recueillis au cours de l'essai feront l'objet d'une analyse statistique multi-variables. La labellisation des classes de signaux identifiées corrélées aux mécanismes d'endommagement sera réalisée à l'aide des essais arrêtés suivis par EA, thermographie infrarouge et des observations tomographiques. L'ensemble de ce travail permet de proposer un scénario d'endommagement du Douglas soumis à une sollicitation de traction parallèle au fil (longitudinale).

II.2- Comportement traction et propriétés mécaniques associées

La figure 88 représente les courbes force-déplacement ($F-\delta$) des cinq éprouvettes de Douglas de dimensions identiques sollicitées en traction parallèle au fil. La répétitivité au niveau de la rigidité et de la résistance est bonne si l'on considère 4 éprouvettes sur cinq. L'allure de ces courbes est relativement proche les unes des autres excepté celle de l'éprouvette TD3. En général, l'allure de ces courbes peut être décrite ainsi : une petite partie linéaire au début de la sollicitation, où la charge semble inférieure à 50% de la charge maximale. La courbe devient légèrement non linéaire jusqu'à ce que l'effort atteigne sa valeur maximale. La durée de cette partie est très différente d'une éprouvette à l'autre. Ensuite, la charge atteint une valeur maximale suivie par une chute brutale. Par la suite, la charge augmente de nouveau et atteint un nouveau pic dont la valeur est toujours inférieure à la précédente (excepté l'éprouvette TD1). Ce scénario se répète jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette. L'éprouvette TD3 ne présente qu'une chute de force brutale au moment de la rupture finale (figure 88).

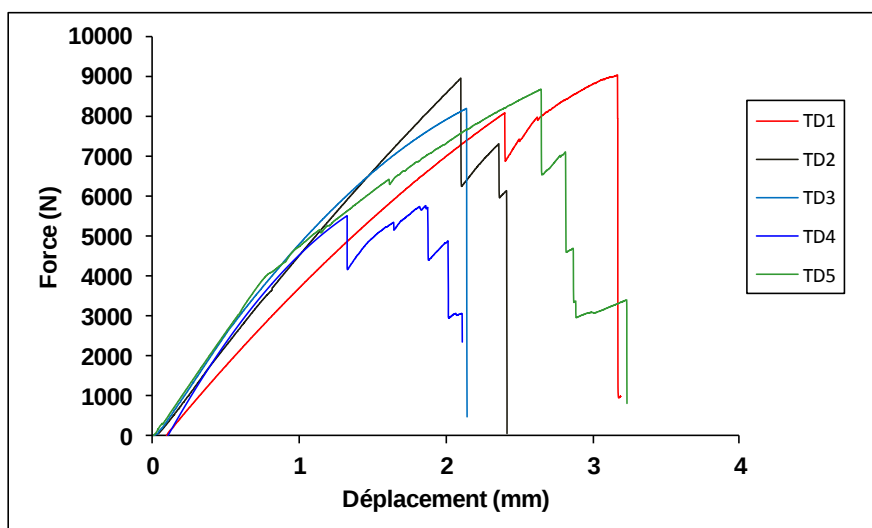


Figure 88 : Courbes force-déplacement (F- δ) des cinq éprouvettes de Douglas sollicitées en traction longitudinale

Puisque les dimensions de toutes les éprouvettes sont très proches, ces courbes sont comparables. On peut donc constater que l'éprouvette TD4 présente un pic d'effort inférieur au reste des éprouvettes et que l'éprouvette TD1 présente une rigidité inférieure. Donc, les résultats de TD4 et TD1 sont écartés dans le calcul de la moyenne de la contrainte maximale et du module d'Young respectivement. Les propriétés mécaniques du lot d'éprouvettes de Douglas sollicitées en traction parallèle au fil sont résumées dans le tableau 17. On constate une faible dispersion au niveau des résultats du module d'Young et de la contrainte maximale. Elle est de l'ordre de 1% et de 4% respectivement. Par contre la dispersion des résultats du coefficient de Poisson est plus élevée, elle est autour de 13%. En outre, les résultats obtenus sont en bonne concordance avec les résultats de la littérature.

Tableau 17 : Propriétés mécaniques mesurées sur le lot d'éprouvettes de Douglas sollicitées en traction parallèle au fil

Eprouvettes	Modules d'Young (GPa)	Module d'Young (GPa) (Littérature)	Contraintes maximales (MPa)	Contrainte maximale (MPa) (Littérature)	Coefficients de Poisson	Coefficient de Poisson (Littérature)
TD1	12,9*	13,2-16,8**	113	82- 110***	0,35	0,35-0,4****
TD2	14,3		112		0,40	
TD3	14,4		102		0,43	
TD4	14,2		72*		0,30	
TD5	14,6		108		0,37	
Moyenne	14,4		108,7		0,37	
Coefficient de variation	±1%		±4%		±13%	

* Ces valeurs ne sont pas considérées dans le calcul de la moyenne

** Gérard et al. (2011) Tropix

*** Sell et Kropf(1990). Propriétés et caractéristiques des essences de bois

**** Guitard (1987). Mécanique du matériau bois et composites

II.3- Observation des faciès de rupture

Afin de comprendre ce qui se passe pendant les essais de traction, nous avons effectué une observation visuelle des éprouvettes rompues. Toutes les éprouvettes montrent une surface de rupture en peigne (figure 89). Ce mode de rupture nommé fendage en traction (splintering tension en anglais) (Mode A figure 83) est fréquemment observé pour le bois avec des cernes marqués sollicité en traction parallèle au fil (Bodig et Jayne 1982, Ansell 1982, Fruhmman et al. 2003).

L'observation post-mortem des faciès de rupture met en évidence différents types de fissuration. Prenons l'éprouvette TD2 comme exemple (figure 90), on voit des lignes de rupture transversale au niveau du bois initial (BI) et du bois final (BF). Des fissurations longitudinales au niveau de l'interface BI/BF et dans le bois initial sont aussi identifiées.

En outre, en comparant les faciès de rupture de chaque éprouvette avec leur courbe force-déplacement, et en visualisant les films réalisés au cours des essais, on s'aperçoit que chaque chute de charge correspond plus ou moins à une rupture d'un paquet de fibres dans le BI due à la propagation des fissure transversales du type LR et LT. Si un premier paquet du BI cassé se trouve au bord de l'éprouvette, la chute de charge est plus importante. Dans ce cas la propagation de la fissure bifurque souvent dans l'interface BI/BF et devient instable. En effet, ce phénomène peut être expliqué par la perturbation de la symétrie de l'éprouvette vis à vis la charge appliquée, à cause de la fissuration dans le BI au bord de l'éprouvette. L'éprouvette ainsi endommagée subit une charge de traction-flexion combinée. Cela a pour l'effet d'introduire la participation du mode I dans la fissuration longitudinale à l'interface BI/BF. Sur les photos présentées sur la figure 89, l'ouverture des fissures longitudinales aux bords de l'éprouvette est souvent visible. Ce n'est pas le cas pour les fissures longitudinales qui se trouvent au milieu des éprouvettes. Cela permet aussi d'expliquer pourquoi il n'y a pas de pics visibles sur la courbe force-déplacement obtenue sur l'éprouvette TD3, où aucune fissure longitudinale ne présente une ouverture visible. On peut imaginer que la fissuration a progressé de façon symétrique par rapport à l'axe de la charge appliquée.

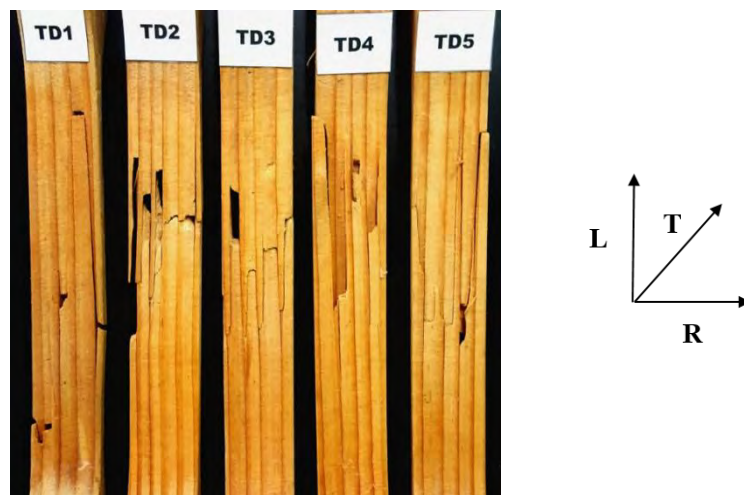


Figure 89 : Faciès de rupture du lot d'éprouvettes du Douglas

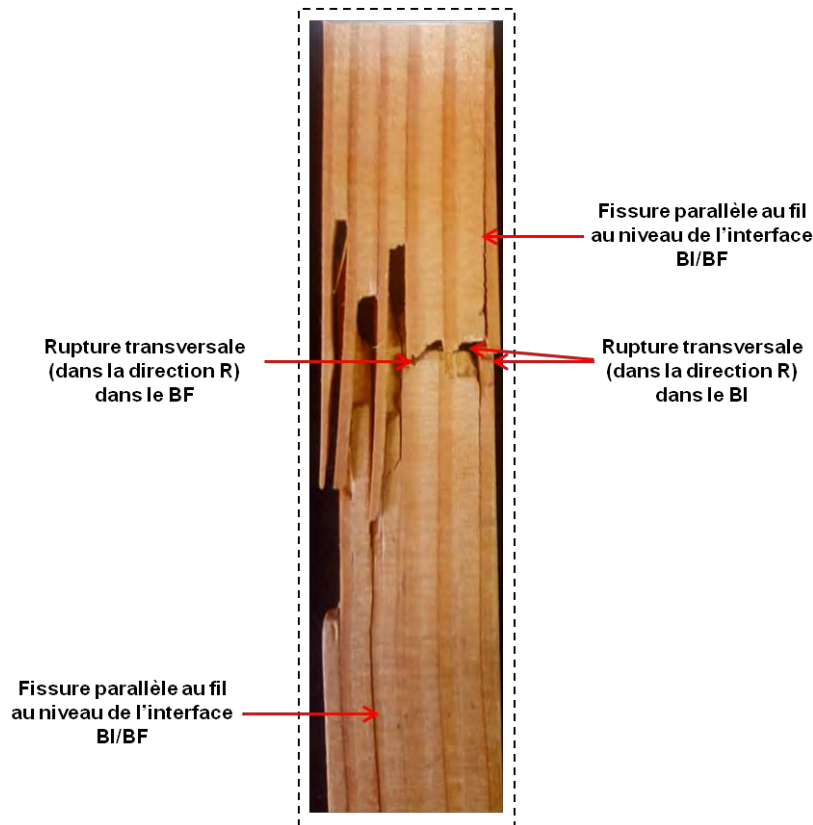


Figure 90 : Faciès de rupture de l'éprouvette représentative (TD2) du lot d'éprouvettes de Douglas

Par la suite, l'activité acoustique recueillie pendant l'essai est analysée afin de constituer le scénario d'endommagement dans une éprouvette représentative (TD2) soumise à une sollicitation de traction longitudinale.

II.4- Analyse de l'activité acoustique

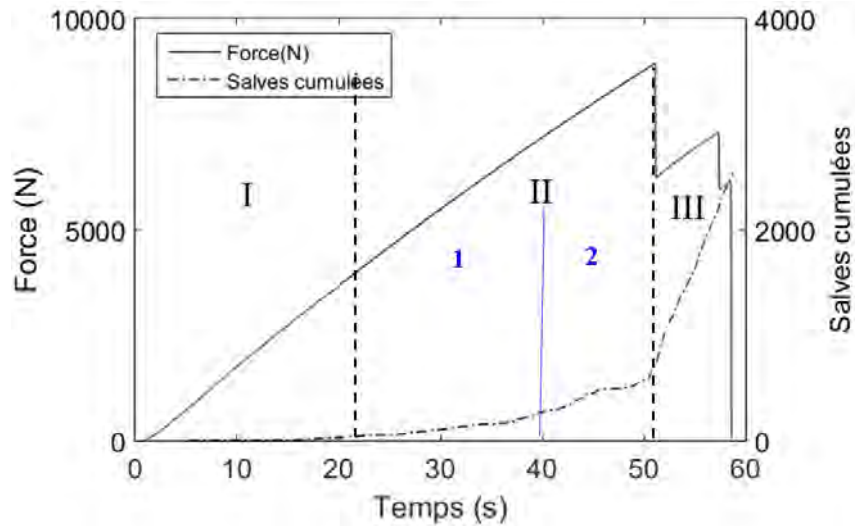
Afin de définir les différentes phases d'évolution de l'endommagement en terme d'émission acoustique, une analyse temporelle de l'activité acoustique a été réalisée sur l'éprouvette TD2, qui présente un comportement représentatif des éprouvettes en Douglas soumises à la traction longitudinale.

La courbe de l'évolution de la force en fonction du temps couplée à l'évolution de l'activité acoustique est montrée sur la figure 91. L'activité acoustique est représentée par le nombre de salves cumulées (figure 91a), l'amplitude (figure 91b) et l'énergie cumulée (figure 91c). Trois phases peuvent être identifiées (figure 91):

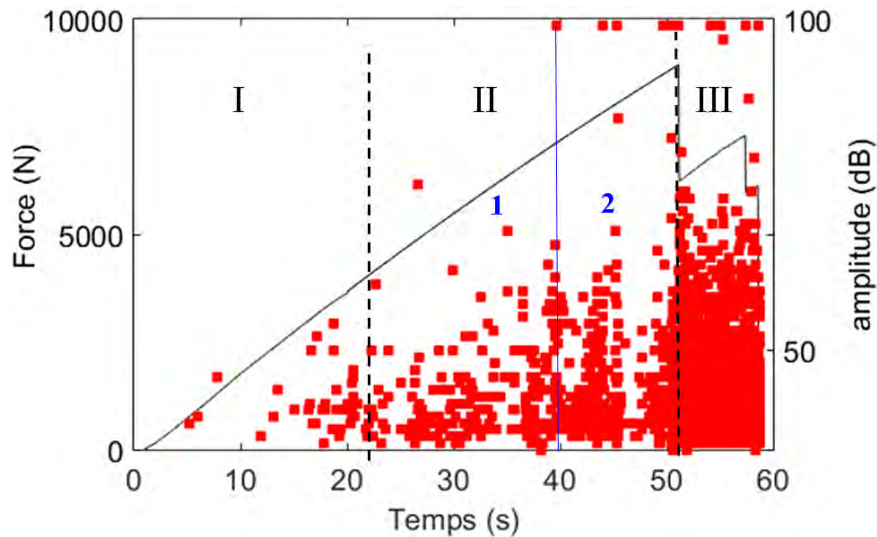
- **Phase I** : Cette phase correspond à la partie quasi-linéaire de la courbe (F- δ). Elle est caractérisée par la détection de quelques signaux acoustiques à un taux de charge inférieur à 50% de la charge maximale (figure 91a). L'amplitude de ces signaux ne dépasse pas 50 dB (figure 91b). De plus, l'énergie cumulée reste faible durant cette phase (figure 91c).
- **Phase II** : Cette phase débute lorsque la courbe (F- δ) commence à devenir non linéaire, et termine au point de la charge maximale. En termes de réponse acoustique, cette phase est caractérisée par une augmentation régulière de l'activité acoustique cumulée. Cette phase peut être divisée en deux parties : partie 1 où l'activité acoustique augmente progressivement (figure 91a), l'amplitude ne dépasse pas 70 dB (figure 91b) et l'énergie cumulée reste faible (figure 91c). La partie 2 débute à $t = 40$ s et elle est caractérisée par une augmentation du nombre de salves cumulées (figure

91a) ainsi que par la présence de signaux de haute amplitude (99dB) (figure 91b). Une augmentation par palier est aussi observée au niveau de l'énergie cumulée dans la partie 2 de la phase II (figure 91c).

- **Phase III** : Cette phase couvre la zone où la charge est maximale jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette. Au niveau de la réponse acoustique dans cette phase, le nombre de salves cumulées (figure 91a) ainsi que l'énergie cumulée (figure 91c) augmentent de façon significative. La multiplicité des sources d'émission acoustique dans cette phase apparaît clairement sur la figure 91b, où l'on observe un spectre d'amplitude très large, allant de 35 dB à 99 dB.



(a)



(b)

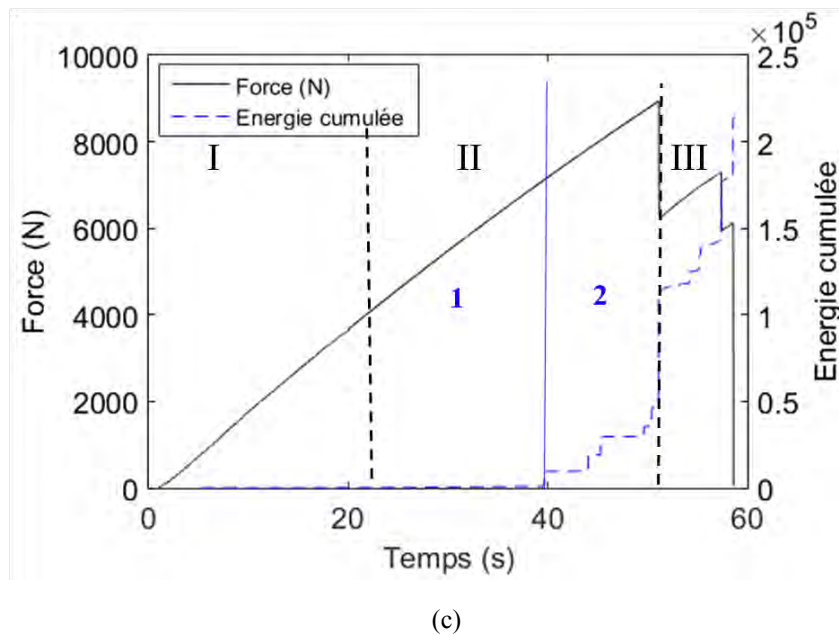


Figure 91 : Evolution de la charge en fonction du temps enregistrée sur l'éprouvette TD2 en Douglas soumise à une sollicitation de traction dans le sens du fil, couplée avec l'activité acoustique en terme (a) de salves cumulées (b) d'amplitudes (c) d'énergie cumulée

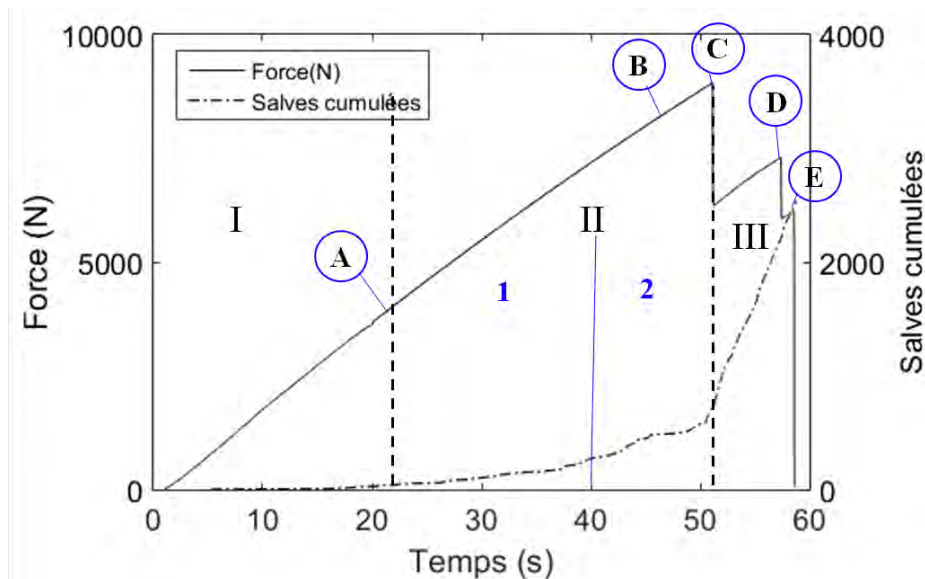
II.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique

L'essai de traction de l'éprouvette TD2 a été filmé. Différentes images à différents points marquants de la courbe ont été extraites du film (figure 92). En effet, pendant la phase I, aucun endommagement particulier n'est observé sur la surface de l'éprouvette (figure 92-Point A). Mais, si on se base sur l'étude de Fruhmman et al. (2003) présentée auparavant, on peut suggérer que certaines microfissures peuvent se développer même dans la partie linéaire pour le cas d'un bois à cernes marqués.

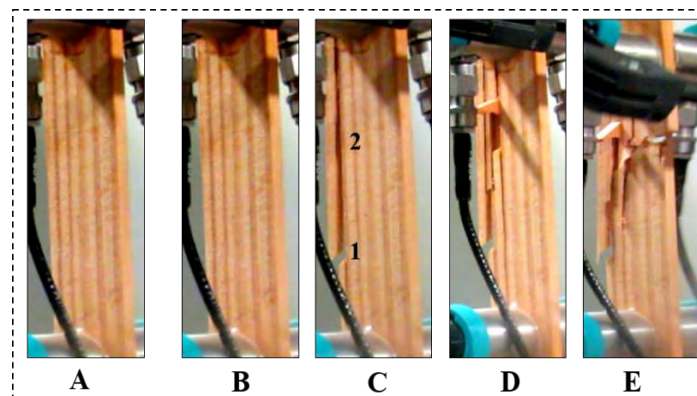
Durant la phase II, la surface de l'éprouvette filmée est exempte de tout endommagement visible (figure 92-Point B). En revanche, des bruits audibles ont été entendus pendant l'essai à partir de $t=40s$ ce qui génère les signaux de haute amplitude observés dans la partie 2 de la phase II (figure 91b). Ces bruits peuvent être générés par une dégradation importante au sein du matériau. Dans les études réalisées par Ansell (1982), Sipolla et Fruhmman (2001), Fruhmman et al. (2003), à un stade de chargement similaire, des microfissures au niveau des interfaces BI/BF et fibre/fibre dans le BI ont été observées. De plus, Ansell (1982) a constaté une augmentation de l'activité acoustique. Cette dernière a été attribuée aux microfissures générées par cisaillement inter-laminaire au niveau des plans de faiblesse où le rapport de résistance R est élevé, telles que les interfaces BI/BF, fibre/rayon.

Le début de la troisième phase coïncide avec le point C (figure 92a) où se trouve la charge maximale. En effet, à ce moment $t=51,12s$, apparaît le premier macro-endommagement sous forme d'une fissure horizontale qui traverse de façon perpendiculaire un paquet de trachéides de BI au bord de l'éprouvette (Figure 92b-Point C-1). Cette fissuration induit alors un décentrage de la charge et introduit ainsi à l'interface BI/BF une contrainte de pelage due à la flexion et une contrainte de cisaillement due à la charge de traction. La fissure bifurque dans la direction longitudinale au niveau de l'interface BI/BF (figure 92b-Point C-2). On voit que le paquet de trachéides cassé dans le BI au bord de l'éprouvette se détache de plus en plus vite de l'éprouvette à cause de cette propagation de fissure de type RL. Ce processus s'accompagne d'une chute importante brutale de charge (figure 92a-Point C). En outre, au point C, l'augmentation de l'activité acoustique accélère tout à coup pour atteindre une vitesse

nettement plus importante par rapport à celle enregistrée avant le point C. Ensuite, à $t = 57,37s$ il arrive une deuxième rupture de scénario similaire à celui de la première (figure 92-Point D). La fin de la troisième phase correspond à la rupture finale (figure 92-Point E), où la fissure traverse perpendiculairement à la fois le BI et le BF (Figure 92b-Point E).



(a)



(b)

Figure 92: Différents stades d'endommagement de l'éprouvette (a) Courbe de l'évolution de la charge et de l'activité acoustique en fonction du temps (b) Photos de la surface de l'échantillon extraites du film à des points particuliers

II.6- Classement des données acoustiques

Les données d'émission acoustique sont généralement complexes, et cela d'autant plus lorsque plusieurs mécanismes d'endommagement de signatures acoustiques différentes interviennent simultanément. L'analyse temporelle réalisée dans la partie précédente ne fournit pas d'indices suffisants pour dissocier les différents mécanismes d'endommagement. Les techniques statistiques automatisées telle que la technique de reconnaissance de forme représente une alternative intéressante permettant de dissocier les différents mécanismes d'endommagement. Cette technique permet en effet de regrouper les signaux similaires dans des classes. Chaque classe peut être reliée à un mécanisme spécifique. Dans cette étude, nous avons utilisé le logiciel Noesis (développé par Enviroacoustics SA, 2011) pour la classification des signaux. La mise en œuvre de ce logiciel est détaillée dans l'annexe 4. Noesis propose plusieurs algorithmes pour la reconnaissance de la forme des signaux. Notre

choix s'est porté sur la méthode des k-moyennes (k-means) puisque sa mise en œuvre est assez aisée et qu'elle est largement utilisée dans la littérature pour la classification des signaux d'EA (Huguet 2002, Godin 2011, Hamdi 2012, Munoz 2015).

Notre analyse est basée sur l'activité acoustique enregistrée par le capteur qui recueille le maximum de signaux. Dans ce cadre, les signaux enregistrés par le capteur R6 (1) sont analysés (figure 93).

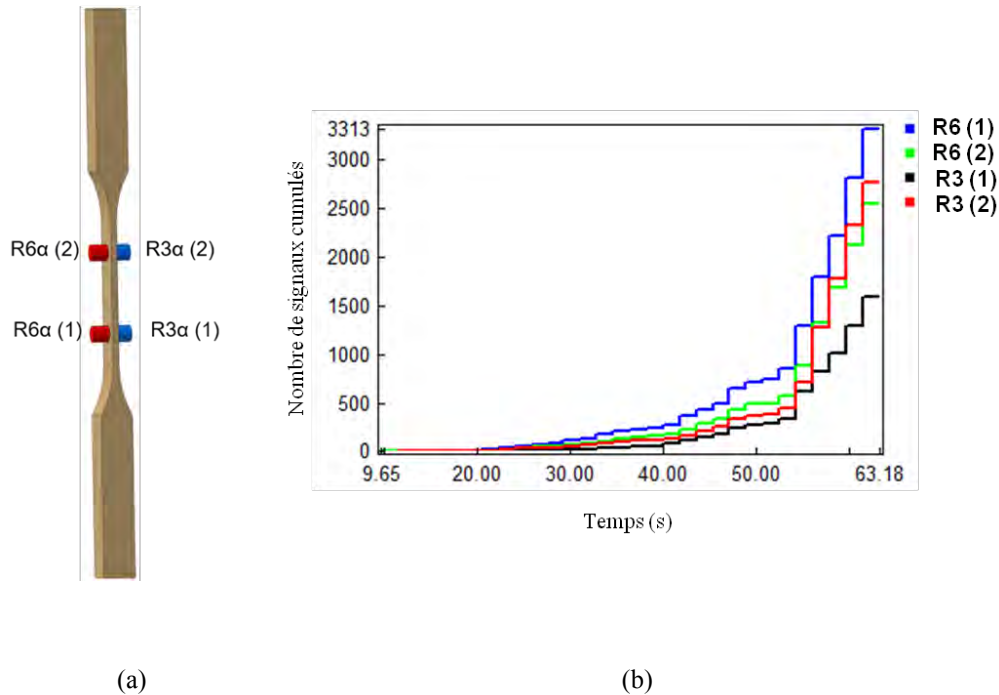


Figure 93 : Positions des capteurs (b) Nombre de signaux enregistrés par chaque capteur

A- Optimisation du nombre de classes

Les critères statistiques permettant d'estimer le nombre de classes optimal sont le coefficient de Davies et Bouldin (D&B) et le coefficient Tou. Les détails sur ces deux critères sont fournis dans l'annexe 3. Généralement, le nombre de classes est optimal lorsque le coefficient de Davies et Bouldin est minimisé et le coefficient Tou est maximisé. La figure 94 montre l'évolution de ces coefficients en fonction du nombre de classes. Le coefficient D&B minimal et celui de Tou maximal tombent tous les deux sur un nombre de classes égal à 3. Par conséquent, le choix de trois classes de signaux d'EA a été sélectionné pour cette étude. Ces trois classes sont susceptibles de correspondre à trois mécanismes ou ensemble de mécanismes d'endommagement mis en jeu lors de la sollicitation des éprouvettes de Douglas en traction parallèle au fil.

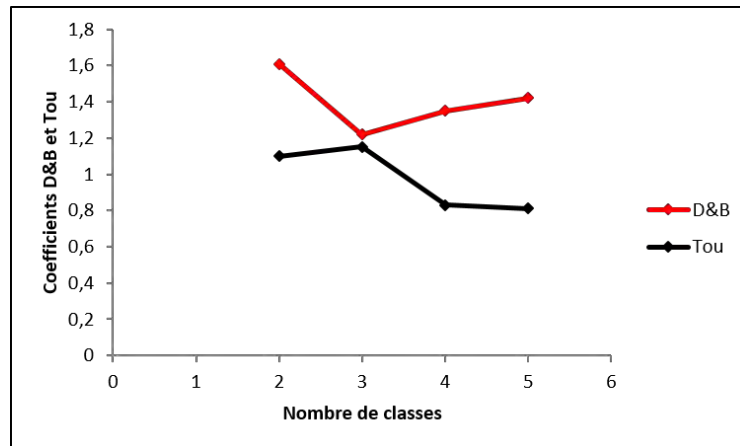


Figure 94 : Coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes (éprouvette TD2)

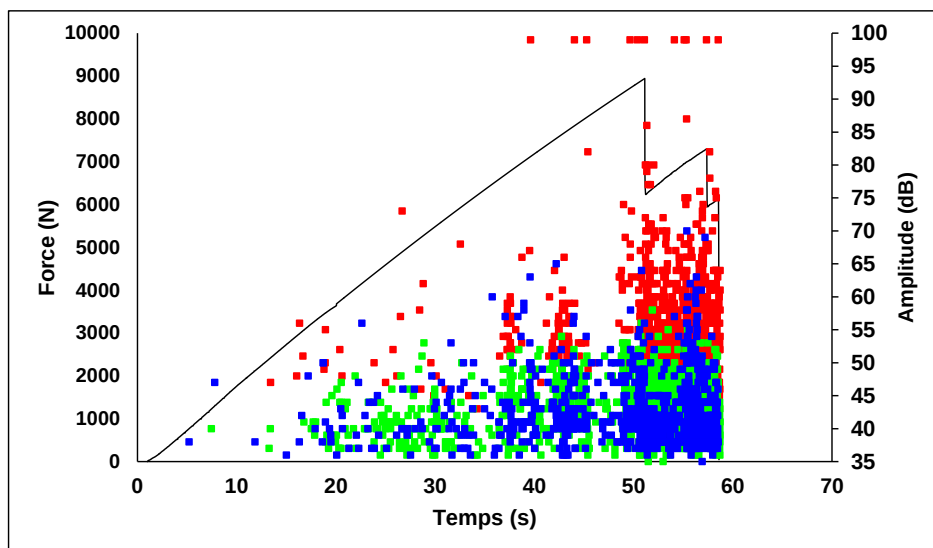
B- Résultats de la classification des signaux par la méthode des k-moyennes

Les résultats de la classification des signaux acoustiques par la méthode des k-moyennes sont présentés au regard de l'amplitude des salves (figure 95). La valeur moyenne de chacun des descripteurs discriminants ainsi que l'écart type correspondant aux trois groupes dissociés sont résumés dans le Tableau 18. On peut constater que l'écart-type de certains paramètres est beaucoup plus élevé que la valeur moyenne. Donc, le classement des signaux en utilisant un seul paramètre ne peut pas être toujours correct. Afin de contourner ce problème, l'analyse simultanée de plusieurs paramètres semble intéressante.

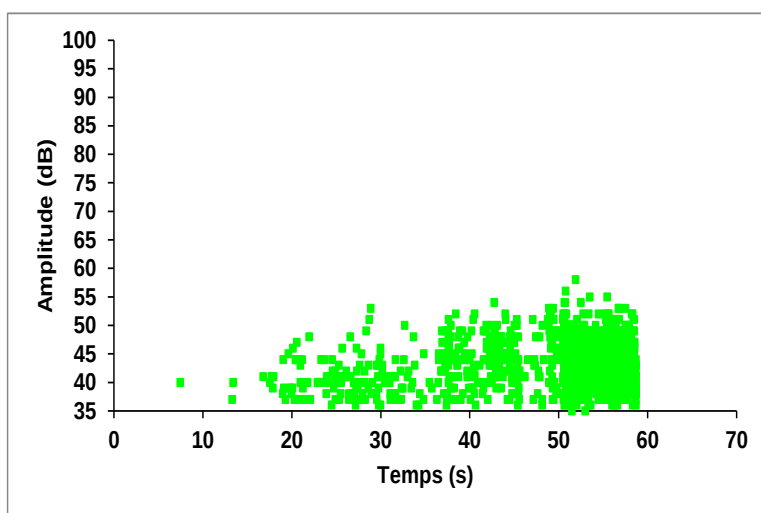
La classe verte commence à apparaître dès le début de l'essai. Elle contient 48,8% des signaux. La forme d'onde des signaux appartenant à cette classe est caractérisée par un temps de montée moyen, une durée moyenne, un faible nombre de coups, une faible amplitude ainsi qu'une faible énergie (Tableau 18) (figure 96a). L'activité acoustique de la classe verte s'intensifie à la fin de l'essai à partir de $t=50s$ (figure 95b).

La classe bleue contient 25,9% des signaux. Elle commence aussi dès le début de l'essai. La signature acoustique des signaux appartenant à cette classe est caractérisée par une forme d'onde de faible durée, un temps de montée court, une faible énergie, un faible nombre de coups et une faible amplitude (Tableau 18) (figure 96b). La fréquence d'apparition de cette classe devient plus importante à partir de $t=40s$, l'instant où des bruits audibles commencent à être émis. De plus, la classe bleue est bien visible aux moments des deux premières ruptures macroscopiques (figure 95a et 95c) (figure 92-Points C et D).

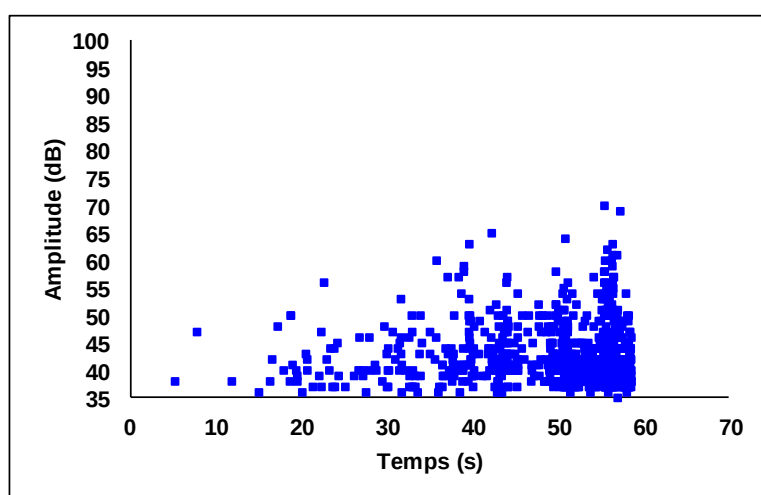
Quant à la classe rouge, elle commence à apparaître un peu plus tard que les deux autres classes. Elle est nettement plus visible à partir de $t=40s$, l'instant où des bruits audibles commencent à être émis et surtout aux instants des trois ruptures macroscopiques (figures 95a et d). La signature acoustique des signaux de cette classe est caractérisée par une forme d'onde de longue durée, un temps de montée important, une amplitude moyenne, un nombre de coups important et une forte énergie (Tableau 18) (figure 96c).



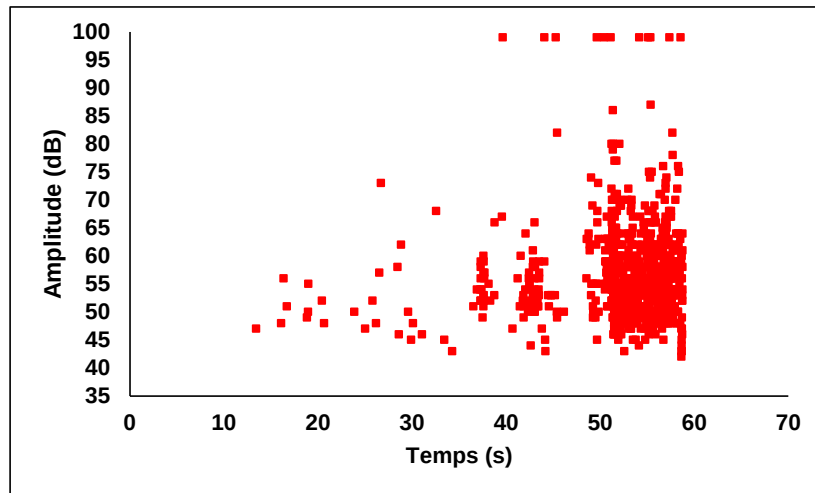
(a)



(b)



(c)

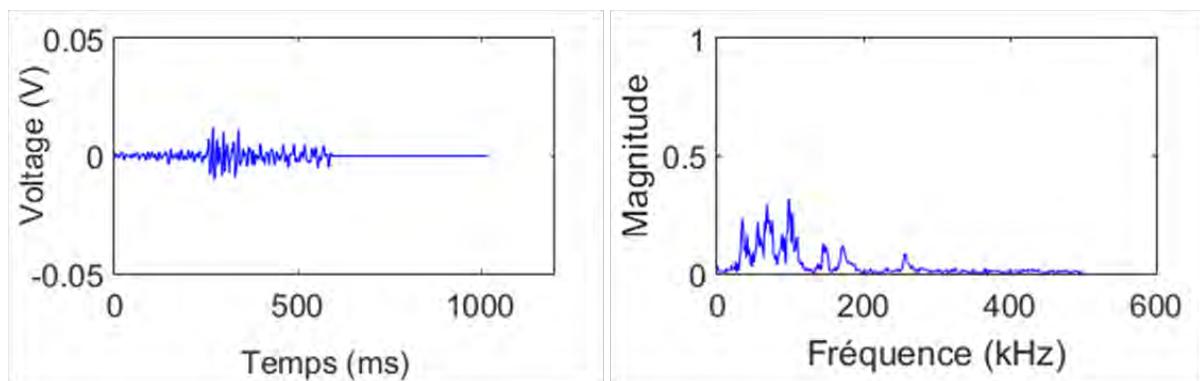


(d)

Figure 95 : Résultats de la classification (éprouvette TD2) (a) répartition temporelle des différentes classes de signaux (b) classe bleue (c) classe verte (d) classe rouge

Tableau 18 : Valeurs moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs acoustiques de chaque classe de signaux (éprouvette TD2)

Descripteurs	Classe verte	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	48,8	25,9	25,3
Temps de montée (μs)	86 (134)	41 (91)	287 (955)
Durée (μs)	354 (258)	169 (247)	1574 (4806)
Amplitude (dB)	43 (4)	43 (5)	56 (8)
Nombre de coups	14 (10)	11 (13)	78 (282)
Nombre de coups au pic	5 (5)	4 (5)	18 (73)
Energie absolue (aJ)	107 (126)	180 (1627)	$6,5 \cdot 10^6$ ($8 \cdot 10^7$)
Fréquence moyenne (kHz)	43 (13)	77 (22)	50 (11)
Fréquence initiale (kHz)	147 (283)	234 (393)	106 (99)
Fréquence de réverbération (kHz)	35 (18)	65 (62)	46 (10)
Pic fréquentiel (kHz)	78 (28)	91 (29)	70 (29)
Barycentre fréquentiel (kHz)	125 (11)	148 (14)	103 (14)



(a)

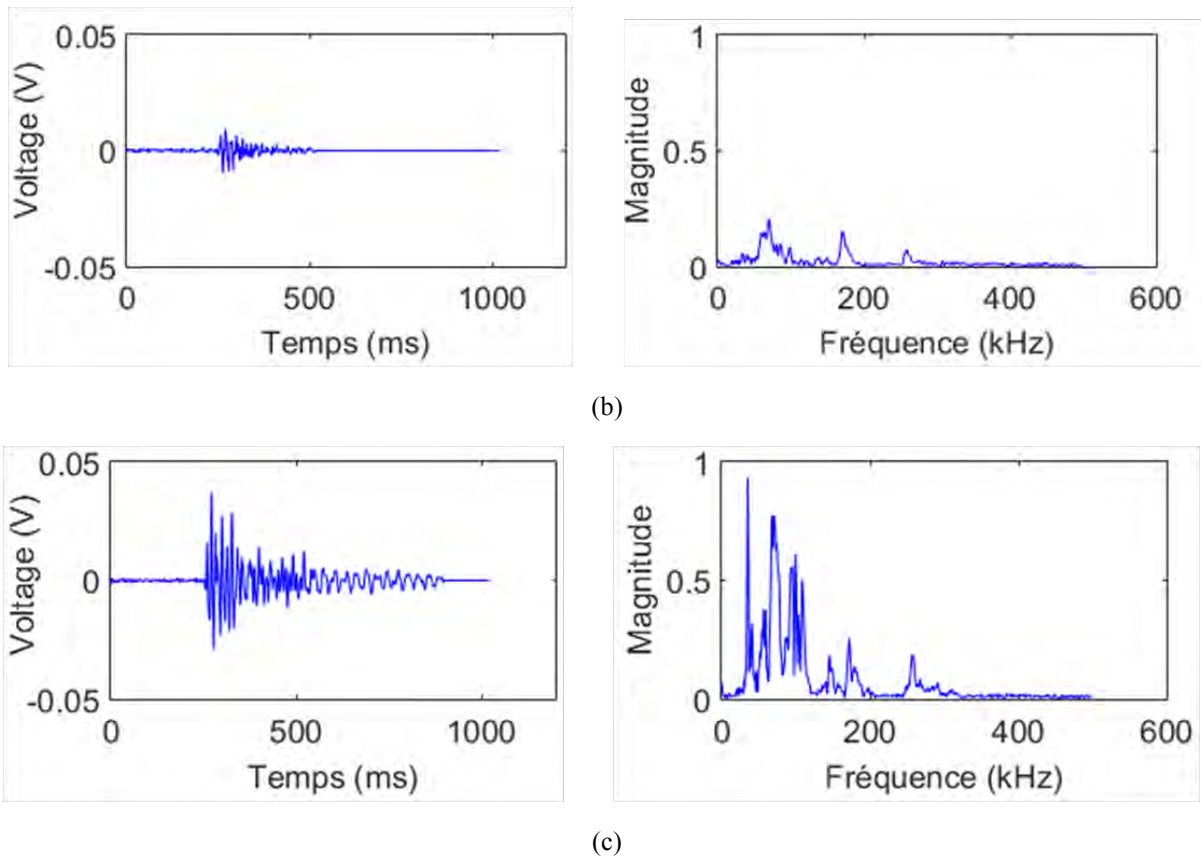


Figure 96 : Forme des signaux types d'EA et Transformée de Fourier associée aux différentes classes (éprouvette TD2) (a) classe verte, (b) classe bleue, (c) classe rouge

La présentation des résultats de classification en terme de pic fréquentiel met en évidence l'intérêt de l'utilisation simultanée des deux types de paramètres temporels et fréquentiels pour la classification des signaux. En effet, les classes de signaux dissociées appartiennent à plusieurs gammes de fréquences (figure 97). Donc, ce n'est pas suffisant d'utiliser uniquement les paramètres fréquentiels pour discriminer les différents mécanismes d'endommagement.

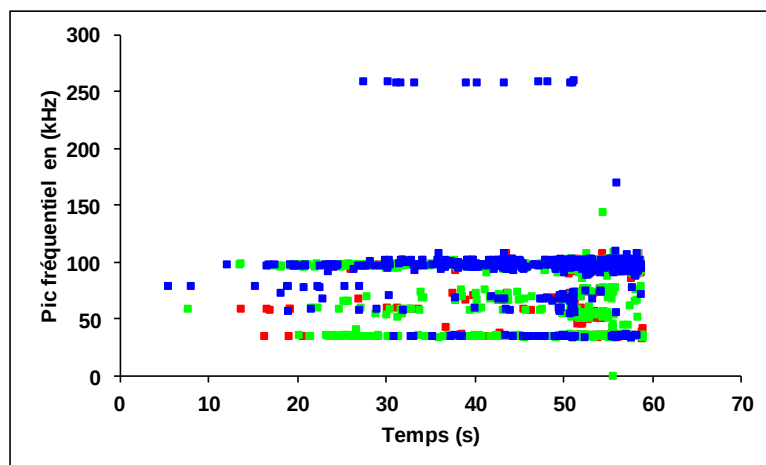


Figure 97 : Résultats de la classification en terme de pic fréquentiel (éprouvette TD2)

Après avoir présenté les résultats de la classification des signaux, on arrive à l'étape de labellisation. Pour pouvoir labelliser les trois classes de signaux distinguées, on a été obligé

de mettre en place des essais complémentaires sous forme d'essais arrêtés à certains stades de chargement. Ces essais sont suivis par EA et thermographie infrarouge. Un essai d'endommagement complet suivi à la fois par EA et par thermographie infrarouge a également été mis en place. Des observations tomographiques ont été aussi réalisées. Les paragraphes suivants détailleront tous ces essais ainsi que les résultats obtenus.

II.7- Essais Complémentaires

II.7.1- Essais arrêtés

Trois classes différentes de signaux ont été mises en évidence par l'analyse statistique multi-variables. Afin d'attribuer chaque classe à un mécanisme d'endommagement spécifique, des essais arrêtés suivis simultanément par EA et thermographie infrarouge ont été réalisés. La technique de thermographie infrarouge a été choisie car c'est clairement une technique complémentaire au suivi par EA. De plus, elle a fait ses preuves dans quelques exemples de détection de défauts et d'endommagement du matériau bois (Wyckhuyse et Maldague 2001, Meinschmidt 2005, Conde et al. 2012).

A- Conditions des essais arrêtés

Suite à l'analyse des courbes force-déplacement et de l'activité acoustique, trois stades d'arrêt ont été repérés (figure 98).

- Arrêt 1 : Dans la partie linéaire de la courbe (phase I)
- Arrêt 2 : Dans la première partie de la phase II (phase II-1)
- Arrêt 3 : A l'apparition d'un signal de forte amplitude et au moment où un bruit audible est émis (au début de phase II-2)

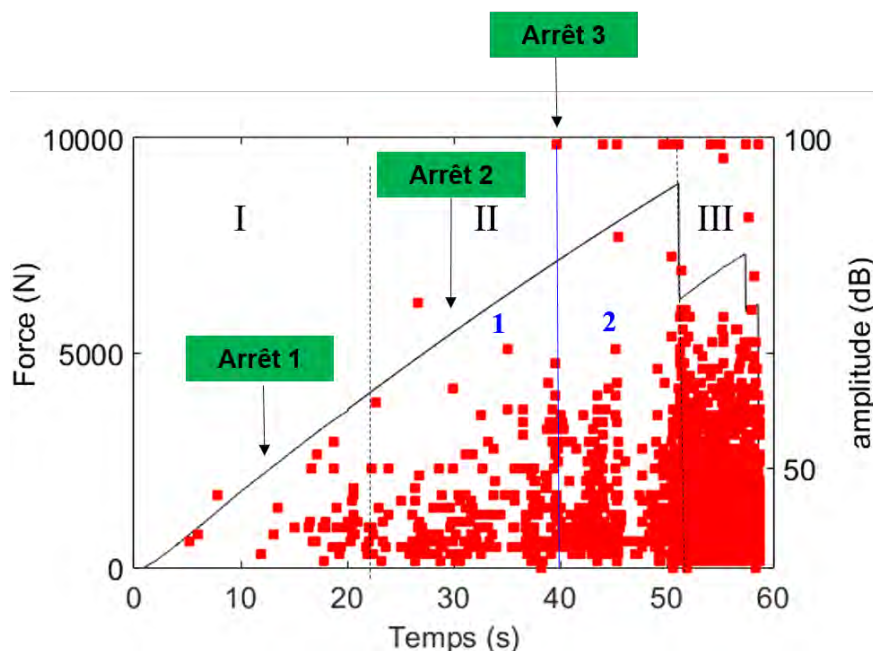


Figure 98 : Positionnement des essais arrêtés sur la courbe de l'évolution de l'endommagement d'une éprouvette en Douglas sollicitée en traction longitudinale

Trois éprouvettes sont utilisées pour chaque arrêt. Donc neuf éprouvettes ont été testées en total. L'essai est suivi à la fois par EA et par thermographie infrarouge. On se focalise sur la partie calibrée de l'éprouvette pour filmer la variation de la température par une caméra infrarouge thermique. Des observations tomographiques ont aussi été réalisées sur certaines éprouvettes. Les conditions d'essai sont identiques à celles utilisées pour les essais continus.

B- Résultats des essais arrêtés

Au niveau de l'arrêt 1 et de l'arrêt 2 aucune modification n'est observée sur les thermogrammes enregistrés pendant l'essai. En outre, lors des essais de la tomographie, la réalisation d'un scan global sur toute la partie calibrée de dimensions (90 mm (L) x 20 mm (R) x 4 mm (T)) n'a pas permis d'identifier d'endommagement non plus certainement à cause de la résolution de 22 μm qui ne permet pas d'identifier l'endommagement dans la microstructure du matériau à ce stade.

Pour l'arrêt 3, le thermogramme (figure 99a) extrait du film thermique à l'instant d'enregistrement du signal de forte amplitude (figure 99b), montre un échauffement identifiable au niveau des cernes du bois initial tandis que les cernes du bois final émettent une température moins importante surtout sur la moitié haute de la partie calibrée (figure 99a). Ce phénomène est observé dans l'étude de Zheng et al. (2005). Ils en ont conclu que l'endommagement du bois commence dans le bois initial.

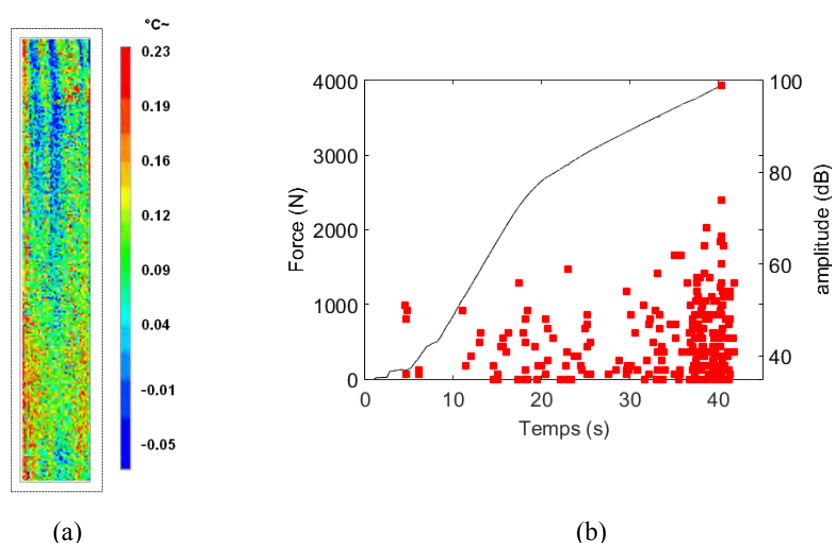


Figure 99 : Résultats du troisième arrêt (a) Thermogramme à $t=40$ s, (b) corrélation entre l'évolution de la force et la distribution en amplitude d'EA en fonction temps

Pour l'observation tomographique, on s'est servi des résultats de la localisation des sources d'EA par les deux capteurs R6 [1] et R6 [2] afin de réduire les dimensions de la zone d'observation et d'affiner la résolution pour une meilleure observation. Les résultats montrent donc que le signal de forte amplitude enregistré à l'arrêt 3 est localisé au milieu de la zone calibrée (figure 100). Donc, en focalisant sur cette zone, un scan tomographique local a été réalisé. Le ciblage de la zone d'observation nous a permis d'obtenir des tomographies avec une résolution de l'ordre de 14 μm . Cette résolution nous a permis de détecter une microfissure longitudinale (figure 101).

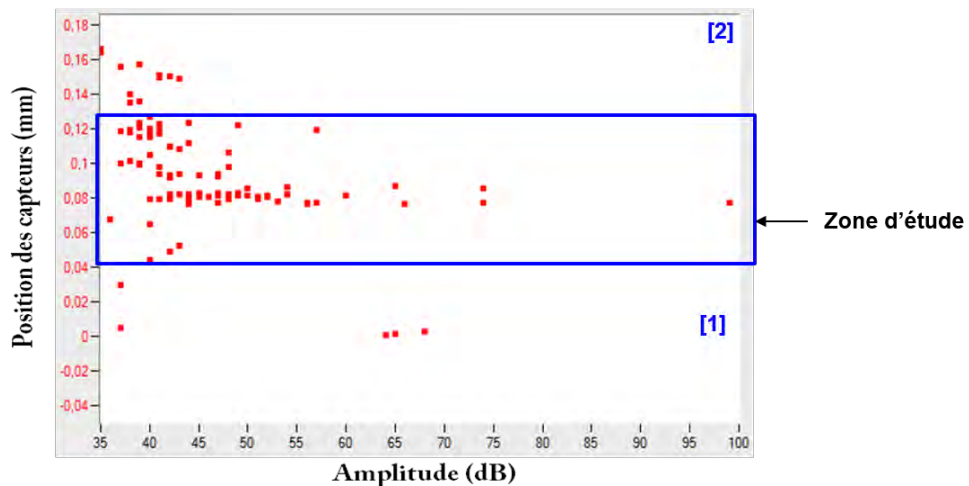


Figure 100 : Localisation des sources d'EA pendant l'arrêt 3

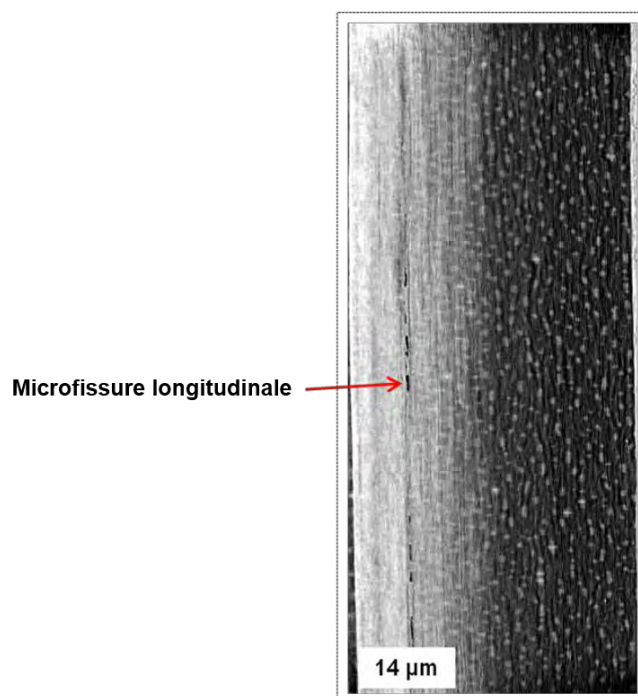


Figure 101 : Tomographie X montrant une microfissure longitudinale

Les essais arrêtés n'ont fournis qu'un nombre limité d'informations. Les mesures par thermographie infrarouge n'ont pas pu donner d'informations complémentaires à l'échelle des micro/méso endommagements. Quant à la tomographie, en focalisant sur une zone plus restreinte, la présence d'une microfissure a pu être détectée. Dans la suite de notre travail, nous avons néanmoins couplé les techniques de TI et d'EA pour suivre un essai complet jusqu'à rupture.

II.7.2- Suivi par EA et par TI d'un essai entier de traction

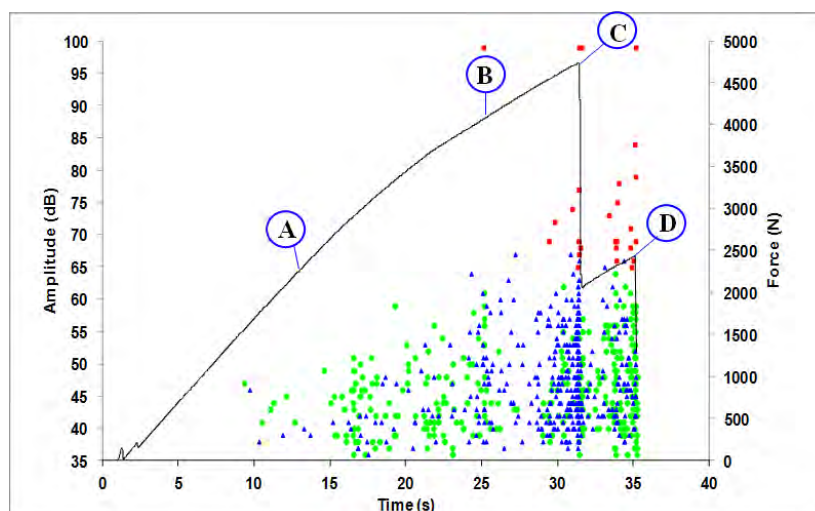
Toujours dans le but de labelliser les classes de signaux identifiées auparavant, on a réalisé cette fois-ci un essai de traction en continu jusqu'à rupture. L'essai est suivi entièrement par émission acoustique et thermographie infrarouge en parallèle.

Les signaux recueillis ont été classés par la même méthode exposée auparavant. Les résultats de la classification en terme d'amplitude sont montrés sur la figure 102. Quatre points marquants (A, B, C et D) sont représentés sur la courbe. Ces points sont associés à des

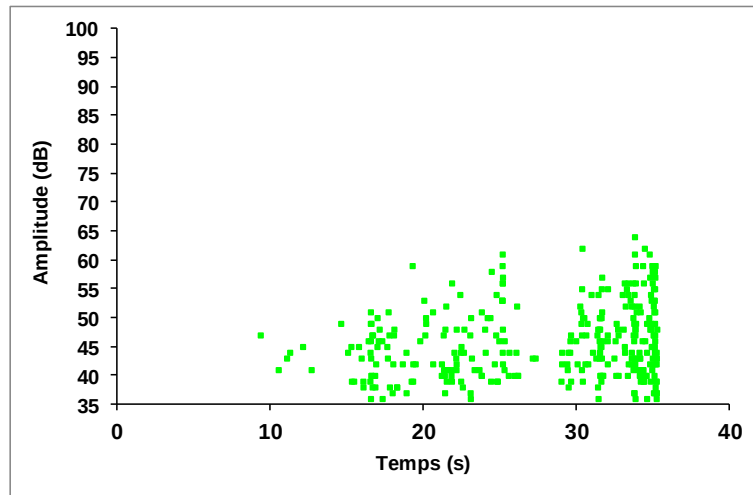
photos de la surface de l'éprouvette extraites du film enregistré pendant l'essai et à des thermogrammes correspondants extraits du film thermique (figure 103).

Au point A aucun endommagement n'est observé sur la face de l'éprouvette. De plus, le thermogramme correspondant n'affiche aucun changement au niveau de la température (figure 103 Point A). Par contre au point B, bien qu'aucun endommagement visuel ne soit observé sur la surface de l'échantillon, le thermogramme montre un échauffement important au niveau des cernes du BI par rapport à ceux du BF (Figure 103b-Point B). Ceci indique la présence d'un comportement différent entre les cernes du BI et du BF qui pourrait indiquer la présence de microfissurations longitudinales soit au niveau de l'interface BI/BF soit dans le BI. Cette observation confirme donc que la technique d'EA est capable de détecter des endommagements à l'échelle du cerne de croissance (échelle mesoscopique). Ensuite, le point C représente le premier pic de charge associé à la première rupture macroscopique observée sur la surface de l'échantillon (Figure 103 Point C). Les modes d'endommagement observés au point C sont : une propagation de la fissure au niveau de l'interface BI/BF de type RL, une propagation de fissure inclinée traversant à la fois le bois initial et le bois final et la rupture des fibres. Quant à la deuxième rupture macroscopique qui se produit au point D, les modes d'endommagement observés sont: la rupture des fibres et une propagation longitudinale de fissure au niveau de l'interface BI/BF de type RL (figure 103a-Point D).

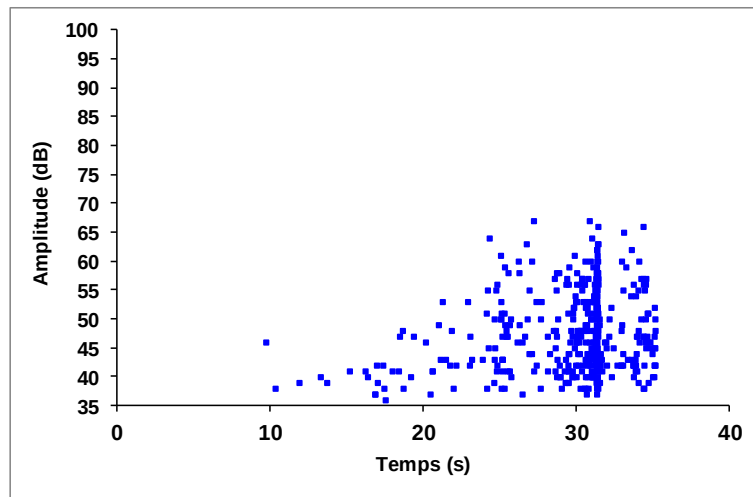
En terme de réponse acoustique, au point D, on retrouve principalement deux classes de signaux : la classe verte et la classe rouge. Donc ces deux classes pourraient être associées aux deux mécanismes identifiés au point D qui sont la rupture des fibres la fissure longitudinale au niveau de l'interface BI/BF. Or les signaux de la classe rouge sont beaucoup plus énergétiques que ceux de la classe verte donc ils sont attribués à la rupture des fibres ce qui semble cohérent avec nombreuses études de la littérature. Pour la classe verte, comme elle commence à l'échelle micro/méso, elle pourrait être attribuée aux microfissures longitudinales. De plus, la présence de microfissuration longitudinale a été confirmée par l'observation tomographique à l'arrêt 3 qui coïncide avec le point B (figure 102a-Point B). A ce stade, on peut très bien distinguer des signaux de la classe verte et de la classe bleue. En outre, la classe bleue est nettement visible au premier endommagement macroscopique qui coïncide avec le point C (figure 102a- Point C). Cette classe pourrait être attribuée aux autres types de microfissures telles que les microfissures transversales dans les parois des fibres.



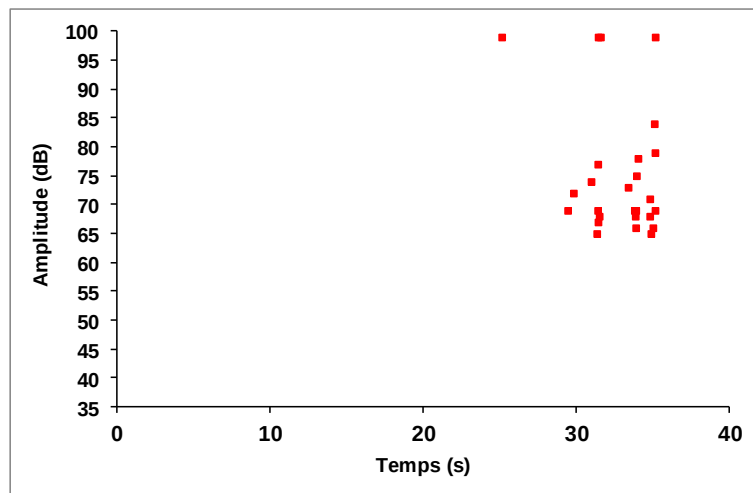
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 102 : Résultats de la classification (a) répartition temporelle des différentes classes de signaux (b) classe bleue (c) classe verte (d) classe rouge

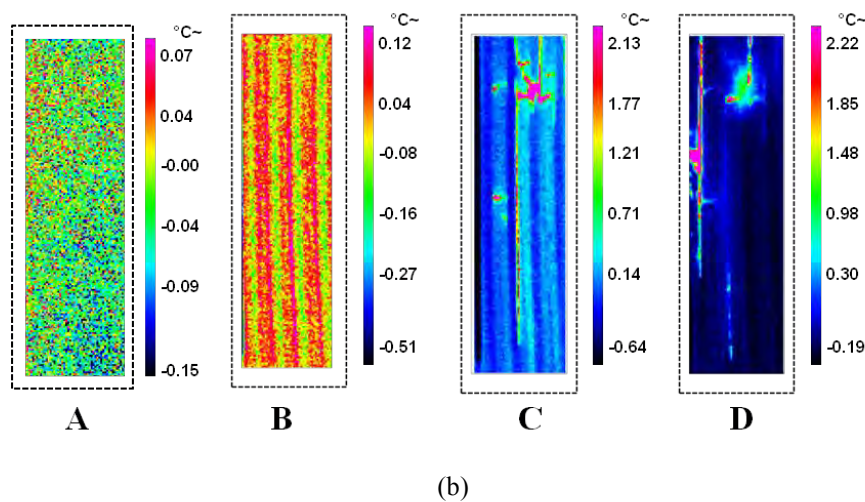
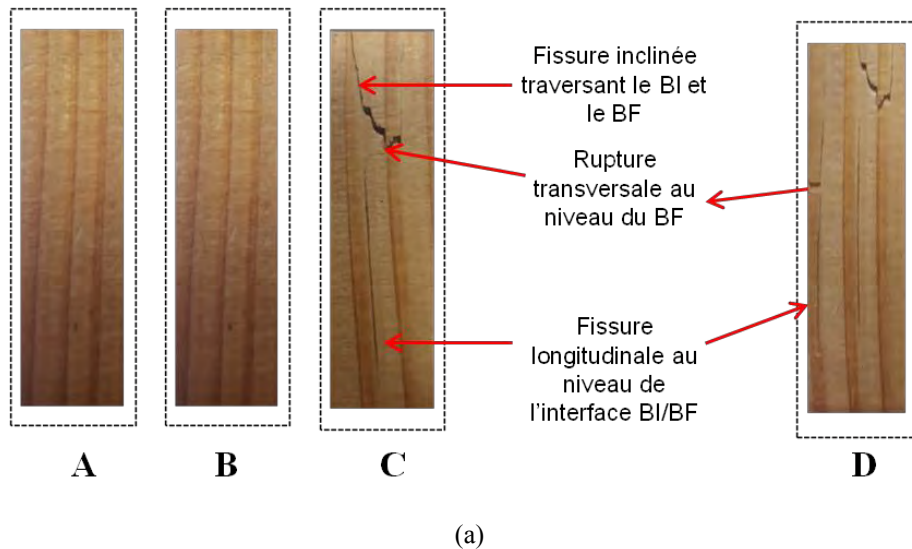


Figure 103 : (a) Photos de la surface de l'échantillon extraites du film à des points particuliers (b) Thermogrammes correspondants

Les valeurs moyennes des descripteurs qui caractérisent chaque classe identifiée dans l'essai de traction suivi par EA et TI simultanément sont résumées dans le Tableau 19. On peut constater que les valeurs moyennes de ces descripteurs sont proches de celles des descripteurs des trois classes identifiées dans la partie II.6 de ce chapitre (Tableau 18). Donc, pour le bois de Douglas sollicité en traction parallèle au fil, on peut suggérer la labellisation suivante pour les trois classes de signaux distinguées:

- Classe verte : microfissuration longitudinale
- Classe bleue : microfissuration transversale
- Classe rouge : rupture de fibres

Tableau 19 : Valeurs moyennes et écarts-types dans les parenthèses des descripteurs acoustiques de chaque classe de signaux

Descripteurs	Classe verte	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	47,7	43,9	8,4
Temps de montée (μ s)	78 (178)	36 (59)	442 (2024)
Durée (μ s)	371 (371)	226 (219)	3677 (10564)
Amplitude (dB)	44 (4)	46 (6)	65 (12)
Nombre de coups	14 (14)	16 (14)	152 (426)
Nombre de coups au pic	4 (6)	3 (3)	32 (160)
Energie absolue (aJ)	172 (337)	241 (482)	$5 \cdot 10^7$ ($2 \cdot 10^8$)
Fréquence moyenne (kHz)	40 (10)	75 (20)	55 (12)
Fréquence initiale (kHz)	152 (301)	226 (384)	237 (726)
Fréquence de réverbération (kHz)	33 (27)	66 (48)	50 (12)
Pic fréquentiel (kHz)	50 (26)	92 (24)	51 (28)
Barycentre fréquentiel (kHz)	122 (16)	149 (15)	128 (17)

II.9- Conclusion

Les travaux exposés dans cette partie comprennent l'étude du comportement en traction longitudinale du Douglas pendant des essais arrêtés et continus, des observations visuelles de la surface des éprouvettes au cours des essais ainsi que sur les faciès de rupture post-mortem, des observations tomographiques ainsi que des informations fournies par la thermographie infrarouge et enfin une analyse des signaux acoustiques recueillis.

L'analyse et le croisement de toutes les informations obtenues nous permettent tout d'abord de proposer une labellisation des trois classes de signaux identifiées. Ensuite nous pouvons conclure sur le scénario qui semble le plus probable pour décrire l'endommagement et la ruine du bois de Douglas sollicité en traction parallèle au fil.

Concernant l'activité acoustique enregistrée, elle peut être regroupée en trois classes :

- Classe verte qui pourrait être attribuée à la microfissuration longitudinale
- Classe bleue dont les signaux proviennent de la microfissuration transversale
- Classe rouge dont les signaux sont émis par la rupture des fibres

En ce qui concerne le scénario d'endommagement, la réponse acoustique des éprouvettes en Douglas peut être divisée en 3 phases :

La phase I représente le comportement linéaire de l'éprouvette où peu d'activité acoustique est observée. Même si dans certaines éprouvettes quelques salves acoustiques de la classe rouge (rupture de fibres) ont été décelées, les signaux de la classe bleue et de la classe verte sont majoritaires. En effet, sollicitées en traction dans le sens du fil, les trachéides dans le BI et dans le BF s'allongent de la même façon. Cela induit une contrainte de cisaillement longitudinale non seulement à l'interface BI/BF, mais aussi à l'interface fibre/rayon dans le BI et dans le BF à cause de la rigidité différente de deux matières qui constituent ces interfaces. Cette contrainte de cisaillement est d'autant plus importante vu l'important contraste au niveau des densités et des rigidités entre les deux types de bois chez le Douglas. Bien que le niveau de charge soit faible pendant cette phase, des défauts structuraux ponctuels peuvent provoquer une contrainte de cisaillement localement élevée à cause de la concentration de contraintes. Cette concentration de contraintes peut être critique et initie quelques microfissures longitudinales dans les plans (LT) et (LR) (classe verte). De plus, dans les rayons radiaux constitués par des cellules de parenchymes, la résistance en tension

transversale est très faible. Même si la contrainte en tension transversale est faible à ce stade, le rapport de résistance R pourrait être élevé. Par conséquent, les microfissurations transversales peuvent aussi s'amorcer dans le plan (RT) (classe bleue). Puisque la densité de ces microfissures est faible pendant cette phase, le changement de comportement global de l'éprouvette n'est rarement observé sur la courbe force-déplacement.

La phase II traduit un comportement non-linéaire de l'éprouvette jusqu'à une chute de charge évidente, où l'activité acoustique augmente de façon significative. Cette phase peut elle aussi être séparée en deux parties. Ceci est principalement lié à l'activité acoustique de la classe rouge.

Dans la partie II-1, l'activité acoustique de la classe rouge est relativement faible et les signaux de forte amplitude sont absents. Par contre, les émissions de la classe bleue et de la classe verte augmentent de manière progressive et régulière. On peut en déduire qu'aux interfaces BI/BF et fibre/rayon, les microfissures transversales et longitudinales continuent à naître et croître. La coalescence et la propagation de ces dernières sollicitées en mode II (figure 87a) forment des fissures macroscopiques longitudinales dans les plans (LT) et (LR). Par contre, la coalescence des microfissures transversales est quasi-absente puisque peu de rupture de fibres (classe rouge) est observé à la phase II-1.

Dans la partie II-2, en plus des mécanismes d'endommagement présentés dans la partie II-1, les émissions de la classe rouge deviennent beaucoup plus nombreuses et énergétiques. Ceci caractérise la coalescence et la propagation de microfissures transversales accompagnées de la rupture des fibres. Celle-ci trouve son origine surtout dans le BI, où le rapport de résistance R est plus élevé que celui dans le BF. Effectivement, la propagation de la fissure transversale est plutôt de type LT et de type LR (figure 87b page 88) en mode I (figure 87a page 88). Quand un cerne du BI au bord de l'éprouvette est traversé par cette fissure, la charge n'est plus centrée par rapport à l'éprouvette. Dans ce cas, sous l'effet du couplage traction/flexion, à la pointe de la fissure qui se trouve à l'interface BI/BF une concentration de contrainte de pelage (mode I) et de cisaillement (mode II) (figure 87a page 88) va apparaître. Par conséquent, la fissure bifurque du plan (RT) au plan (LT°), une propagation longitudinale de la fissure de type RL (figure 87b page 88) se déclenche de façon instable en mode mixte I+II. Ceci entraîne une chute brutale de charge, marquant la fin de la phase II-2. Ici, la rupture de quelques fibres dans le BF est décelée.

La phase III caractérise une phase de rupture accélérée. Suite de la partie 2 de la phase II, la fissuration de type RL est ralentie en attendant qu'une fissure transversale traverse le deuxième cerne du BI. Ces mécanismes permettent à la charge d'augmenter jusqu'à un autre pic de charge, où un deuxième paquet de fibres du BI casse, suivi par une fissuration longitudinale. Ceci par conséquent induit de nouveau une chute de charge. Ce processus se répète jusqu'à la rupture finale.

Enfin, les observations post mortem des éprouvettes montrent des lignes de rupture horizontales dans les bandes du BI. Ceci représente une rupture locale par traction (mode D de la figure 83 page 83). De plus, les fissures provenant de la propagation longitudinale de type RL sont également très visibles sur toutes les éprouvettes.

III- Endommagement du sapin pectiné sous sollicitation de traction parallèle au fil

III.1- Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à l'endommagement des éprouvettes de sapin pectiné sous sollicitation de traction longitudinale. La même démarche que celle suivie pour le bois de Douglas est utilisée pour l'étude sur le sapin pectiné.

III.2- Comportement en traction et propriétés mécaniques associées

La figure 104 présente les courbes force-déplacement ($F-\delta$) de cinq éprouvettes de sapin pectiné testées en traction parallèle au fil. On s'aperçoit que si la rigidité dans la partie linéaire semble très proche d'une courbe à l'autre, ce n'est pas le cas pour la charge maximale. En effet, la charge maximale mesurée sur l'éprouvette TS4 est quasiment le double de celle mesurée sur l'éprouvette TS5. Au niveau du déplacement à la rupture, il diffère également d'une éprouvette à l'autre. En ce qui concerne l'allure de ces courbes, elle ne présente que rarement une rupture échelonnée. Au contraire des courbes ($F-\delta$) pour le Douglas, il n'y a qu'une éprouvette (TS2) dont la courbe ($F-\delta$) montre trois pics avant sa rupture finale. Les autres éprouvettes ont une allure similaire. Cette allure peut être décrite comme suit : une partie linéaire au début du chargement. Ensuite le comportement devient légèrement non-linéaire jusqu'à la rupture finale.

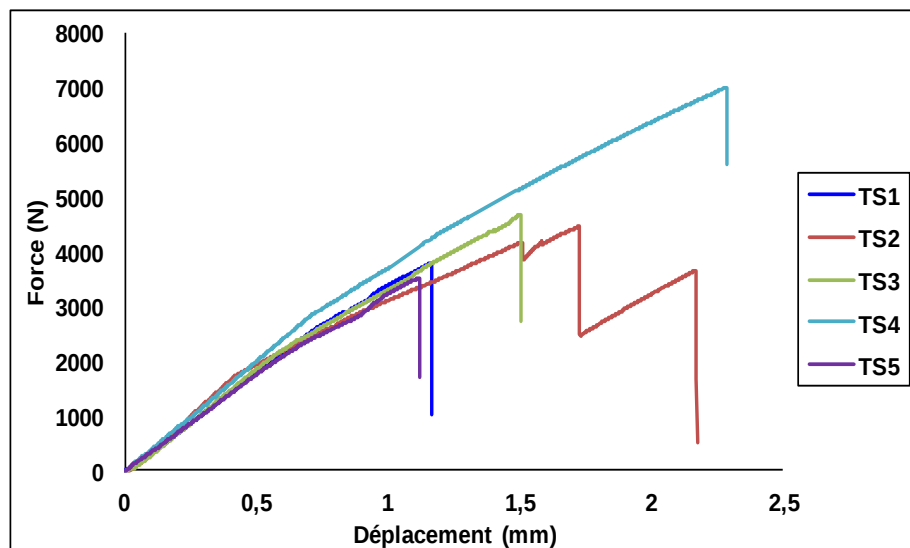


Figure 104 : Courbes force-déplacement ($F-\delta$) des cinq éprouvettes en sapin pectiné sollicitées en traction longitudinale

A partir de ces courbes expérimentales, la contrainte maximale en traction axiale peut être mesurée sur chaque éprouvette. Le module d'Young et le coefficient de Poisson sont mesurés à l'aide des jauges de déformation. Leurs valeurs sont regroupées dans le tableau 20 et comparées avec les résultats de la littérature. La dispersion des résultats est de l'ordre de 2% pour le module d'élasticité et de 5% pour le coefficient de Poisson, elle peut être considérée comme faible. En revanche, pour la contrainte maximale, la dispersion des résultats s'élève à $\pm 13\%$ si l'on ne tient pas compte de la valeur mesurée sur l'éprouvette TS4.

On peut constater aussi que les résultats du module d'élasticité et du coefficient de Poisson sont en bonne concordance avec ceux de la littérature. En revanche, la valeur moyenne de la contrainte maximale (en écartant la valeur de l'éprouvette TS4) est inférieure par rapport aux

résultats de la littérature. On peut constater que la contrainte maximale de l'éprouvette TS4 est proche des résultats de la littérature (Tableau 20).

Tableau 20 : Propriétés mécaniques mesurées sur le lot d'éprouvettes de sapin pectiné sollicitées en traction parallèle au fil

Eprouvettes	Modules d'Young (GPa)	Module d'Young (GPa) (Littérature)	Contrainte maximale (MPa)	Contraintes maximales (MPa) (Littérature)	Coefficients de Poisson	Coefficient de Poisson (Littérature)
TS1	11,3	10,0-14,5**	47,3	80,0-93,0**	0,44	0,45***
TS2	11,5		55,6		0,40	
TS3	11,2		58,40		0,42	
TS4	11,5		87,5*		0,45	
TS5	11,0		43,88		0,41	
Moyenne	11,3		51,3		0,42	
Coefficient de variation	± 2%		± 13%		± 5%	

* Cette valeur n'est pas considérée dans le calcul de la moyenne

** Sell et Kropf (1990). Propriétés et caractéristiques des essences de bois

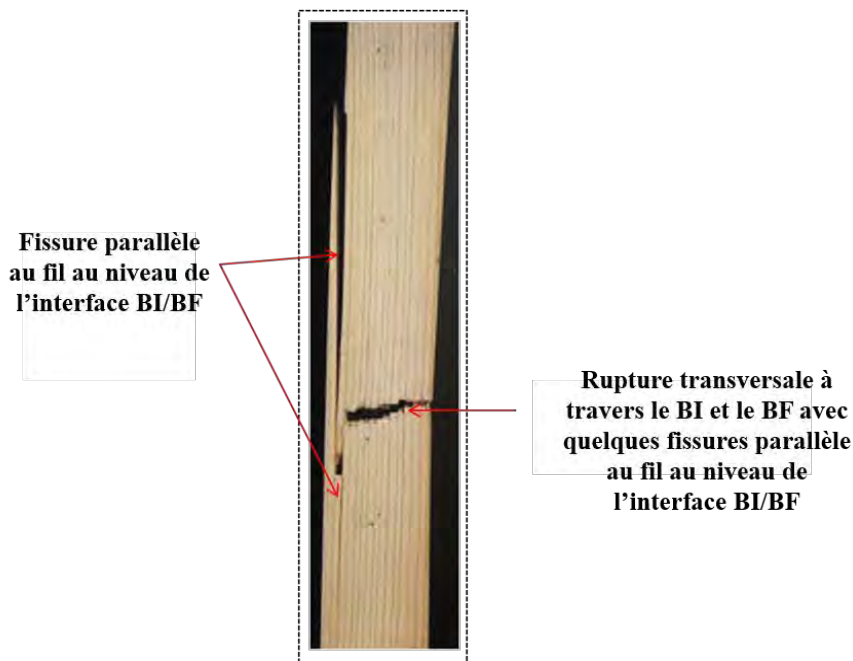
*** Guitard (1987). Mécanique du matériau bois et composites

III.3- Observation des faciès de rupture

Nous avons effectué une observation visuelle des éprouvettes de sapin pectiné rompues afin de comprendre les mécanismes initiés pendant l'essai de traction. Les éprouvettes TS2, TS3 et TS4 (figure 105a) montrent un mode d'endommagement similaire. En effet, une ligne de rupture quasi-perpendiculaire à la charge est observée, qui traverse à la fois le BI et le BF couvrant la majorité de la section de l'éprouvette. Ce mode de rupture est caractérisé par une rupture par traction (mode D de la figure 83 page 83). La forme est légèrement en escalier témoignant d'une fissuration de type LR traversant le BI d'un cerne de croissance, suivie par une faible fissuration longitudinale à l'interface BI/BF. En outre, sur un bord de chaque éprouvette une longue fissure longitudinale issue de la propagation de type RL est aussi visible soit au niveau de l'interface BI/BF soit dans le BI. L'ouverture de cette fissure est clairement visible. Les éprouvettes TS1 et TS5, dont les charges maximales sont les plus faibles, montrent un mode d'endommagement différent. La fissure se propage en zig-zag et quelques fissures parallèles au fil au niveau de l'interface BI/BF peuvent être observées. Le mode de rupture de ces deux éprouvettes correspond bien au mode de fendage (mode A de la figure 83 page 83). De plus, sur le faciès de rupture de l'éprouvette TS5, la propagation des fissures s'oriente dans la direction inclinée par rapport à la direction longitudinale non seulement dans le plan (LR) mais également dans le plan (LT). La figure 105b montre le faciès de rupture de l'éprouvette TS4 sélectionnée pour la suite de l'analyse.



(a)



(b)

Figure 105 : (a) Faciès de rupture du lot d'éprouvettes de sapin pectiné (b) faciès de rupture de l'éprouvette représentative (TS4)

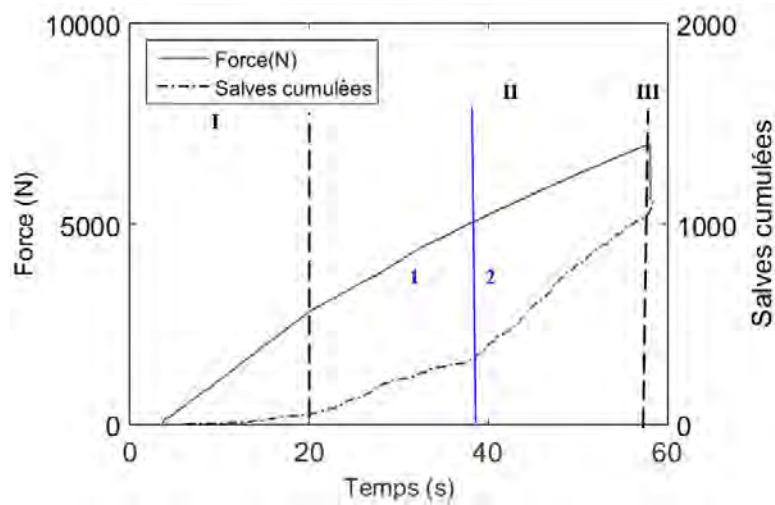
III.4- Analyse de l'activité acoustique

La courbe de l'évolution de la force en fonction du temps couplée à l'évolution de l'activité acoustique est présentée sur la figure 106. L'activité acoustique est représentée par le nombre de salves cumulées, l'amplitude et l'énergie cumulée. Trois phases peuvent être identifiées :

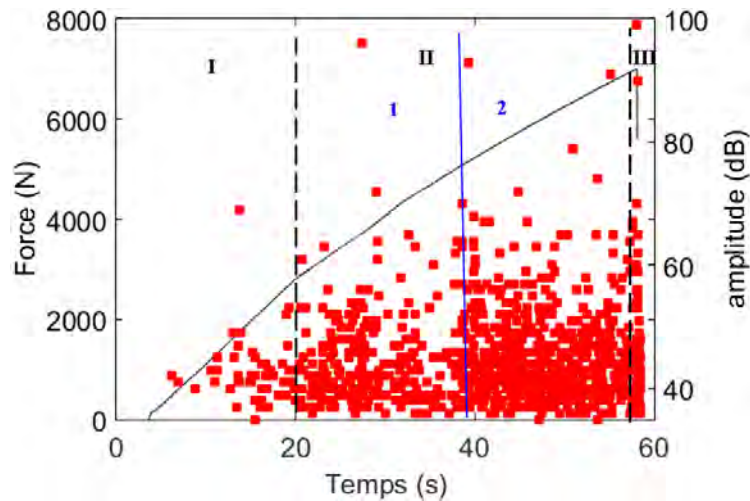
- **Phase I** : Cette phase correspond à la partie linéaire de la courbe (F- δ). Elle est caractérisée par une faible activité acoustique (figure 106a). L'amplitude varie entre 35 dB et 55 dB (figure 106b) et l'énergie cumulée reste très faible durant toute la phase (figure 106c).
- **Phase II** : Cette phase débute lorsque la courbe (F- δ) commence à devenir non linéaire, et termine au point où la charge devient maximale. En terme de réponse

acoustique, cette phase peut être dévisée en deux parties : partie II-1 où le nombre de salves cumulées commence à augmenter progressivement (figure 106a) tandis que l'énergie cumulée reste faible au début ensuite elle commence à augmenter à partir de $t=27$ s (figure 106c). A cet instant un évènement de haute amplitude (96 dB) est enregistré (figure 106b). La deuxième partie (partie II-2) débute à $t=39$ s où la vitesse de l'évolution du nombre de salves cumulées connaît une augmentation nette (figure 106a). Une augmentation au niveau de l'énergie cumulée est également observée (figure 106c). L'amplitude dans la partie II-2 varie entre 35 dB et 90 dB (figure 106b).

- **Phase III** : C'est la phase de rupture finale. La phase III est très courte pour le sapin pectiné, car la rupture finale est instantanée. Elle est caractérisée par une augmentation très importante du nombre de salves cumulées (figure 106a) et de l'énergie cumulée (figure 106c). Un spectre d'amplitude variant de 35 dB à 99 dB est enregistré (figure 106b).



(a)



(b)

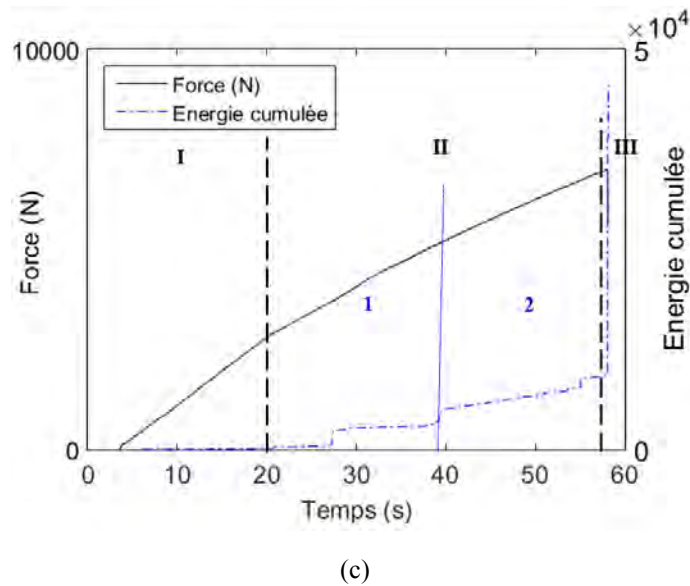


Figure 106 : Evolution de la charge et de l'activité acoustique en fonction du temps (éprouvette TS4) (a) salves cumulées (b) répartition des amplitudes (c) énergie cumulée

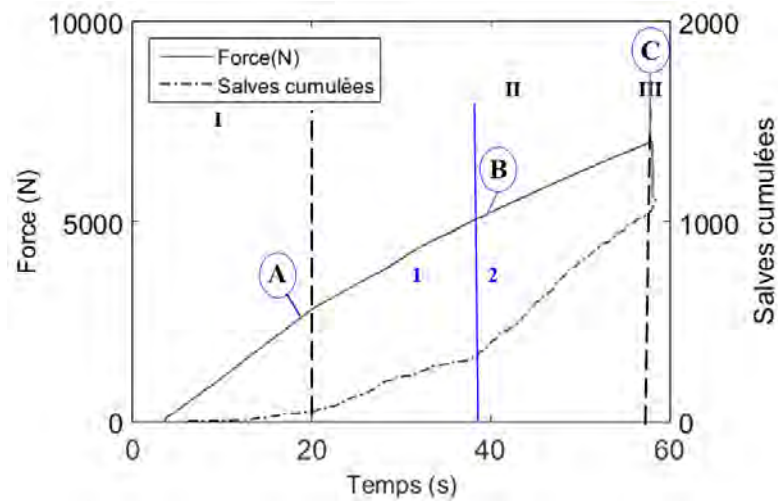
III.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique

L'essai de traction sur l'éprouvette TS4 a été filmé. Trois images à différents points marquant des trois phases ont été extraites du film (figure 107).

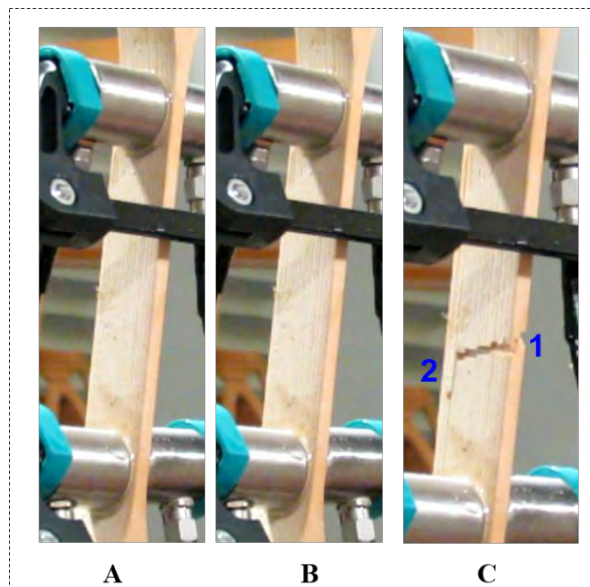
En effet, pendant la phase I, aucun endommagement visible n'est observé sur la surface de l'éprouvette (figure 107b-Point A). Par contre, des signaux d'EA ont été enregistrés ce qui indique l'apparition probable d'un endommagement à faible niveau de charge.

Durant la phase II, la surface de l'éprouvette filmée ne montre aucune fissure visible (figure 107b- Point B). Or, les événements de haute amplitude enregistrés dans cette phase correspondent à des bruits audibles traduisant ainsi la présence d'endommagement. Ces informations semblent être confirmées par les études de Futo (1969) et Sippola et Fruhmann (2002). A un niveau de chargement comparable à la phase II de notre étude, ces chercheurs ont observé à l'aide des outils d'observation microscopique des microfissures transversales traversant le bois initial et des microfissures longitudinales au niveau de l'interface BI/BF ou dans le bois initial.

La troisième phase coïncide avec la rupture finale de l'éprouvette (figure 107-Point C). Sur notre éprouvette, la rupture finale est apparue d'une façon instantanée à $t=58s$. La rupture commence au bord de l'éprouvette dans l'épaisseur (figure 107b- Point C-1) accompagnée par une propagation transversale de type LR à travers le BI et le BF. A la fin de cette propagation transversale, l'effet du couplage traction/flexion favorise le changement de chemin de la propagation de la fissure. Elle se propage ensuite suivant la direction longitudinale au niveau de l'interface BI/BF (Point C-2 figure 107b). Cette propagation longitudinale en mode mixte I+II est bien de type RL. L'ouverture de la fissure longitudinale vue sur le faciès de rupture témoigne de la participation du mode I dans la propagation.



(a)



(b)

Figure 107 : Différents stades d'endommagement de l'éprouvette (éprouvette TS4) (a) Courbe de l'évolution de la charge et de l'activité acoustique en fonction du temps (b) Photos de la surface de l'échantillon extraites du film à des points particuliers

III.6- Classement des données acoustiques

Notre analyse est basée sur l'activité acoustique enregistrée par le capteur qui a recueilli le maximum de signaux. Dans ce cadre les signaux enregistrés par le capteur R6(2) sont analysés (figure 108).

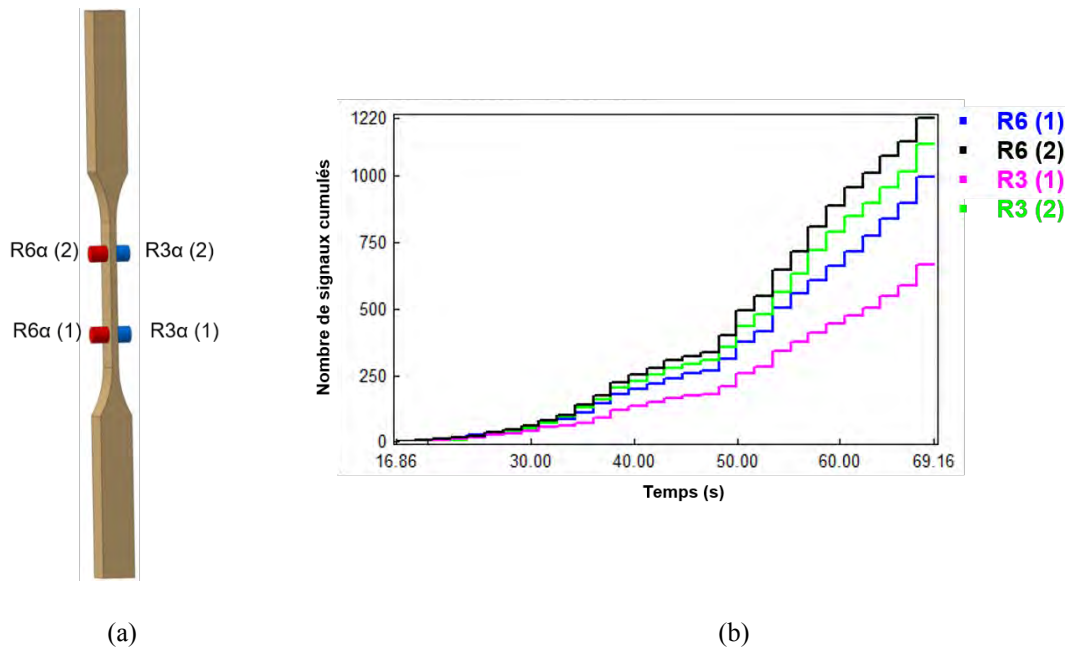


Figure 108 : (a) Positions des capteurs (b) Nombre de signaux enregistrés par chaque capteur (éprouvette TS4)

A- Optimisation du nombre de classes

La figure 109 montre l'évolution des coefficients statistiques de Davies et Bouldin (D&B) et Tou en fonction du nombre de classes. Généralement, le nombre de classes est optimal lorsque le coefficient D&B est minimisé et le coefficient Tou est maximisé (Huguet 2002, Godin et al. 2011). Comme pour le cas du bois de Douglas, le nombre de classes optimal dans cette étude est 3 (figure 109). Ce résultat indique donc que trois principaux mécanismes d'endommagement sont mis en jeu lors de l'endommagement des éprouvettes de sapin pectiné sollicitées en traction parallèle au fil.

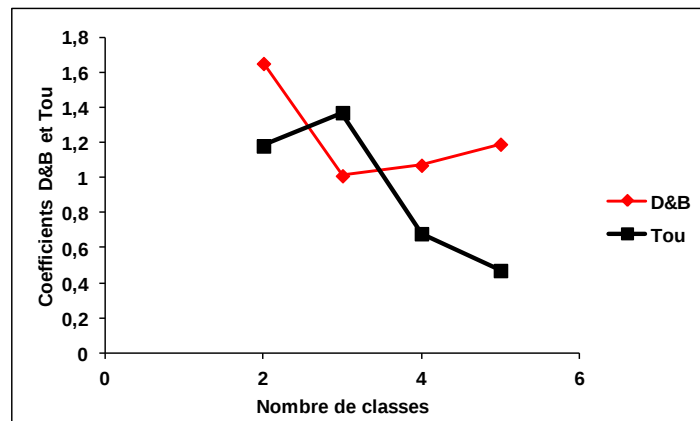


Figure 109 : Coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes (éprouvette TS4)

B- Résultats de la classification des signaux par la méthode des k-moyennes

Les résultats de la classification sont présentés au regard de l'amplitude des salves acoustiques (figure 110). La valeur moyenne de chacun des descripteurs discriminants ainsi que l'écart type de ces descripteurs pour les trois groupes dissociés sont résumés dans le tableau 21.

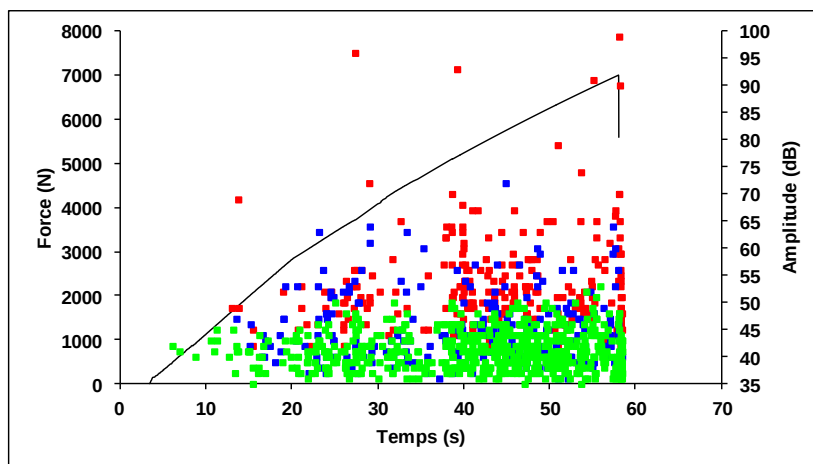
La classe verte contient 45,2 % des signaux. Elle commence dès le début de l'essai. La signature acoustique des signaux appartenant à cette classe est caractérisée par une forme

d'onde de faible durée, un temps de montée court, une faible énergie, un faible nombre de coups et une faible amplitude (figure 111a) (Tableau 21). L'activité acoustique de la classe verte s'intensifie à partir de $t=39s$ (figure 110b).

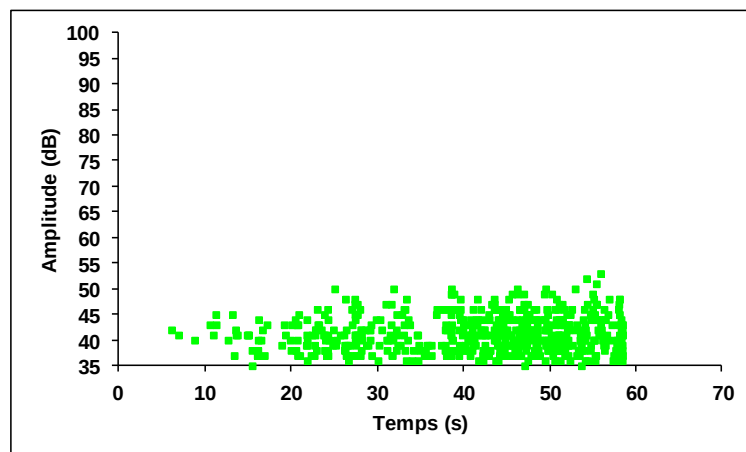
La classe bleue contient 22,9 % des signaux et commence à apparaître un peu plus tard que la classe verte. La forme d'onde des signaux appartenant à cette classe (figure 111b) se différencie de celle des signaux appartenant à la classe verte simplement au niveau de l'énergie et du pic fréquentiel (Tableau 21). En effet, les signaux de la classe bleue sont cinq fois plus énergétiques que les signaux de la classe verte.

La classe rouge contient 22,8% des signaux. Elle commence à apparaître simultanément avec la classe bleue. La signature acoustique des signaux de cette classe est caractérisée par une forme d'onde de longue durée, un temps de montée important, une amplitude moyenne, un nombre de coups important et une forte énergie (figure 111c).

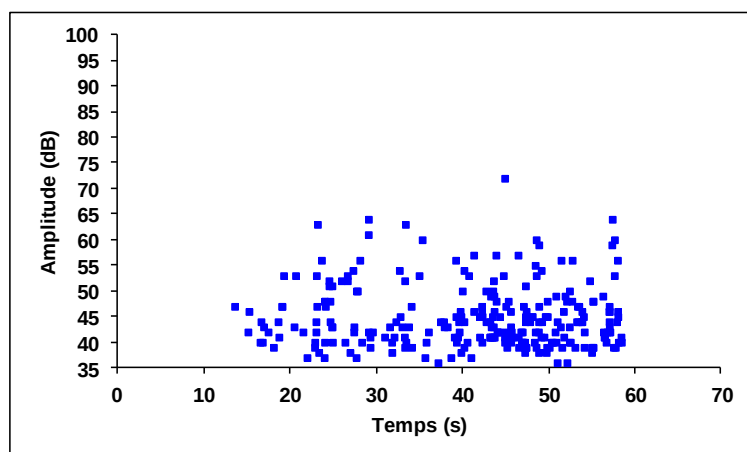
Les signaux de la classe bleue possèdent un pic fréquentiel moyen du même ordre de grandeur que le barycentre fréquentiel moyen (Tableau 21) ce qui explique le seul pic fréquentiel observé sur la transformée de Fourier provenant du signal type de la classe bleue (figure 111b). Par contre, les pics fréquentiels moyens caractérisant les signaux de la classe verte et de la classe rouge sont inférieurs aux barycentres fréquentiels moyens (tableau 21) ce qui indique l'existence de plusieurs pics fréquentiels dans les transformées de Fourier des signaux types de chaque classe (figure 111a et 111c).



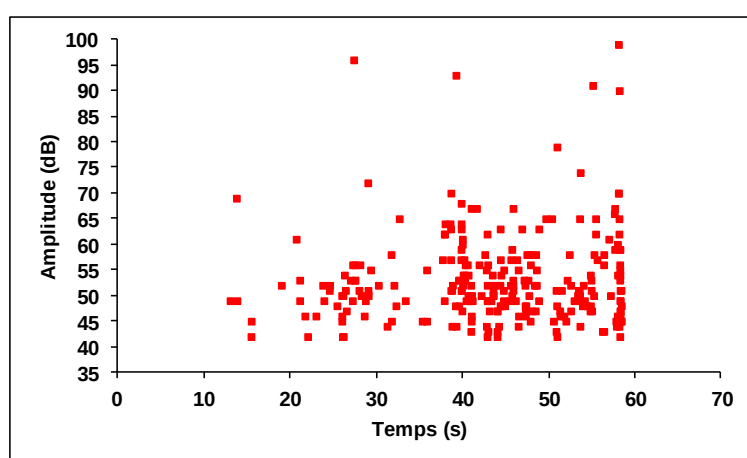
(a)



(b)



(c)

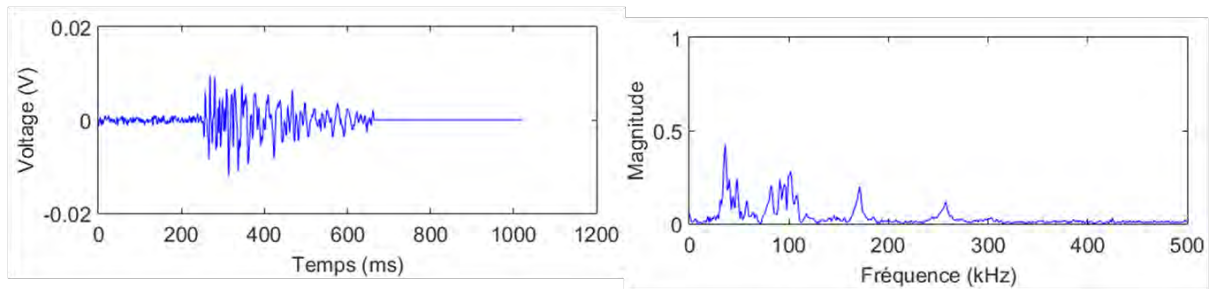


(d)

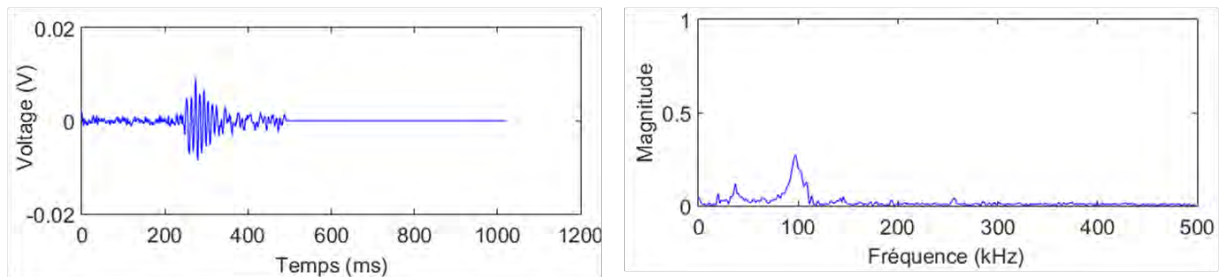
Figure 110 : Résultats de la classification (a) répartition temporelle des différentes classes de signaux (éprouvette TS4) (b) classe verte (c) classe bleue (d) classe rouge

Tableau 21 : Valeurs moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs acoustiques de chaque classe de signaux (éprouvette TS4)

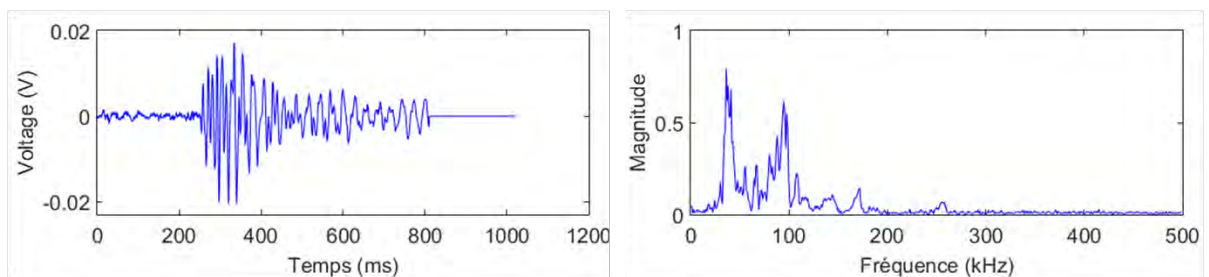
Descripteurs	Classe verte	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	54,2	22,9	22,8
Temps de montée (μs)	70 (87)	60 (70)	339 (1539)
Durée (μs)	301 (179)	305 (305)	1629 (4793)
Amplitude (dB)	41 (3)	45 (6)	53 (9)
Nombre de coups	11 (7)	15 (14)	63 (175)
Nombre de coups au pic	4 (3)	5 (4)	17 (58)
Energie absolue (aJ)	80 (91)	388 (1734)	$3 \cdot 10^6$ ($4 \cdot 10^8$)
Fréquence moyenne (kHz)	41 (15)	58 (21)	42 (7)
Fréquence initiale (kHz)	145 (337)	144 (234)	104 (98)
Fréquence de réverbération (kHz)	36 (57)	51 (65)	36 (6)
Pic fréquentiel (kHz)	35 (2)	96 (5)	36 (7)
Barycentre fréquentiel (kHz)	123 (9)	128 (13)	100 (13)



(a)



(b)



(c)

Figure 111 : Forme des signaux types d'EA et Transformées de Fourier associées pour les différentes classes de signaux recueillis sur l'éprouvette TS4) (a) classe verte, (b) classe bleue (c) classe rouge

Si l'on s'intéresse à l'importance des paramètres fréquentiels pour la classification, il semble que ce soit principalement les paramètres fréquentiels qui dissocient la classe verte de la classe bleue (figure 112). Par contre, les paramètres fréquentiels seuls ne permettent pas de dissocier les trois classes de signaux. Il est donc important d'utiliser les deux types de paramètres (fréquentiels et temporels) pour bien distinguer les différentes classes de signaux.

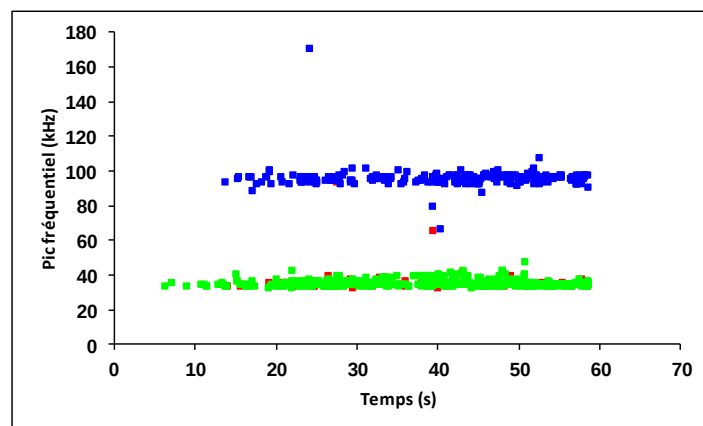


Figure 112 : Résultats de la classification en terme de pic fréquentiel (éprouvette TS4)

Comme dans l'étude du bois de Douglas, afin de labelliser les trois classes obtenues des essais arrêtés suivi par émission acoustique et thermographie infrarouge et des observations tomographiques ont été réalisés.

III.7- Essais complémentaires

III.7.1- Essais arrêtés

Comme pour le bois de Douglas, afin d'attribuer les différentes classes de signaux à des mécanismes d'endommagement, des essais arrêtés suivis simultanément par EA et thermographie infrarouge ont été réalisés. Ces essais sont complétés par des observations tomographiques.

Suite à l'analyse des courbes force-déplacement et de l'activité acoustique, trois stades d'arrêt ont été repérés (figure 113).

- Arrêt 1 : Dans la partie linéaire de la courbe (phase I)
- Arrêt 2 : Au début de la phase II-1 lorsque l'activité acoustique est encore faible
- Arrêt 3 : A l'apparition d'un signal de forte amplitude (lorsqu'un bruit audible est entendu).

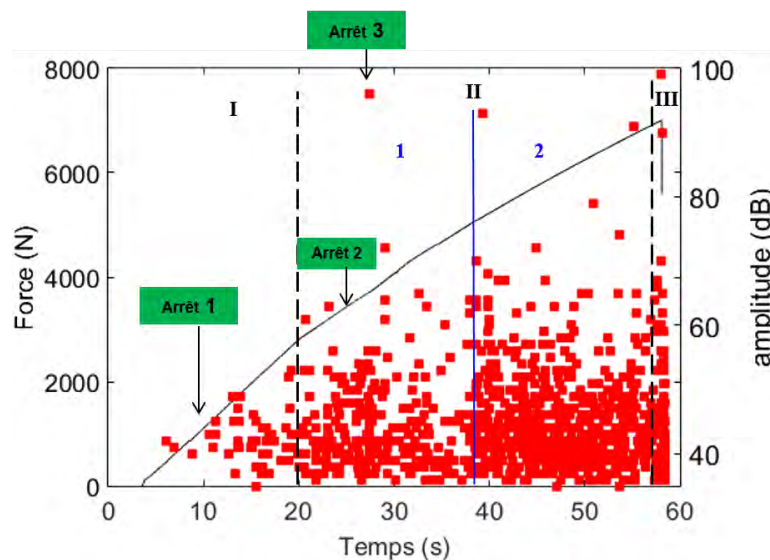


Figure 113 : Positionnement des essais arrêtés sur la courbe de l'évolution de l'endommagement d'une éprouvette en sapin pectiné sollicitée en traction longitudinale

Pour l'arrêt 1 et 2 aucune modification n'est observée sur le film thermique pendant l'essai. En outre, les observations par tomographie réalisées en scans locaux (échelle de précision 14 μm) n'ont pas permis d'identifier d'endommagement.

Pour l'arrêt 3 (arrêt à l'émission d'un bruit audible) (figure 114a), le thermogramme extrait du film thermique à cet instant affiche un échauffement au niveau des cernes de croissance (figure 114b). Une observation tomographique a été réalisée à ce stade d'arrêt sur la moitié haute de la zone d'étude où des événements acoustiques sont localisés par les capteurs (figure 115). Les tomographes obtenus à une résolution de 14 μm ne permettent d'identifier un quelconque endommagement. Il se peut qu'en voulant améliorer la précision d'observation, nous avons dû sélectionner une zone d'investigation que ne correspond pas forcément à l'endroit où l'endommagement ayant émis la salve à 90 dB a eu lieu. Ceci mériterait de plus amples investigations.

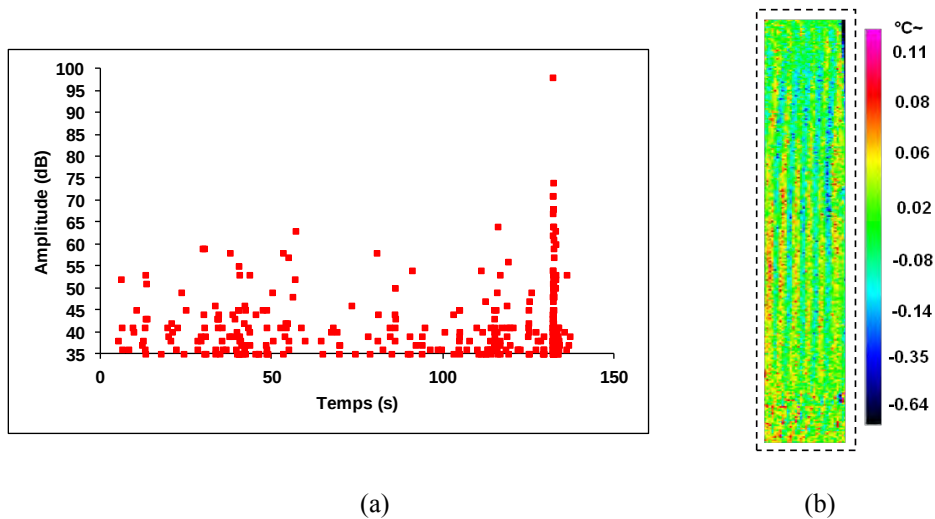


Figure 114 : Résultats du troisième arrêt (a) distribution en amplitude de l'EA en fonction du temps (b) Thermogramme à l'instant d'enregistrement de l'événement de plus haute amplitude

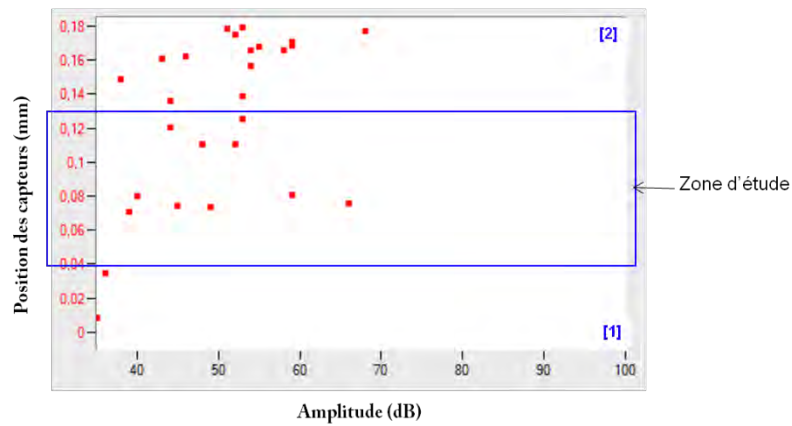


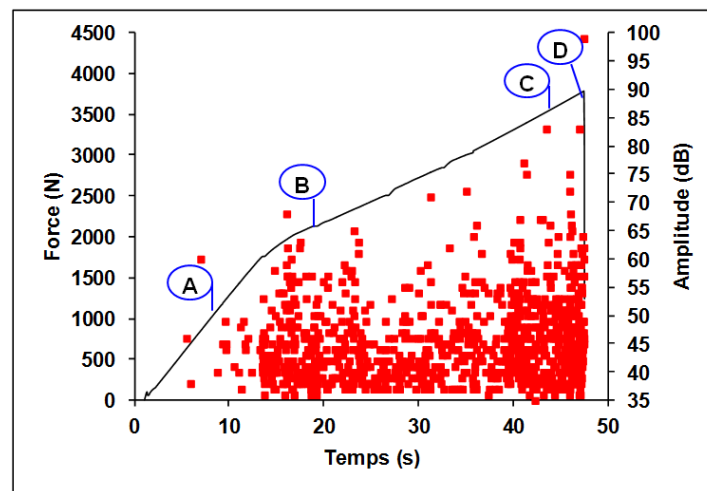
Figure 115 : Localisation des sources d'EA à l'arrêt 3

Donc, les essais mis en place dans cette partie pour récolter des informations supplémentaires devaient permettre l'attribution des classes de signaux à des mécanismes d'endommagement spécifiques ne se sont pas révélés probants. Ceci confirme l'intérêt de travailler sur des zones d'auscultation de plus faibles dimensions permettant d'améliorer la précision des observations, notamment via l'utilisation de la tomographie. Ceci implique donc de revoir la mise en place des essais arrêtés en redéfinissant notamment des géométries d'éprouvettes permettant de localiser avec précision les zones endommagées.

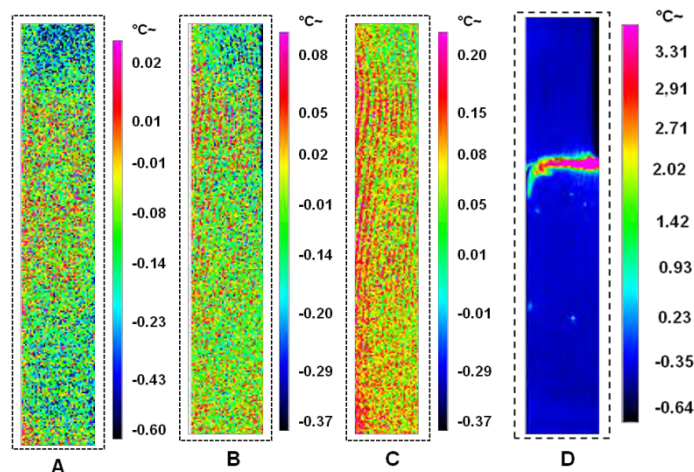
L'échauffement observé au niveau des cernes à l'arrêt 3 indique la présence d'un comportement différent entre le BI et le BF ce qui nous permet d'émettre l'hypothèse qu'il pourrait peut-être avoir une initiation des microfissurations dans le BI ou à l'interface BI/BF.

III.7.2- Suivi par EA et par TI d'un essai entier de traction

Comme dans l'étude sur le bois de Douglas, un essai de traction en continu jusqu'à rupture a été suivi simultanément par EA et thermographie infrarouge. Quatre points marquants (A, B, C et D) sont représentés sur la courbe de l'évolution de la charge en fonction du temps. Ces points sont associés à des thermogrammes correspondants extraits du film thermique. On constate l'apparition d'un échauffement au niveau des cernes à partir de $t=20s$ (figure 116-Point B). Cet échauffement devient très important juste avant la rupture de l'éprouvette au point C (figure 116-Point C). Le thermoogramme correspondant à la rupture est présenté au Point D sur la figure 116b. On peut déduire que l'échauffement observé au niveau des cernes de croissance à faible taux de charge indique la présence d'un comportement différent entre les deux types du bois (BI et BF). On pourrait dans ce cas faire une hypothèse qu'une initiation de microfissures a eu lieu dans les zones les plus chauffées qui sont le bois initial et l'interface BI/BF.



(a)



(b)

Figure 116 : (a) Distribution en amplitude de l'EA en fonction du temps (b) Thermogrammes correspondants à des points marquants de la courbe

Comme pour le Douglas, on retrouve le même phénomène d'échauffement des cernes chez le sapin pectiné mais de manière moins importante. Ceci n'empêche pas de suggérer que le processus d'endommagement du sapin pectiné rassemble à celui du Douglas. Dans ce cadre,

en faisant une analogie avec le bois de Douglas, on peut suggérer que la classe verte identifiée auparavant (figure 110) pourrait être attribuée à la microfissuration longitudinale. La classe rouge contient des signaux très énergétiques de longue durée et de temps de montée important, donc, par analogie avec les résultats du Douglas, cette classe pourrait être attribuée à la rupture des fibres. Enfin, on peut suggérer que les signaux de la classe bleue sont générés par les microfissures transversales.

Cette labellisation n'est qu'une hypothèse. Il va falloir réaliser d'autres types d'essai arrêtés pour avoir des informations complémentaires plus fines facilitant l'attribution des classes de signaux à des mécanismes spécifiques.

III.9- Conclusion

Les travaux exposés dans cette partie intègrent l'étude en traction longitudinale du sapin pectiné pendant des essais arrêtés et continus, des observations visuelles de la surface des éprouvettes ainsi que des faciès de rupture post-mortem, des observations tomographiques ainsi que des informations fournies par la thermographie infrarouge et enfin une analyse des signaux acoustiques recueillis.

L'analyse et le croisement de toutes ces informations obtenues nous permettent tout d'abord de proposer une labellisation des trois classes de signaux identifiées, puis de conclure sur le scénario le plus probable pour décrire l'endommagement et la ruine du bois de sapin pectiné sollicité en traction parallèle au fil.

Concernant l'activité acoustique enregistrée, elle peut être divisée en trois classes :

- Classe verte qui pourrait être attribuée à la microfissuration longitudinale
- Classe bleue qui pourrait être attribuée à la microfissuration transversale
- Classe rouge dont les signaux sont émis par la rupture des fibres

En ce qui concerne le scénario d'endommagement, la réponse acoustique des éprouvettes en sapin pectiné peut être divisée en trois phases :

La phase I traduit le comportement linéaire du sapin pectiné pendant laquelle une activité acoustique est enregistrée. Les signaux enregistrés dans cette phase appartiennent majoritairement à la classe verte (figure 110a). Pendant cette phase d'activité, certaines microfissures longitudinales peuvent être initiées dans le bois initial ou au niveau de l'interface BI/BF. Quelques microfissurations transversales peuvent également avoir lieu dans cette phase.

La phase II traduit un comportement non-linéaire jusqu'à la rupture finale. Cette phase pourrait elle aussi être divisée en deux parties compte tenu de la vitesse d'augmentation des salves cumulées. Dans la partie II-1, l'activité de la classe verte augmente de manière régulière (Figure 110a et 110b) par contre celle de la classe bleue augmente de manière importante (figure 110a et 110c). Ceci pourrait traduire la multiplicité des microfissurations transversales. Dans la partie II-2, les signaux de la classe rouge deviennent plus énergétiques et plus nombreux (figure 110a et 110d) caractérisant la coalescence et la propagation de microfissures transversales accompagnées par la rupture de certaines trachéides du bois initial compte tenu de leurs moins grande résistance par rapport à celles du bois final.

La Phase III désigne la rupture finale de l'éprouvette. Cette rupture est instantanée. En effet, le croisement entre les microfissurations longitudinales et les microfissurations transversales créent une fissure macroscopique inclinée déclenchée au bord de l'éprouvette et qui se propage également à travers la largeur de l'éprouvette (fissure de type LR). La propagation de cette dernière produit un effet de couplage traction/flexion, qui favorise la propagation longitudinale des fissures (fissure de type RL) au niveau des interfaces BI/BF

sous un mode de rupture combiné de mode I sous contraintes de pelage et de mode II sous contraintes de cisaillement.

IV- Endommagement du peuplier sous sollicitation de traction parallèle au fil

IV.1- Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à l'endommagement du bois de peuplier sous sollicitation de traction longitudinale. La même démarche que celle suivie pour les deux autres essences de bois est utilisée pour l'étude du peuplier.

IV.2- Comportement en traction et propriétés mécaniques associées

La figure 117 représente les courbes force-déplacement ($F-\delta$) de cinq éprouvettes de peuplier sollicitées en traction parallèle au fil. Le coefficient directeur dans la partie linéaire semble très proche pour toutes les éprouvettes testées. En ce qui concerne la charge et le déplacement à la rupture, à part l'éprouvette TP5, la différence entre les valeurs mesurées sur les quatre autres éprouvettes est très faible. L'allure de ces courbes est pratiquement identique pour les 5 éprouvettes. En général, sur ces courbes ($F-\delta$), nous pouvons identifier un comportement linéaire au début du chargement, mais très vite un comportement non linéaire apparaît au niveau de $F < 50\% F_{\max}$ jusqu'à la rupture finale. Pour le bois de peuplier, la rupture est brutale et franche ce qui explique l'observation d'un seul pic de charge sur les courbes ($F-\delta$).

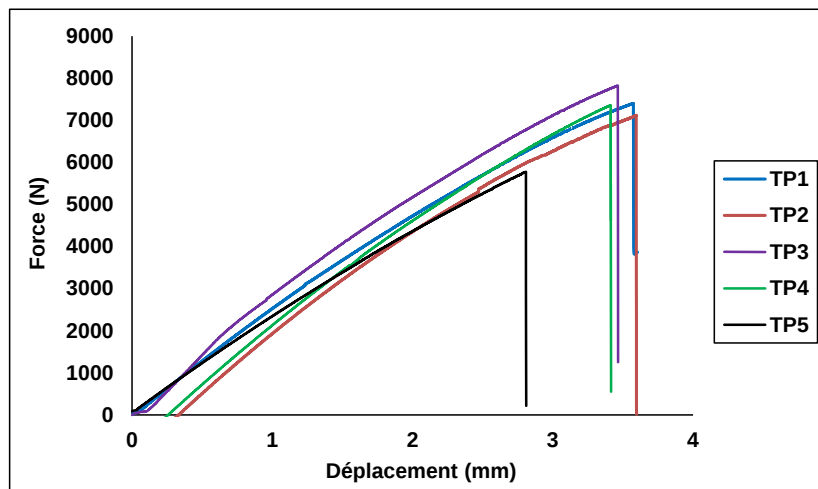


Figure 117 : courbes force vs déplacement des cinq éprouvettes en peuplier sollicitées en traction longitudinale

A partir de ces courbes expérimentales, la contrainte maximale en traction longitudinale peut être mesurée sur chaque éprouvette. Le module de Young et le coefficient de Poisson sont mesurés à l'aide des jauges de déformation. Leurs valeurs sont regroupées dans le tableau 22 et comparées avec les résultats de la littérature. La dispersion des résultats est considérée comme faible puisque le coefficient de variation est inférieur à 10% dans tous les cas. Par contre, les résultats obtenus pour la contrainte maximale et le module d'Young sont légèrement supérieurs à ceux de la littérature tandis que le coefficient de Poisson semble en bonne concordance avec la littérature.

Tableau 22 : Propriétés mécaniques mesurées sur les éprouvettes de peuplier sollicitées en traction parallèle au fil

Eprouvettes	Modules d'Young (GPa)	Module d'Young (GPa) (Littérature)	Contraintes maximales (MPa)	Contrainte maximale (MPa) (Littérature)	Coefficients de Poisson	Coefficient de Poisson (Littérature)
TP1	10,2	8,1-9,6*	92,5	69-76*	0,29	0,31**
TP2	9,3		89,0		0,31	
TP3	11,1		95,4		0,32	
TP4	9,5		91,0		0,29	
TP5	9,7		72,2		0,30	
Moyenne	9,9		88,0		0,30	
Coefficient de variation	± 7 %		± 10 %		± 4 %	

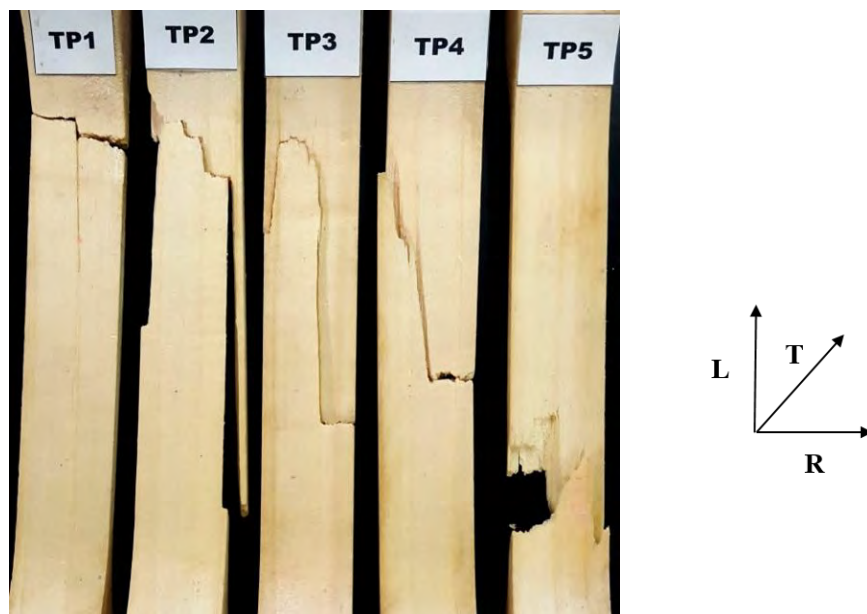
* Sell et Kropf (1990). Propriétés et caractéristiques des essences de bois

** Guitard (1987). Mécanique du matériau bois et composites

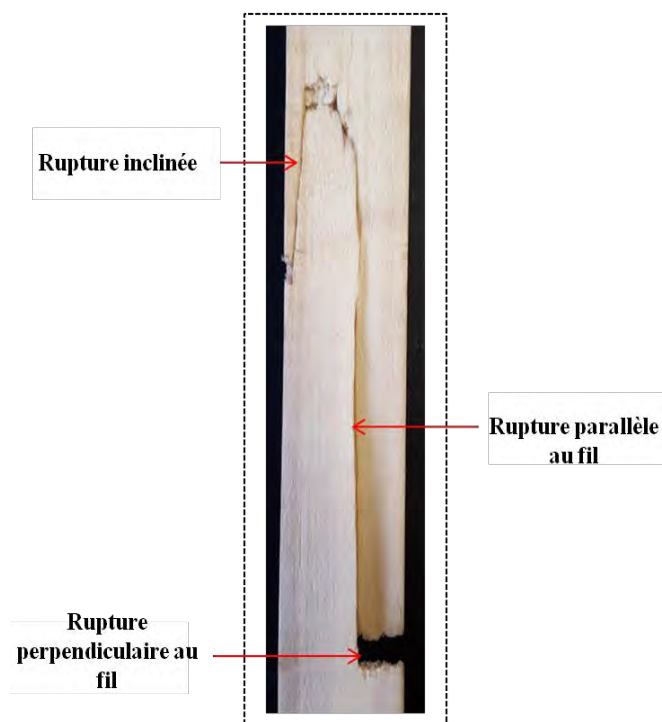
IV-3- Observation des faciès de rupture

Nous avons effectué une observation visuelle sur les éprouvettes de peuplier rompues afin de comprendre ce qui se passe pendant l'essai de traction. La ligne de rupture sur toutes les éprouvettes appartient au mode de fendage (mode A illustré par la figure 83 page 83). Trois éprouvettes TP2, TP3 et TP4 montrent des faciès de rupture semblables. En effet, dans la partie calibrée il existe une rupture fragile perpendiculaire aux fibres au bord de l'éprouvette, qui couvre une partie plus ou moins importante de la largeur de l'éprouvette. Cette fissure change de chemin pour propager soit parallèlement aux fibres soit d'une façon inclinée par rapport à la direction des fibres (figure 118a). Cette bifurcation de la fissure résulte de l'effet de couplage traction/flexion engendré par le décentrage de la charge appliquée par rapport à la section restante. Contrairement à ce qui a été observé pour les essences hétérogènes (exemple : Douglas) où la propagation de fissure est influencée par les interfaces, pour le peuplier connu comme matériau homogène la fissure après la bifurcation est soumise à une charge en mode mixte I+II et prend un chemin incliné par rapport à la direction longitudinale. La rupture des éprouvettes TP1 et TP5 est globalement fragile et leur ligne de rupture appartient partiellement au mode de traction (mode D illustré par la figure 83 page 83), qui résulte de la propagation de type LR. Sur l'éprouvette TP5, une propagation de fissure inclinée dans l'épaisseur de l'éprouvette est visible.

L'éprouvette sélectionnée pour la suite de l'étude est l'éprouvette TP3. Les différents types de rupture observés sur cette éprouvette sont montrés sur la figure 118b.



(a)



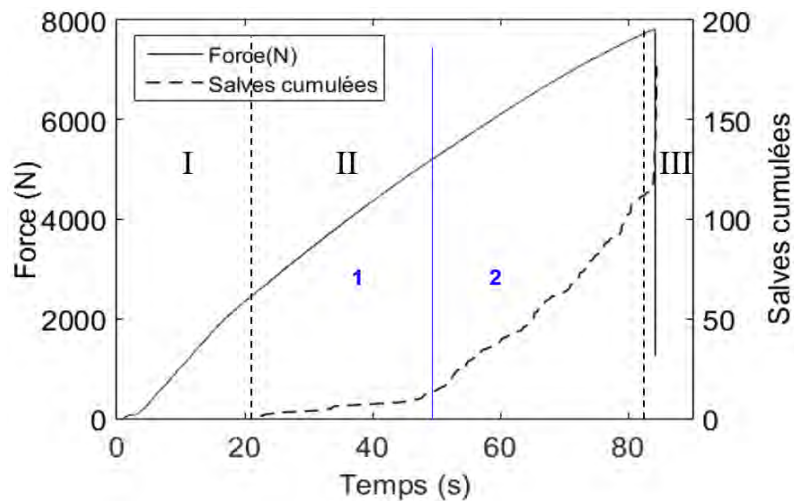
(b)

Figure 118 : (a) Faciès de rupture du lot d'éprouvettes de peuplier (b) faciès de rupture de l'éprouvette représentative (TP3)

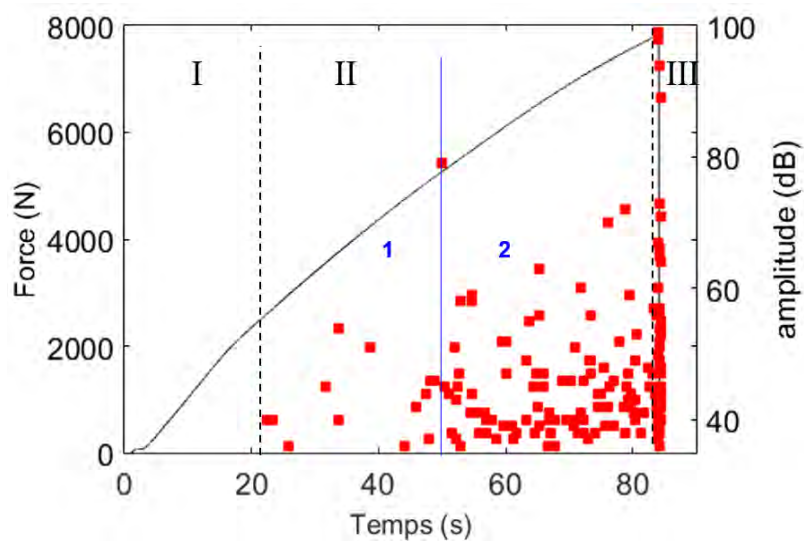
IV.4- Analyse de l'activité acoustique

La courbe de l'évolution de la force en fonction du temps couplée à l'évolution de l'activité acoustique est montrée sur la figure 119. L'activité acoustique est représentée par le nombre de salves cumulées (figure 119a), l'amplitude (figure 119b) et l'énergie cumulée (figure 119c). Trois phases peuvent être identifiées (figure 119) :

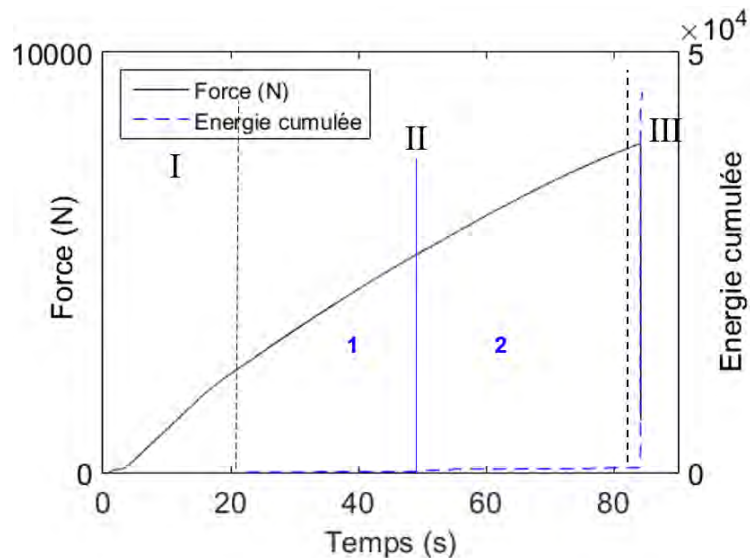
- **Phase I** : Cette phase correspond à la partie linéaire de la courbe (F- δ). Aucun signal n'est détecté dans cette phase.
- **Phase II** : Cette phase débute lorsque la courbe (F- δ) commence à devenir non linéaire, et termine au point où la charge devient maximale. En terme de réponse acoustique, cette phase peut être divisée en deux parties. Dans la partie II-1, le nombre de salves cumulées commence à augmenter progressivement (figure 119a) tandis que l'énergie cumulée reste très faible (figure 119c). L'amplitude des signaux dans cette partie ne dépasse pas 55 dB (figure 119b). Dans la partie II-2 qui débute à $t = 50$ s, un changement de la vitesse de l'évolution du nombre de salves cumulées est observé (figure 119a). A cet instant un signal d'une amplitude de 80 dB a été enregistré (figure 119b). Une légère augmentation au niveau de l'énergie cumulée est également constatée (figure 119c).
- **Phase III** : C'est la phase de la rupture finale. Elle est caractérisée par une augmentation remarquable du nombre de salves cumulées (figure 119a) et de l'énergie cumulée (figure 119c). Un spectre d'amplitude variant de 35 dB à 99 dB est observé (figure 119b). Cette phase est très rapide.



(a)



(b)



(c)

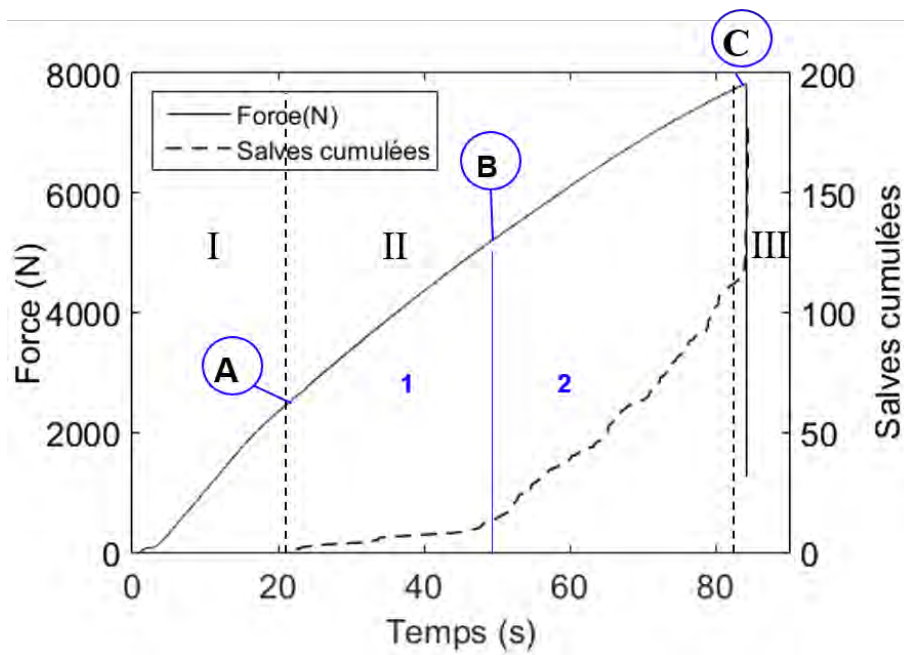
Figure 119 : Evolution de la charge et de l'activité acoustique en fonction du temps (éprouvette TP3) (a) salves cumulées (b) répartition des amplitudes (c) énergie cumulée

IV.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique

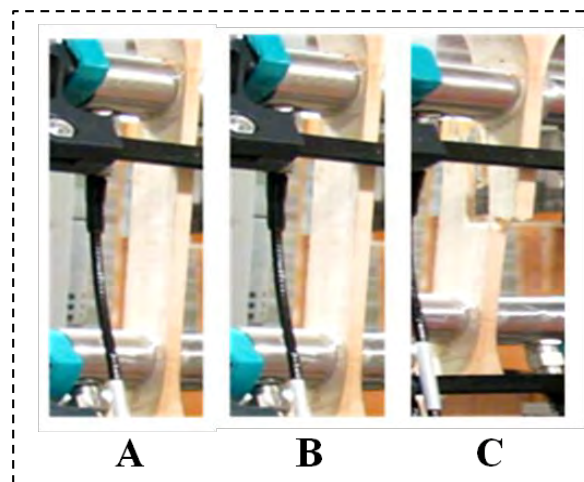
L'essai de traction de l'éprouvette TP3 a été filmé. Trois images à différents points marquants des trois phases ont été extraites du film (figure 120). En effet, pendant la phase I, aucun endommagement particulier n'est observé sur la surface de l'éprouvette (figure 120b-Point A) et aucun signal d'EA n'est détecté. Donc, on peut dire qu'à cette phase l'éprouvette est exempte de tout type d'endommagement.

Durant la phase II, la surface de l'éprouvette filmée ne montre aucun endommagement visible (figure 120b-Point B). Cependant, plusieurs auteurs (Keith et Côté 1968, Keith 1974, Côté et Hanna 1983) ont rapporté que l'endommagement des bois feuillus, spécifiquement le peuplier (Alkande et Kyanka 1990), sollicité en traction, commence par une microfissure au niveau de l'interface fibre/rayon. Cette zone est considérée comme une zone de faiblesse dans la structure du bois. Ensuite, ils ont constaté que la fissure propage sous forme d'escalier en traversant les fibres puis en changeant de chemin pour propager au niveau de l'interface fibre/rayon.

La troisième phase coïncide avec la rupture finale de l'éprouvette (figure 120b-Point C). On voit une fissure transversale (perpendiculaire au fil de type LR) accompagnée par une fissure inclinée. En effet, à la fin du processus d'endommagement, sous l'effet de la concentration de contraintes aux alentours des microfissures transversales, les fibres dans le bois peuvent rompre brutalement en formant des macro-fissures transversales. Cette fissure transverse qui s'est produite sur la largeur de l'éprouvette induit un couplage traction/flexion. Ce dernier a pour conséquence de solliciter les microfissures longitudinales en mode mixte I+II. La croissance et la coalescence de ces dernières engendrent une propagation parallèle au fil.



(a)



(b)

Figure 120 : Différents stades d'endommagement de l'éprouvette (a) Courbe de l'évolution de la charge et de l'activité acoustique en fonction du temps (b) Photos de la surface de l'échantillon extraites du film à des points particuliers

IV.6- Classement des données acoustiques

Notre analyse est basée sur l'activité acoustique enregistrée par le capteur qui recueille le maximum de signaux. Dans ce cadre les signaux enregistrés par le capteur R6 (2) sont analysés (figure121).

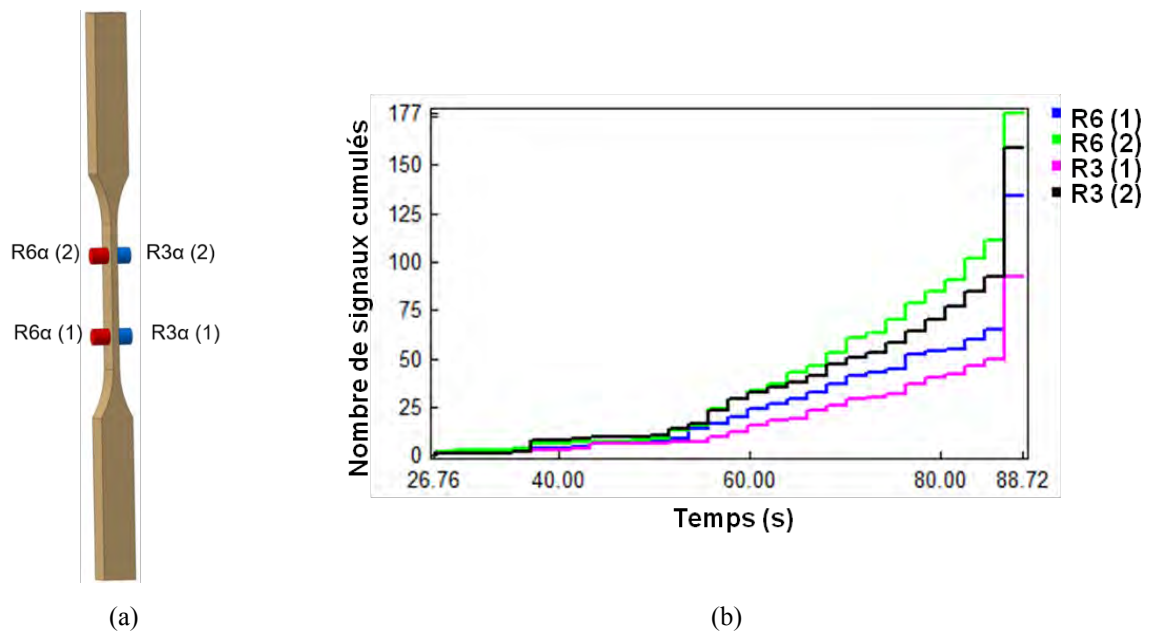


Figure 121 : (a) Positions des capteurs (b) Nombre de signaux enregistrés par chaque capteur (éprouvette TP3)

A- Optimisation du nombre de classes

La figure 122 montre l'évolution des coefficients de Davies et Bouldin (D&B) et Tou en fonction du nombre de classes. Généralement, le nombre de classes est optimal lorsque le coefficient D&B est minimisé et le coefficient Tou est maximisé (Huguet 2002, Godin et al. 2011). Or, la figure 122 montre une incohérence au niveau de l'évolution de deux coefficients de validation du nombre de classes. En effet, le coefficient D&B est minimisé pour un nombre de classes égal à 3 tandis que Tou est maximisé pour un nombre de classes égal à 2 (figure 122). Dans ce cadre, les résultats obtenus pour 2 et 3 classes vont être présentés et comparés.

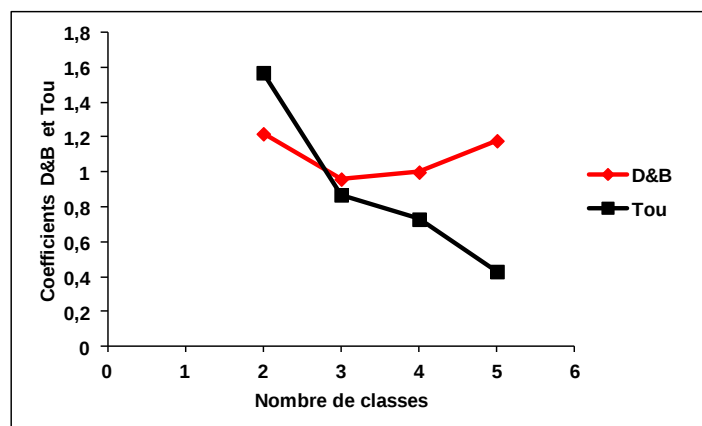
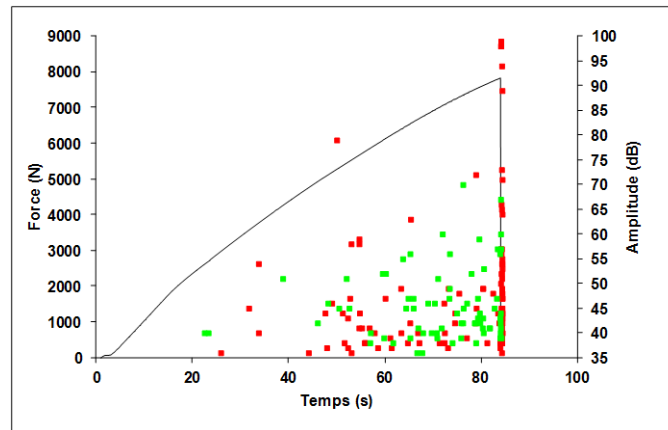


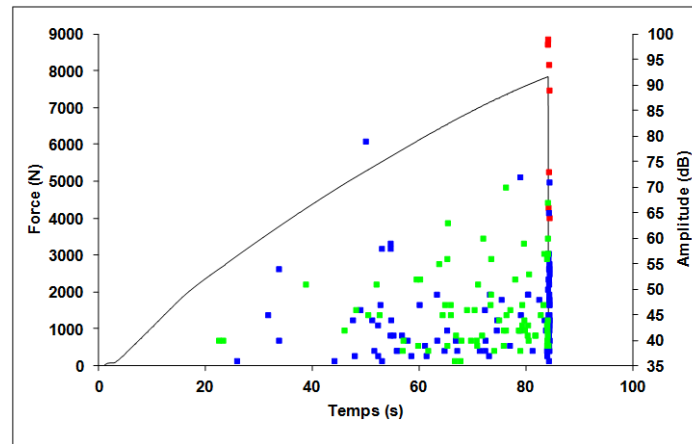
Figure 122 : Variation des coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes (éprouvette TP3)

B- Résultats de la classification des signaux par la méthode des k-moyennes

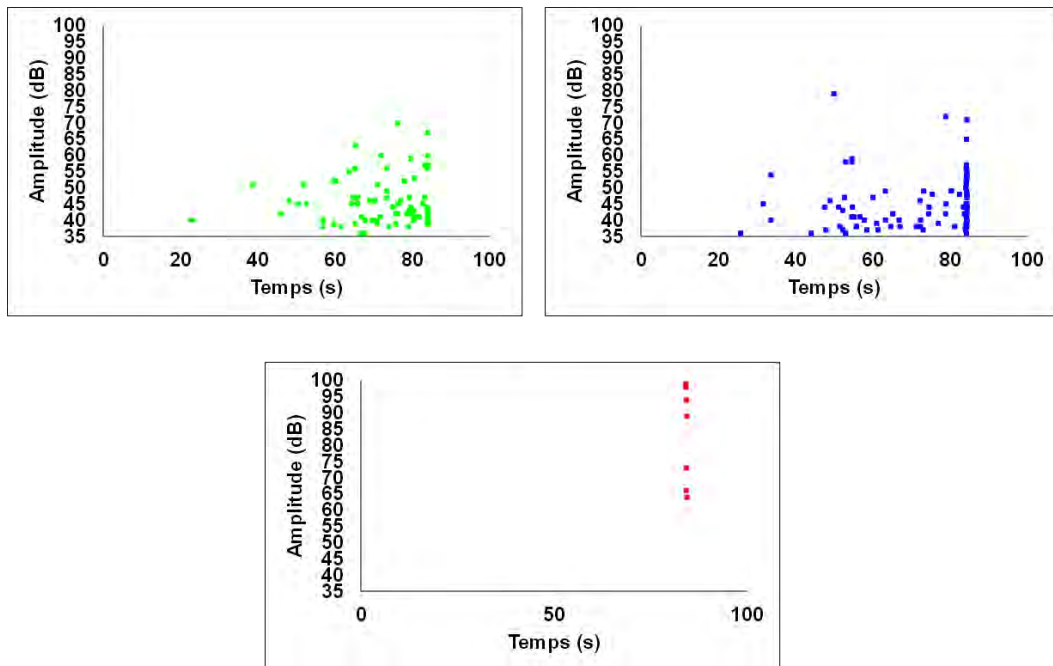
Les résultats sont présentés au regard de l'amplitude des salves (figure 123). En comparant les résultats de 2 et de 3 classes, on constate que la classe rouge dans la première classification (figure 123a) se divise en deux classes (classe rouge et classe bleue) dans la deuxième classification (figure 123b). Par contre, la classe verte reste la même dans les deux résultats.



(a)



(b)



(c)

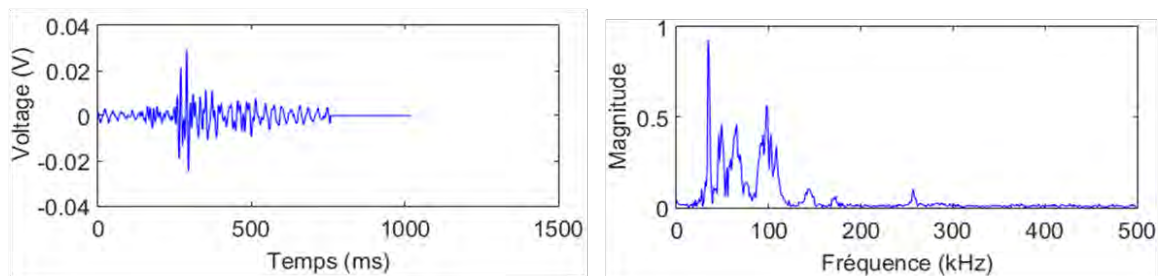
Figure 123 : Résultats de la classification sur la distribution en amplitude (a) résultat de 2 classes (b) résultat de 3 classes (c) les trois classes séparées (éprouvette TP3)

Or, en regardant les valeurs moyennes des descripteurs qui caractérisent les signaux de la classe rouge et la classe bleue (Tableau 23) pour le deuxième résultat de la classification, on constate une grande différence surtout au niveau de descripteurs temporels. On garde alors trois classes de signaux pour la suite de l'analyse.

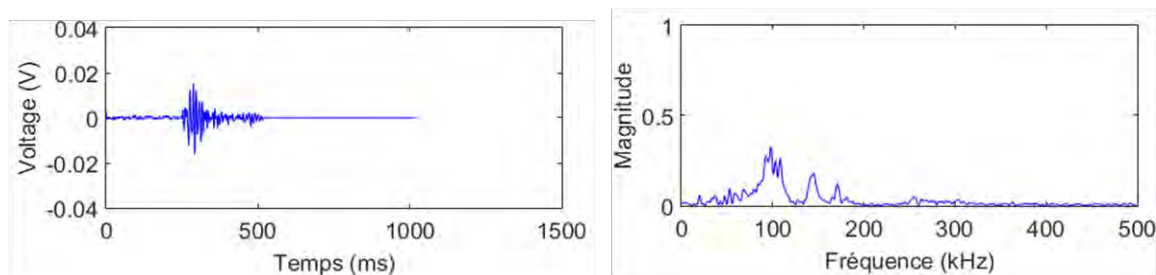
Donc, en se basant sur le deuxième résultat de la classification (3 classes), on a une première classe (classe verte) qui constitue 42,9% des signaux. La signature acoustique des signaux appartenant à cette classe est caractérisée par un temps de montée moyen, une durée moyenne, une faible amplitude et une faible énergie (figure 124a). La deuxième classe (classe bleue) contient 52,5% des signaux. La forme d'ondes des signaux appartenant à cette classe est caractérisée par un temps de montée très court, une courte durée, une faible amplitude ainsi qu'une faible énergie (figure 124b). La classe verte et la classe bleue apparaissent dès que la courbe de charge perd sa linéarité. A la rupture, la fréquence d'apparition de la classe bleue est plus importante que celle de la verte (figure 123b-c). Quant à la classe rouge, elle apparaît à la fin de l'essai pendant la rupture macroscopique. Elle ne représente que 4,6% des signaux. La forme de ses signaux est caractérisée par un temps de montée très important, une très longue durée, une forte énergie et une haute amplitude (figure 124c). Pour des raisons de visualisation des résultats, les formes des signaux typiques appartenant à la classe verte et bleue (figure 124a et 124b) sont représentées à une échelle différente que celle du signal typique de la classe rouge puisque son amplitude est extrêmement différente (figure 128c).

Tableau 23 : Valeurs moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs acoustiques de chaque classe de signaux (éprouvette TP3)

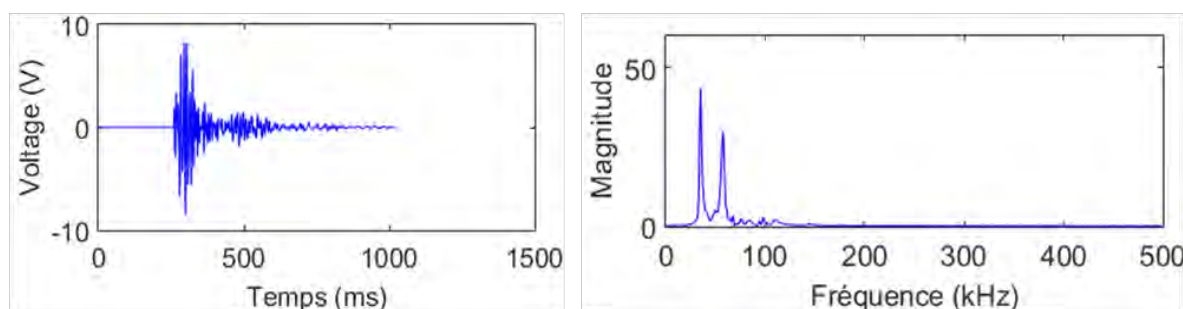
Descripteurs	Classe verte	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	42,9	52,5	4.6
Temps de montée (µs)	280 (594)	33 (84)	5278 (5811)
Durée (µs)	801 (1048)	165 (188)	20217 (25006)
Amplitude (dB)	45 (8)	46 (7)	85 (15)
Nombre de coups	26 (35)	14 (14)	796 (1013)
Nombre de coups au pic	11 (20)	4 (5)	181 (186)
Energie absolue (aJ)	407 (2523)	601 (2619)	$1,43 \cdot 10^8$ ($3,9 \cdot 10^8$)
Fréquence moyenne (kHz)	37 (14)	98 (25)	41 (12)
Fréquence initiale (kHz)	80 (46)	238 (239)	58 (49)
Fréquence de réverbération (kHz)	31 (14)	82 (36)	42 (11)
Pic fréquentiel (kHz)	49 (25)	114 (49)	50 (30)
Barycentre fréquentiel (kHz)	120 (18)	159 (19)	109 (27)



(a)



(b)



(c)

Figure 124 : Forme des signaux types d'EA et Transformées de Fourier associées aux différentes classes (a) classe verte, (b) classe bleue (c) classe rouge

Comme pour les deux bois précédents, afin de labelliser les trois classes de signaux obtenues, des essais arrêtés et des observations tomographiques ainsi qu'un suivi en continu d'un essai avec EA et TI ont été réalisés.

IV.7- Essais complémentaires

Suite à l'analyse des courbes et de l'activité acoustique, deux stades d'arrêt ont été repérés (figure 125).

- Arrêt 1 : Dans la première partie de la phase II, après l'enregistrement de quelques signaux d'EA.
- Arrêt 2 : dans la phase avant la rupture finale, lorsque l'activité acoustique devient importante.

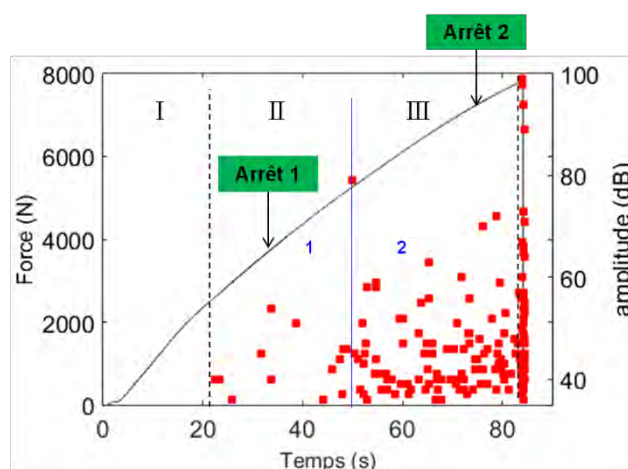


Figure 125: Positionnement des essais arrêtés sur la courbe de l'évolution de l'endommagement d'une éprouvette de peuplier sollicitée en traction longitudinale

Les résultats obtenus par thermographie infrarouge pour ces deux arrêts ne permettent pas d'identifier d'endommagement. Pour ce type de bois, seule la rupture finale peut être détectée par thermographie infrarouge (figure 126).

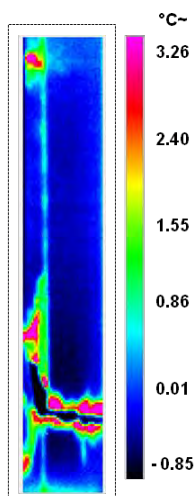


Figure 126 : Rupture finale détectée par thermographie infrarouge d'une éprouvette de peuplier sollicitée en traction longitudinale

En outre, à une échelle de $14\mu\text{m}$, la tomographie est incapable de détecter un endommagement dans la structure du peuplier à ces niveaux de contrainte. Il est donc intéressant de réaliser des essais arrêtés mais avec d'autres types d'éprouvettes de faibles dimensions afin de favoriser une meilleure résolution des méthodes d'observation.

Donc, pour labelliser les classes de signaux obtenues suite à l'analyse statistique multivariées nous allons faire une analogie avec les mécanismes identifiés dans la littérature et les signatures acoustiques recueillies pour les autres essences de cette étude. En effet, la classe rouge (figure 123b-c) est composée de signaux de forte amplitude. De plus, elle apparaît uniquement à la fin de l'essai au moment de la rupture finale. Donc, ceci laisse penser que la classe rouge est principalement due au mécanisme d'endommagement le plus sévère intervenant lors de l'endommagement de l'éprouvette à l'échelle macroscopique qui peut être la rupture des fibres. La classe verte est caractérisée par des signaux de faibles énergies (Tableau 23). Donc, elle pourrait être associée aux microfissurations longitudinales au niveau des zones identifiées comme zones de faiblesse dans les feuillus et qui nécessite une faible énergie pour s'endommager tels que les interfaces rayon/fibre et les interfaces fibre/fibre (Keith et Côté 1968, Keith 1974, Côté et Hanna 1983, Alkande et Kyanka 1990). Pour la classe bleue, elle contient des signaux plus énergétiques que la classe verte. De plus, elle apparaît de manière plus importante lors de l'endommagement final de l'éprouvette (figure 123b-c). En réalité, la classe bleue et la classe rouge appartiennent à la même classe pour le résultat validé par le critère statistique Tou (figure 123a). Donc on peut dire que les signaux de la classe bleue sont générés par un phénomène qui prépare la rupture finale des fibres qui peut être les microfissures transversales qui se propagent à travers les fibres.

IV.8- Conclusion

Les travaux exposés dans cette partie comprennent l'étude en traction longitudinale du bois de peuplier pendant des essais arrêtés et continus, des observations visuelles sur la surface des éprouvettes ainsi que sur les faciès de rupture post-mortem, des observations tomographiques ainsi que des informations fournies par la thermographie infrarouge et enfin une analyse des signaux acoustiques recueillis.

Les essais complémentaires pour ce bois considéré comme homogène n'ont pas abouti à des résultats satisfaisants permettant la labellisation des trois classes des signaux identifiées suite à l'analyse statistique multi-variables. Donc, en se basant sur des références bibliographiques ainsi que sur les caractéristiques de chaque classe, nous avons suggéré la labellisation suivante :

- Classe verte : les signaux acoustiques cette classe pourraient être attribués à la microfissuration longitudinale à l'interface fibre/rayon et fibre/vaisseaux, fibre/fibre
- Classe bleue : les signaux de cette classe proviennent de la microfissuration transversale dans les rayons et dans les parois des fibres.
- Classe rouge : les signaux de la classe 3 sont émis par la rupture des fibres.

En ce qui concerne le scénario d'endommagement, la réponse des éprouvettes de peuplier peut être divisée en 3 phases :

La phase I représente le comportement linéaire de l'éprouvette où aucune activité acoustique n'est observée. La structure homogène semble éliminer tout endommagement précoce.

La phase II traduit un comportement non-linéaire jusqu'à la rupture finale. Cette phase peut elle aussi être séparée en deux parties selon la vitesse de l'augmentation des salves cumulées.

Dans la partie II-1, l'activité acoustique de la classe rouge est absente. Cela signifie qu'il n'y a quasiment pas de rupture de fibres. Par contre, les émissions de la classe verte et de la classe bleue augmentent de manière lente et régulière. Ceci explique que peu de microfissures longitudinales sont initiées aux interfaces fibre/rayon, fibre/vaisseau, fibre/fibre, comme pour les microfissures transversales dans les rayons et dans les parois des fibres.

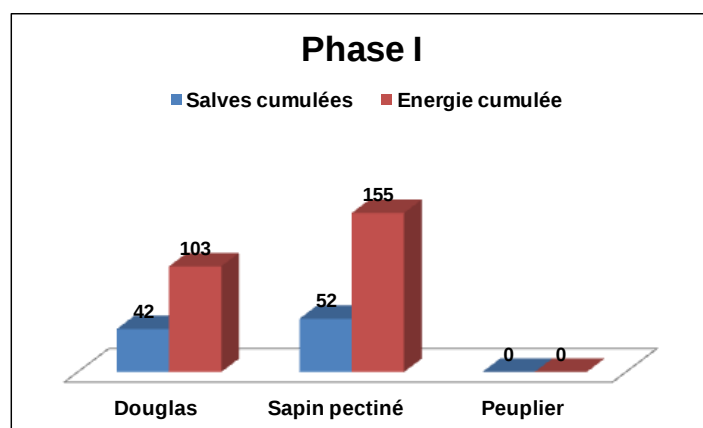
Dans la partie II-2, la vitesse de l'évolution des salves cumulées change pour prendre une valeur plus importante que celle observée en phase II-1. Au fur et à mesure que la charge augmente, la densité des microfissures transversales devient de plus en plus importante jusqu'à atteindre la phase où la propagation de fissure se déclenche (Phase III). Avant cette rupture finale, il n'y a toujours pas de rupture de fibres.

La phase III désigne la rupture finale de l'éprouvette. A la fin du processus d'endommagement, sous l'effet de la concentration de contraintes aux alentours des microfissures transversales, les fibres dans le bois peuvent rompre brutalement en formant des macro-fissures transversales. Cette fissure traverse partiellement la largeur de l'éprouvette et induit un couplage traction/flexion. Ce dernier a pour conséquence de solliciter les microfissures longitudinales en mode mixte I+II. Leurs croissances et leurs coalescences engendrent une propagation parallèle au fil.

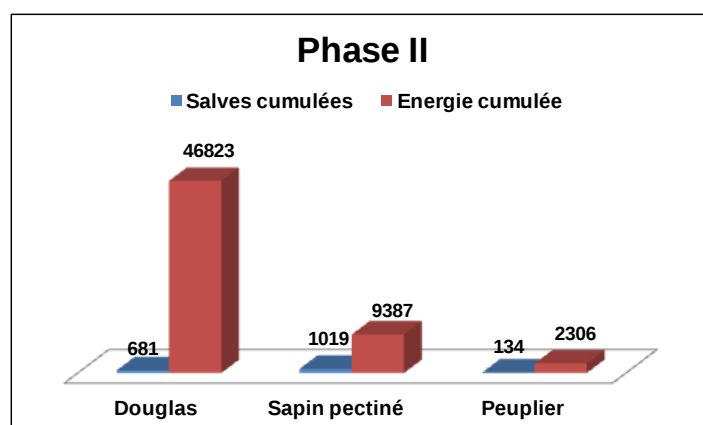
V- Comparaison entre les trois essences

En traction dans le sens du fil, le comportement des trois essences étudiées peut toujours être divisé en trois phases selon l'évolution des activités acoustiques au cours des essais. En revanche, le nombre de salves cumulées et l'énergie cumulée pour chaque phase varient en fonction de l'essence. Dans la phase I, qui correspond à la partie linéaire de la courbe force-déplacement, on constate que le sapin pectiné génère un peu plus de signaux que le Douglas mais à une énergie équivalente (figure 127a). Par contre, dans cette phase, le bois de feuillus (le peuplier) reste silencieux. Dans la phase II, qui commence pour les trois essences lorsque le comportement mécanique du matériau devient non linéaire, le bois de sapin pectiné génère deux fois plus de signaux que le bois de Douglas (figure 127b). Par contre, les signaux générés par le Douglas sont cinq fois plus énergétiques que les signaux générés par le sapin

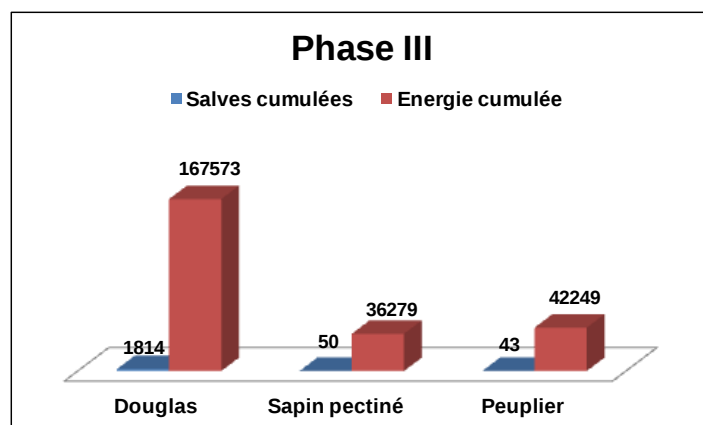
pectiné (figure 127b). La réponse acoustique du peuplier dans cette phase est beaucoup plus faible en terme de nombre de salves cumulées et d'énergie cumulée en comparant avec les deux autres résineux. Dans la phase III, phase de la rupture, le bois de Douglas génère beaucoup plus de signaux que le sapin pectiné et le peuplier respectivement (figure 127c). Le nombre de signaux générés par le sapin pectiné et par le peuplier dans la phase de rupture finale sont quasi-similaires. En comparant le nombre de signaux générés par les trois essences on constate que le Douglas génère plus des signaux que le sapin pectiné et le peuplier respectivement. Cette constatation concorde avec les conclusions des travaux d'Ansell (1982), qui a constaté que plus le contraste de résistance entre le bois initial et le bois final est élevé plus le bois génère des signaux d'EA pendant son endommagement en traction parallèle au fil. En outre, la différence importante au niveau de la réponse acoustique des résineux (Douglas et sapin pectiné) et celle des feuillus (peuplier) peut être expliquée également par l'importance de l'énergie consommée pendant la propagation des fissures dans les deux types de bois. En effet, la propagation de fissures dans les résineux consomme une énergie importante due à la formation des microfissures et au phénomène de pontage des fibres (Reiterer et al. 2000). Ce dernier phénomène est rarement observé lors de l'endommagement des feuillus ce qui explique la faible énergie libérée. Fengel et Wenger (1989) considère que le peu de pontages de fibres observé chez les feuillus résulte de leur microstructure, car leurs cellules (vaisseaux, fibres) sont plus courtes que les cellules des résineux (trachéides).



(a)



(b)



(c)

Figure 127 : Comparaison entre les réponses acoustiques des trois essences étudiées pendant les trois phases de chargement (a) phase I, (b) phase II et (c) phase III

La différence entre la réponse acoustique des essences résineuses et celle des feuillues peut être aussi expliquée par les différences au niveau de leurs structures anatomiques. En effet, la structure des bois de résineux est assez simple. Elle est constituée de deux types de cellules : les trachéides qui forment 90-95% du volume du bois et 5% à 10% de rayons ligneux. En revanche, le bois des feuillus a une plus grande complexité structurale puisqu'il contient plusieurs types de cellules (vaisseaux, fibres, rayons ligneux ...). Le bois des feuillus possède un volume important de rayons ligneux qui varie entre 10% et 32% (Ozden et al. 2016). Pendant le chargement, les rayons ligneux peuvent être des éléments de renforcements comme ils peuvent être des points de faiblesse. Ils sont considérés comme initiateur de l'endommagement dans la direction longitudinale (Bordner et al. 1997; Reiterer 2002b) et comme point d'arrêt de la fissure dans la direction radiale (Ashby et Gibson. 1988; Mattheck et Kubler 1995; Burgert et al. 2001, Ozden et al. 2016). Par conséquent, l'initiation de microfissuration dans le bois des feuillus exige un taux de charge élevé ce que l'on peut voir sur nos essais. En outre, les vaisseaux représentent aussi des points d'arrêt dans la propagation des fissures (Ashby et Gibson 1988). En effet, lorsqu'une fissure arrive au niveau d'un vaisseau, elle a tendance soit à ouvrir le vaisseau soit à le contourner et à s'arrêter. Ceci pourrait expliquer pourquoi le bois de peuplier émet moins de signaux que les résineux pendant les phases d'endommagement (propagation de fissures limitée par un obstacle).

Concernant la classification des signaux, l'analyse statistique multi-variables a permis de distinguer trois classes de signaux pour les trois essences étudiées. La dissociation des classes pour le peuplier a été plus difficile, probablement à cause de son homogénéité.

Les signatures acoustiques de trois classes pour les deux essences résineuses sont proches (Tableaux 19 et 21). En effet, les deux classes de microfissurations longitudinales et transversales sont caractérisées par une faible amplitude, une durée moyenne et une faible énergie absolue. Ces deux classes se différencient entre elles pour les deux essences résineuses principalement au niveau du pic fréquentiel. En effet, les microfissures transversales sont situées à des fréquences plus hautes (supérieures à 70 kHz) tandis que les microfissures longitudinales sont situées à des fréquences plus faibles (inférieures à 50 kHz). Pour le bois de peuplier les deux classes de microfissurations affichent une différence au niveau de tous les descripteurs temporels et fréquentiels. La classe rouge attribuée à la rupture des fibres pour les trois essences est caractérisée par un temps de montée très important, une durée très longue, une énergie absolue très élevée et un pic fréquentiel inférieur à 51 kHz (Tableaux 19, 21, 23).

En ce qui concerne les mesures par thermographie infrarouge, les résineux dont les cernes sont très marqués tel que le Douglas semblent plus émissif que les résineux dont les cernes sont moins marqués tel que le sapin pectiné. Par contre, l'émissivité des bois homogènes tel que le peuplier est très faible. L'endommagement ne peut être détecté qu'à la rupture finale.

En tomographie à rayons X, certains endommagements peuvent être distingués à une résolution de 14 μm chez un résineux dont les cernes sont très marqués. Par contre, il faut une résolution plus fine ou une meilleure localisation de l'endommagement afin de détecter un endommagement pour un bois à structure intermédiaire ou homogène. Dans tous les cas la résolution est liée à la taille de l'objet ausculté, donc il est intéressant pour les trois essences de réaliser des observations tomographiques sur des zones bien localisées sur des éprouvettes de faibles dimensions.

VI- Conclusion

Ce troisième chapitre avait pour objectif d'étudier la réponse acoustique de trois essences de bois sollicitées en traction parallèle au fil. Les résultats ont montré que cette réponse dépend fortement du type d'essence. L'analyse par la méthode de reconnaissance de forme a permis de distinguer trois classes de signaux pour chaque type de bois. A l'aide des observations réalisées au cours des essais et sur éprouvettes post-mortem, des essais arrêtés et de la thermographie infrarouge, une attribution des classes à des mécanismes particuliers a été suggérée. Ces mécanismes appartiennent à une échelle où l'émission acoustique est sensée être capable de détecter des endommagements. En effet, tous les mécanismes qui se passent dans l'ultrastructure ne sont pas considérés dans cette étude. Il est aussi intéressant de mentionner que la labellisation des classes des signaux identifiées dans cette étude nécessite encore d'autres types d'essais plus fins afin qu'elle puisse être validée.

Dans ce chapitre, il est aussi montré que la technique de l'émission acoustique est une technique prometteuse pour le suivi de l'endommagement dans le matériau bois. En effet elle permet de détecter des endommagements de manière très précoce, chose que la thermographie infrarouge n'est pas capable de faire pour le matériau bois par exemple, comme la tomographie à rayons X à une échelle de 22-14 μm .

Le chapitre suivant est donc dédié au suivi des mécanismes d'endommagement d'éprouvettes sous sollicitation de compression longitudinale. Après une analyse des faciès de rupture et des propriétés mécaniques mesurées, nous essaierons d'identifier les différentes caractéristiques de l'activité acoustique enregistrée. Pour ce faire, une analyse statistique multi-variables est mise en place. L'objectif de cette analyse est d'identifier les groupes de signaux différents. Une corrélation entre ces groupes et les endommagements des éprouvettes est ensuite présentée.

Chapitre 4 : Suivi de l'endommagement du matériau bois sous sollicitation de compression parallèle au fil

I- Introduction

La compréhension des mécanismes d'endommagement du matériau bois sollicité en compression longitudinale a fait l'objet de nombreuses études. Elles passent d'abord par l'observation microscopique de l'anatomie du bois. Ashby et Gibson (1988), ont mis en évidence deux modes de rupture différents en compression longitudinale qui dépendent de la densité du bois. Pour le bois de faible densité ($d < 0,3$) comme le balsa, les parties terminales des fibres rompent et s'emboîtent les unes dans les autres si l'on compare avec un matériau non-chargé (figure 128a-b). Les mécanismes de rupture ne se manifestent pas entre les parois cellulaires mais aux extrémités des fibres. En revanche pour les bois qui possèdent une densité supérieure à 0,3 les mécanismes de rupture sont localisés généralement dans une bande de glissement connu sous le nom de bande de cisaillement (*kinking band*) (figure 128c). Cette bande de cisaillement apparaît suite à une insatiabilité provoquée par des défauts dans l'alignement des fibres longitudinales engendrés par la présence des cellules radiales du bois (rayons ligneux et canaux résinifères pour certains résineux) (Kucera 1982, Bariska 1985, Poulsen 1997, Gong et Smith 2000, Da Silva 2007, Benabou 2016) (figure 129a). Les défauts d'alignement engendrés par la présence des rayons radiaux dans les fibres longitudinales sont plus fréquents dans le plan (LT) que dans le plan (LR) ce qui favorise une orientation inclinée de la bande de cisaillement dans le plan (LT) (Vural et Ravichandran 2003, Da Silva 2007) (figure 129b).

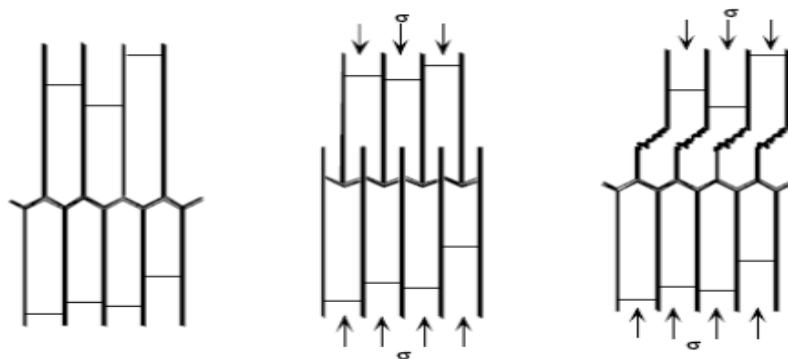
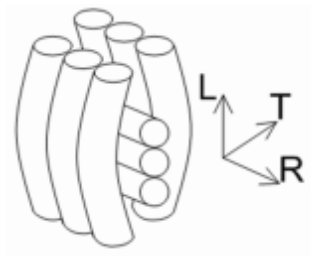
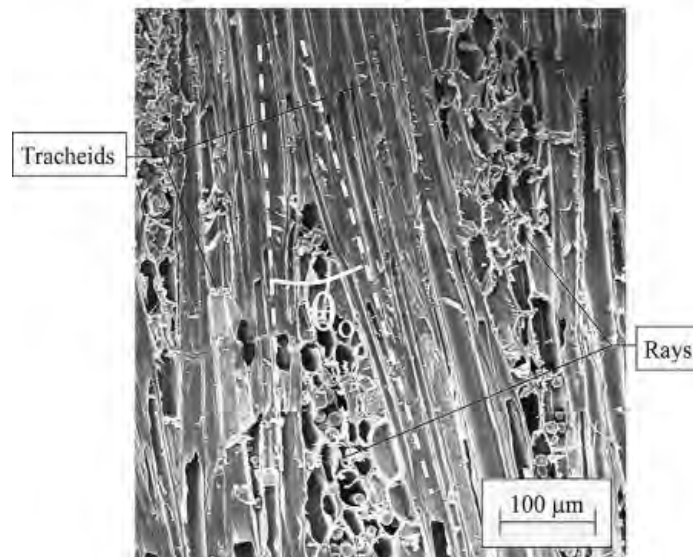


Figure 128 : Différents modes de rupture du bois sollicité en compression longitudinale (a) éprouvette avant sollicitation (b) rupture des parties terminales des fibres (c) flambement localisé en bande de cisaillement des parois (d'après Ashby et Gibson 1997)



(a)



(b)

Figure 129 : Désalignements des fibres du bois en raison des rayons ligneux (a) schématisation du phénomène (d'après Benabou et al. 2008), (b) Observation tomographique d'un désalignement des trachéides engendré par la présence des rayons radiaux (d'après Da Silva 2007)

A l'échelle macroscopique, les bandes de cisaillement pour des éprouvettes en bois de géométrie rectangulaire ont souvent une ligne de rupture horizontale (perpendiculaire à la direction des fibres) sur la face longitudinale radiale (LR), et une ligne de rupture inclinée d'un angle compris entre 23° et 60° sur la face longitudinale tangentielle (LT) (Wadrop et Addo Ashong 1982, Kucera 1985, Poulsen et al. 1997 Benabou 2008) (figure 130a). A l'échelle microscopique, des fissures issues de la propagation de type TL dans les bandes de cisaillement sont visibles (figure 130b). La variation d'angles d'inclinaison est justifiée par la différence au niveau de la structure anatomique du matériau bois (arrangement moléculaire, densité...) (François 1992).

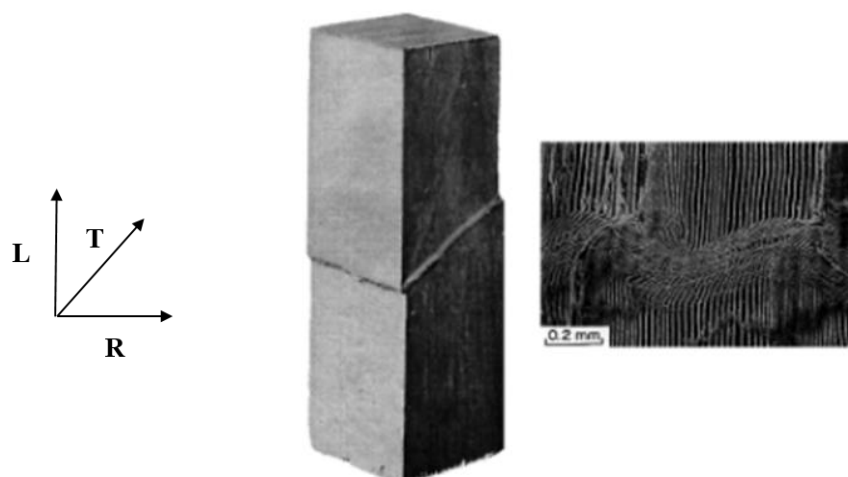


Figure 130 : Effondrement de l'éprouvette en compression longitudinale par flambement local des fibres créant une bande de cisaillement (a) bande de cisaillement observée sur une éprouvette, (b) bande de cisaillement observée au niveau cellulaire (d'après Navi et Heger 2005)

Les études dans la littérature ont montré que pour certaines essences présentant de larges contrastes de densité au niveau des cernes de croissance à l'interface BI/BF, des fines fissures se développent parallèlement aux cernes (Baruska et Kucera 1985). La propagation et la coalescence de ces fissures au cours de la compression peuvent provoquer, si elles se rejoignent, une rupture à l'interface BI/BF, appelée aussi délamination. Afin de bien définir la propagation d'une fissure dans le bois, nous avons adopté, dans le chapitre précédent (partie I du Chapitre 3), un système de désignation des six types de fissuration (figure 87b page 88). Ce système sera également utilisé dans ce chapitre.

La courbe charge-déplacement ($P-\delta$) du matériau bois sollicité en compression parallèle au fil est composée généralement de quatre parties (figure 131). Certains auteurs (Moran et al. 1995, Poulsen et al. 1997) ont relié ces parties aux différentes phases de formation de la bande de cisaillement (figure 131). En effet, la courbe comporte une partie linéaire représentant le comportement linéaire du matériau. La deuxième partie commence lorsque la courbe devient non-linéaire jusqu'à que la charge atteigne une valeur maximale. Elle correspond au micro-flambement des fibres et à la microfissuration par cisaillement au niveau des interfaces longitudinales des constituants hétérogènes (*incipient kinking*). La troisième partie correspond à la chute de la charge où les différentes microbandes de cisaillement se réunissent à l'échelle microscopique pour former une seule bande de cisaillement à l'échelle macroscopique (*transient kinking*). La dernière partie correspond au plateau où la charge demeure quasi-constante. A ce stade, la bande de cisaillement continue à s'élargir.

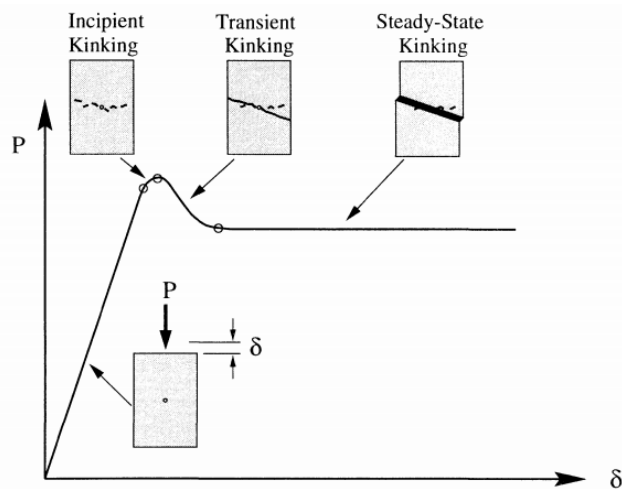


Figure 131 : Différents stages de formation de la bande de cisaillement en fonction de la courbe force-déplacement (d'après Poulsen 1997)

Dans ce chapitre, le comportement en compression parallèle au fil de trois essences de bois est étudié. Les essais sont effectués sur des éprouvettes de dimensions 20×20×60 mm placées entre deux plateaux en acier. Un film de téflon est placé entre les deux plateaux et l'éprouvette (cf. Chapitre 2 partie III.3.2 figure 61 page 64). Deux capteurs d'émission acoustique sont utilisés pour recueillir la réponse acoustique de la bande de cisaillement dans chaque stade de sa formation ainsi que pour discriminer les différents mécanismes qui interviennent lors de l'endommagement du bois en compression.

II- Endommagement du Douglas sous sollicitation de compression longitudinale

II.1- Introduction

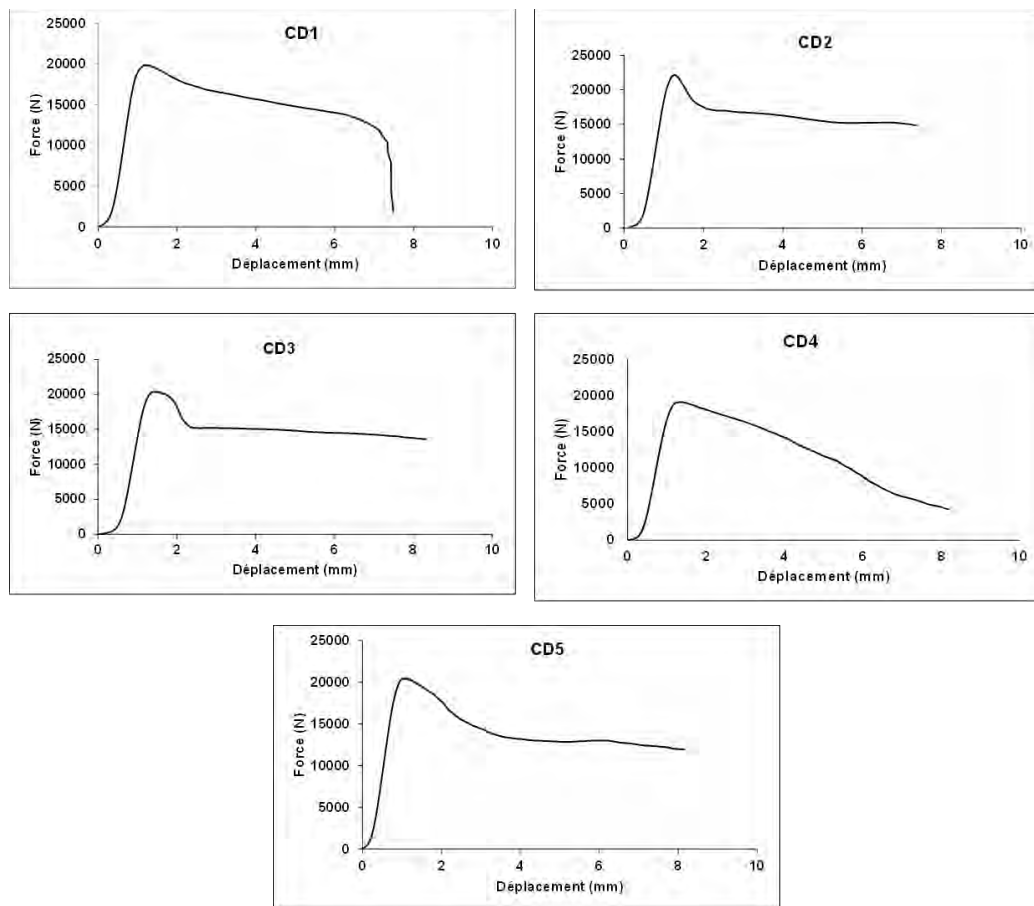
Dans cette partie, on s'intéresse à l'endommagement du bois de Douglas sous sollicitation de compression longitudinale. Le comportement et les propriétés mécaniques de cinq éprouvettes ainsi que leurs faciès de rupture sont analysés en premier lieu. Ensuite, une éprouvette représentative du lot est sélectionnée pour étudier sa réponse acoustique. Les signaux recueillis pendant l'endommagement font l'objet d'une analyse statistique multi-variables afin de dissocier les différentes classes de signaux. Ces études conduisent non seulement à l'association de la réponse acoustique à des mécanismes d'endommagement, mais aussi à la description du scénario de l'endommagement au cours de l'essai de compression dans le sens du fil au sein des éprouvettes de Douglas.

II.2- Comportement en compression et propriétés mécaniques associées

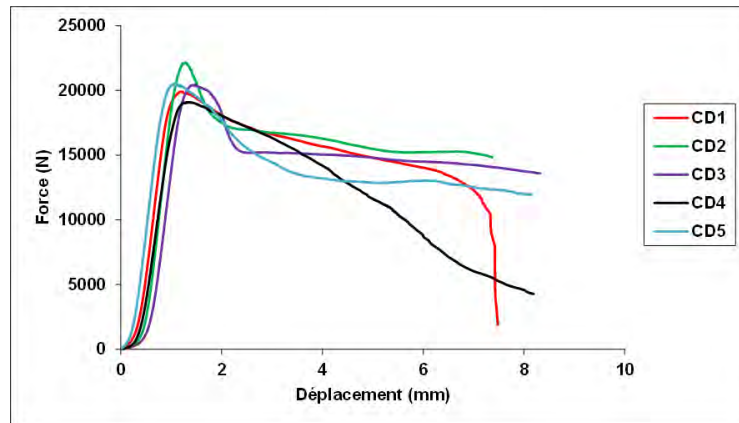
La figure 132a montre les courbes force-déplacement ($F-\delta$) de cinq éprouvettes de Douglas sollicitées en compression parallèle au fil. La force maximale et la rigidité en terme de pente de la partie linéaire semblent assez proches d'une éprouvette à l'autre (figure 132b). Par contre, l'allure de ces courbes peut se répartir en deux groupes. Le groupe 1 comprend les éprouvettes CD2, CD3 et CD5 dont l'allure est quasiment identique. En général, l'allure de ces courbes peut être décrite ainsi : une partie linéaire est observée au début de la sollicitation. Ensuite, un comportement non linéaire de courte durée est distingué juste avant que la force atteigne sa valeur maximale. Après le pic, la force chute rapidement en fonction du déplacement imposé pendant une période relativement courte, la diminution de force se poursuit pendant une durée plus longue, mais avec une vitesse beaucoup plus lente. Ceci forme un palier très légèrement incliné, où le comportement est typiquement ductile. Ce type

d'allure correspond bien à celle observée par d'autres chercheurs dans la littérature (figure 131).

Le groupe 2 comprend l'éprouvette CD1 et CD4. L'allure de la courbe (F- δ) de l'éprouvette CD1 est similaire de celle des éprouvettes CD2, CD3 et CD5, seulement la chute de force après sa valeur maximale est moins brutale et la pente du palier est plus importante. De plus la rupture finale intervient brutalement avec une chute de force très importante, où le déplacement à la rupture est faible par rapport aux quatre autres éprouvettes. En ce qui concerne l'éprouvette CD4, elle affiche un comportement complètement différent par rapport aux autres éprouvettes de Douglas. En effet, après avoir atteint sa valeur maximale, la force diminue avec une vitesse pratiquement constante jusqu'à la rupture finale. Par contre la pente de la partie linéaire et la force maximale de l'éprouvette CD4 semblent assez proches de celles des autres éprouvettes. Cette différence de comportement de l'éprouvette CD4 peut être due à l'hétérogénéité locale de la structure du bois, à la forme géométrique de l'éprouvette, ou/et à une installation de l'éprouvette non centrée par rapport à la charge appliquée.



(a)



(b)

Figure 132 : Courbes force-déplacement du lot d'éprouvettes de Douglas sollicitées en compression parallèle au fil (a) les cinq courbes isolées (b) les cinq courbes superposées

A partir de ces courbes expérimentales, le module d'Young et la contrainte maximale en compression longitudinale peuvent être mesurés sur chaque éprouvette. Leurs valeurs sont regroupées dans le tableau 24 et comparées avec les résultats de la littérature. On voit que la dispersion des résultats est très faible : elle est inférieure à 5% pour le module d'élasticité et inférieure à 6% pour la contrainte maximale. De plus, les résultats obtenus dans cette étude sont en très bonne concordance avec ceux présentés dans la littérature.

Tableau 24 : Propriétés mécaniques mesurées sur les éprouvettes de Douglas sollicitées en compression longitudinale

Eprouvettes	Modules d'Young mesurés (GPa)	Module d'Young (GPa) (littérature)	Contraintes maximales (MPa)	Contrainte maximale (MPa) (littérature)
CD1	12,0	11,0-13,2*	49,7	42,0-68,0*
CD2	12,7		55,2	
CD3	11,5		50,8	
CD4	11,4		47,2	
CD5	12,1		51,1	
Moyenne	11,9		50,8	
Coefficient de variation	±4,3 %		±5,7 %	

*Sell et Kropf 1990. Propriétés et caractéristiques des essences de bois

II.3- Observation des faciès de rupture

Afin de comprendre ce qui se passe pendant les essais de compression, nous avons effectué une observation visuelle des éprouvettes rompues.

Le faciès de rupture de l'éprouvette CD1 affiche principalement deux types de rupture (figure 133). On peut distinguer un écrasement des fibres par matage au niveau des extrémités de l'éprouvette. Il est beaucoup plus visible au pied de l'éprouvette. On constate aussi une fissure au sein du BI d'un cerne de croissance qui couvre totalement un plan (TL). Par rapport à la définition du système de propagation de fissure décrit par la figure 87b page 88, cette fissure pourrait résulter d'une fissure dans le plan radial au niveau du bois initial (BI) propageant dans le sens tangentielle et longitudinal, de type RT et RL.

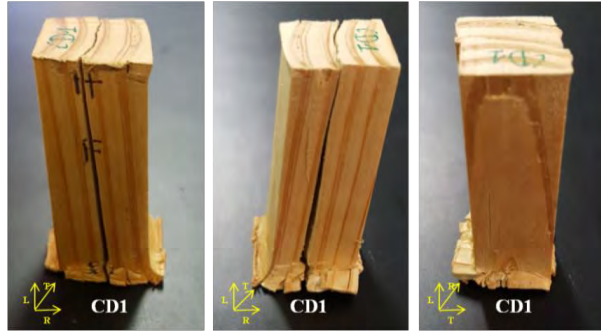


Figure 133 : Faciès de rupture de l'éprouvette CD1

Pour les éprouvettes CD2, CD3 et CD5 (figures 134-136), les endommagements par matage et la propagation longitudinale de la fissure du type RT et RL sont beaucoup moins étendues par rapport à celles de l'éprouvette CD1. Par contre, une bande de cisaillement est beaucoup plus visible. Cette bande est perpendiculaire au fil sur la face LR et inclinée par rapport à la direction du fil sur la face LT. De plus, des multi-fissurations longitudinales de type RL et de type TL sont observées. La propagation longitudinale de ces fissures est limitée par la bande de cisaillement.

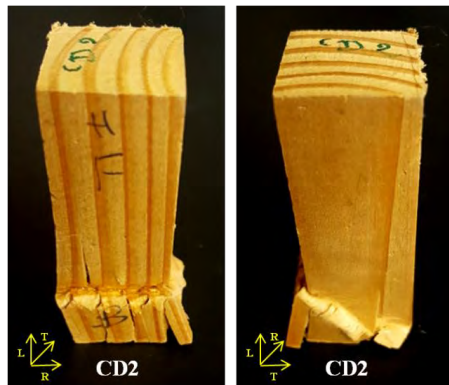


Figure 134 : Faciès de rupture de l'éprouvette CD2

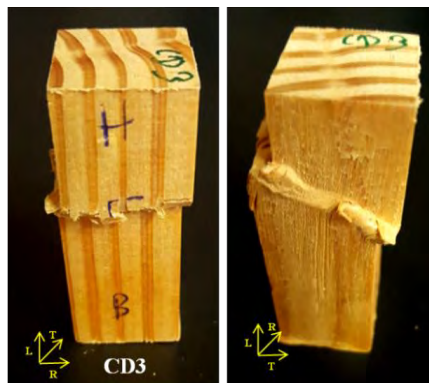


Figure 135 : Faciès de rupture de l'éprouvette CD3

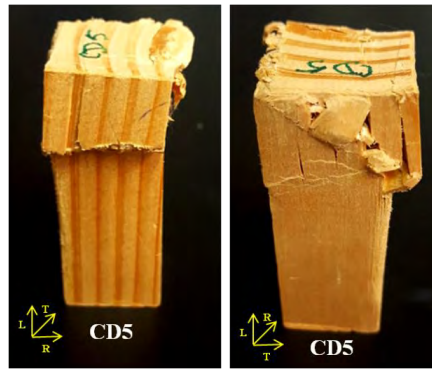


Figure 136 : Faciès de rupture de l'éprouvette CD5

Sur les faciès de rupture de l'éprouvette CD4, on peut constater un pliage global de l'éprouvette (figure 137) accompagné par des multi-fissurations. On observe une propagation importante des fissures de type TL et TR. De plus, la propagation des fissures de type RL et RT est aussi bien présente. L'endommagement par matage aux extrémités de l'éprouvette CD4 existe mais est moins visible que pour d'autres éprouvettes.

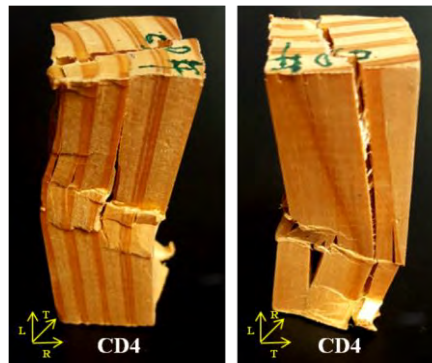


Figure 137 : Faciès de rupture de l'éprouvette CD4

Ces observations permettent de faire un lien direct entre l'allure des courbes ($F-\delta$) et les faciès de rupture des éprouvettes. Les éprouvettes CD2, CD3 et CD5 ont des faciès de rupture très semblables et leur comportement en compression se manifeste par une courbe ($F-\delta$) de même allure (figure 132). Les éprouvettes CD1 et CD4 ont des faciès de ruptures particuliers, ce qui est confirmé par leurs courbes ($F-\delta$) expérimentales différentes (figure 132). L'éprouvette CD2 est sélectionnée pour l'analyse de sa réponse acoustique.

II.4- Mécanismes de rupture des éprouvettes de Douglas sollicitées en compression parallèle au fil

La réponse à la compression dans le sens des fibres est influencée significativement par la structure microscopique du matériau bois. En compression, la contrainte de cisaillement parallèle à la charge peut être induite au niveau de l'interface trachéide/trachéide, trachéide/cellule de parenchyme (rayons) et/ou au niveau de l'interface BI/BF à cause de l'hétérogénéité des propriétés mécaniques de ces constituants. La faible résistance à ces interfaces favorise la formation de microfissures de cisaillement dans le plan (LT) ou/et (LR). Leur propagation par coalescence des microfissures forme une fissure longitudinale et favorisent le flambement local. Ce dernier en retour provoque une forte contrainte de pelage (mode I) au niveau de la pointe de la fissure ce qui accélère la propagation de la fissure longitudinale.

En plus, il est connu que les rayons ligneux (cellules radiales) et les canaux résinifères provoquent des perturbations locales au niveau de l'alignement des fibres longitudinales et initient une micro-instabilité locale (Kucera 1982, Bariska 1985, Poulsen 1997, Gong et Smith 2000, Da Silva 2007, Benabou 2016). Ce micro-flambement est souvent accompagné par des microfissures à l'interface entre les trachéides longitudinales et les cellules radiales, donc situées dans le plan (LR). Lors de l'augmentation de la charge en compression, les microfissures au niveau des rayons sont déjà ouvertes et propagent avec une forte participation du mode I.

Lorsque la propagation des fissures de type TL et de type RL débouche aux extrémités de l'éprouvette, les bras séparés par ces fissures se clivent en mode d'ouverture (mode I) sous le chargement de compression. Donc le glissement entre les extrémités de l'éprouvette en bois et les plateaux du montage de compression se produit sous l'effet de sollicitation de flexion en formant un faciès de rupture de type « matage ».

Théoriquement en compression longitudinale, la contrainte de cisaillement maximale dans le plan (LR) et dans le plan (LT) s'oriente à 45°. Les microfissures au niveau des rayons se situent au plan tangentiel, elles sont plus intenses dans le bois initial que dans le bois final. Après apparition de ces microfissures, elles sont sollicitées en mode mixte I+II et elles propagent plutôt le long du fil (propagation de type TL). Au fur et à mesure de la multiplication, la coalescence et la propagation de ces fissures dans l'éprouvette, la résistance au cisaillement au plan (LT) est affaiblie, surtout dans le bois initial. Sous la contrainte de cisaillement maximale, cet endommagement du bois favorise le glissement par cisaillement entre les parties supérieure et inférieure de l'éprouvette tout au long d'une ligne inclinée sur la face (LT). La bande de cisaillement ainsi formée s'oriente par rapport à la direction du fil d'un angle, qui n'est pas forcément de 45°. En effet cet angle ainsi que l'épaisseur de la bande dépendent des défauts d'alignement dus aux rayons de chaque essence. Pour les bois résineux, l'angle d'inclinaison varie entre 23° et 60° selon la littérature (Wadrop et Addo Ashong 1982, Kucera 1985, Poulsen et al. 1997, Benabou 2008). Dans notre étude, ils sont mesurés à 30°, 40° et 35° pour CD2, CD3 et CD5, respectivement. Ces résultats sont cohérents avec ceux dans la littérature.

Cependant, sur la face (LR), la ligne de rupture provoquée par la formation et l'élargissement de la bande de cisaillement est plutôt horizontale. Elle résulte de la coalescence transversale des microfissures dans le sens T, accompagnée forcément par la rupture des fibres dans le BI et dans le BF. En effet, sur la face (LR), le bois initial et le bois final sont forcément alternés, la distribution des contraintes et des résistances deviennent plus hétérogènes. La propagation et la coalescence des microfissures dans le sens de la contrainte de cisaillement maximale (45° par rapport au fil) sont plus ou moins bloquées. De plus, les microfissures au niveau des rayons sont parallèles à la direction radiale, donc la résistance au cisaillement sur la face (LR) est moins faible.

Par conséquent, les différentes orientations de la bande de cisaillement sur la face (LT) et (LR) sont provoquées par l'anisotropie du bois introduite par les cernes de croissance et aussi par l'existence de l'interface fibre/rayon sur la face (LR), lieu de faiblesse en compression. La ligne de rupture inclinée par rapport à la direction du fil sur la face (LT) résulte du glissement du bois le long du plan de cisaillement et de la propagation des microfissures de type TL, tandis que la ligne de rupture sur la face (LR) est plutôt perpendiculaire au fil, cela vient de la propagation transversale de type TR.

Finalement, les mécanismes d'endommagement cités ci-dessus sont plus ou moins accompagnés de rupture de fibres. Cette dernière est observée toujours sur les faciès de rupture de toutes les éprouvettes de douglas testées.

II.5- Analyse de l'activité acoustique

La figure 138 représente l'évolution de la force de compression appliquée à l'éprouvette CD2 associée à l'activité acoustique en fonction du temps. L'activité acoustique est représentée par le nombre de salves cumulées (figure 138a), l'amplitude (figure 138b) et l'énergie cumulée (figure 138c). En se basant sur l'allure de la courbe de la charge et la réponse acoustique, quatre phases peuvent être distinguées :

Phase I : Phase linéaire élastique

La phase I représente le comportement élastique linéaire où peu d'endommagement est décelé car quelques signaux d'EA seulement ont été enregistrés (figure 138a).

Phase II : Phase d'endommagement par microfissuration

Cette phase débute lorsque les signaux d'EA apparaissent d'une manière plus visible et se termine lorsque la charge atteint une valeur maximale. Ici le comportement non-linéaire de la courbe ($F-\delta$) devient de plus en plus visible. La réponse acoustique dans cette phase est caractérisée par un faible nombre de salves cumulées (figure 138a) ainsi qu'une faible énergie cumulée (figure 138c). L'amplitude des signaux enregistrés dans cette phase varie entre 35 dB et 80 dB (figure 138b).

Dans la phase II, les événements enregistrés signifient que l'endommagement commence à se développer au sein du matériau. Vu que l'activité acoustique est peu nombreuse et peu énergétique, elle peut être générée par la déformation permanente en compression (rides de pliage dans les parois des trachéides), de la microfissuration par cisaillement au niveau des interfaces longitudinales des constituants hétérogènes, mais surtout par le micro-flambement au niveau des rayons/fibres. Ce dernier est provoqué par les défauts de rectitude des fibres au niveau des rayons radiaux (figure 129), un phénomène bien connu dans un bois soumis à la compression dans le sens du fil (Da Silva 2007, Benabou 2008). Ces microfissures se situent principalement dans le plan (LR) et se propagent de préférence dans la direction longitudinale (L) à cause de la participation du mode I due à la contrainte de pelage. Au fur et à mesure de la propagation des microfissures de type TL, la densité de ces microfissures augmente, le matériau s'assouplit de plus en plus, donc la courbe devient non linéaire. Ce mécanisme forme une bande de cisaillement microscopique (incipient kinking), phénomène observé par Poulsen (1997).

Phase III : Déclenchement de la bande de cisaillement

Cette phase commence avec la chute rapide de l'effort et se termine quand la vitesse de diminution de charge devient très faible. Le nombre de salves cumulées commence à augmenter légèrement au début de cette phase, puis se stabilise (figure 138a). A $t=50s$, le point particulier marque le redémarrage de l'augmentation des salves cumulées, dont la vitesse reste quasiment constante jusqu'à la fin de la phase III (figure 138a). L'amplitude des signaux avant le point particulier varie entre 35 dB et 60 dB. A partir du point particulier, des événements de haute amplitude (99dB) sont enregistrés jusqu'à la fin de la phase (figure 138b). Quant à l'énergie cumulée, elle commence à augmenter d'une façon linéaire dès le début et jusqu'à la fin de cette phase (figure 138c).

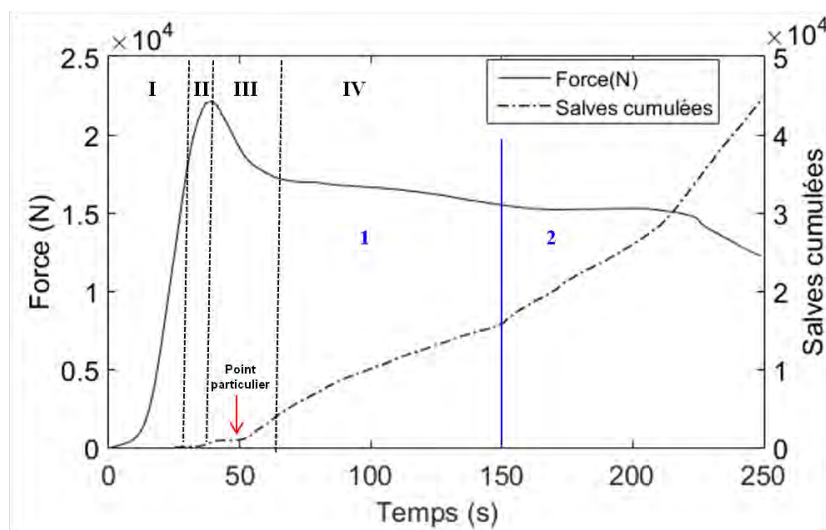
En effet, au début de la chute de charge avant le point particulier, l'absence de signaux énergétiques pourrait être expliquée par la propagation de microfissures à l'interface fibre/rayon dans le BI. La partie muette observée dans cette phase correspond à un découplage temporaire du capteur lorsque les fibres commencent à se plier en dessous de lui. Après le point particulier, le glissement de la zone endommagée démarre sous la contrainte de cisaillement maximale dans une direction inclinée par rapport à la direction du fil. Cela

concerne le début de la formation de la bande de cisaillement. Ce phénomène s'accompagne de la propagation des fissures, la rupture des fibres et le flambement des mèches des fibres formées par la fissuration. Par conséquent, l'activité acoustique devient plus importante et plus énergétique.

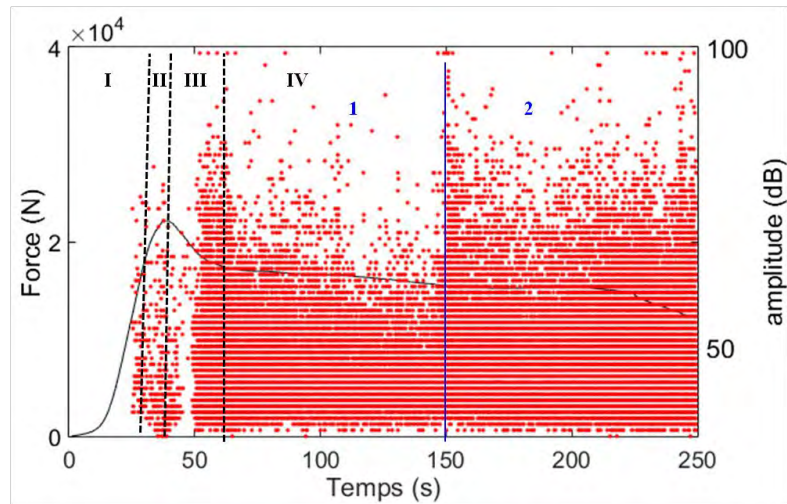
Phase IV : Elargissement de la bande de cisaillement macroscopique

La majorité de cette phase correspond au palier de la courbe où la charge continue à diminuer mais d'une façon très lente ce qui forme une droite légèrement inclinée. A la fin, la charge chute jusqu'à la rupture finale si l'essai n'est pas arrêté. En terme de réponse acoustique, cette phase peut être divisée en deux parties. Partie 1 où le nombre de salves cumulées continue à augmenter d'une manière linéaire (figure 138a). Les amplitudes sont élevées (99dB) au début de la partie 1 puis elles diminuent légèrement (figure 138b). L'énergie cumulée continue à augmenter d'une manière continue (figure 138c). La partie 2 de cette phase commence à $t=150s$ avec une augmentation importante au niveau du nombre de salves cumulées ainsi que de l'énergie cumulée. La croissance de ces deux paramètres (salves cumulées et énergie cumulée) devient exponentielle. Au niveau des amplitudes, la phase IV-2 commence par l'enregistrement de salves de très hautes amplitudes (figure 138b).

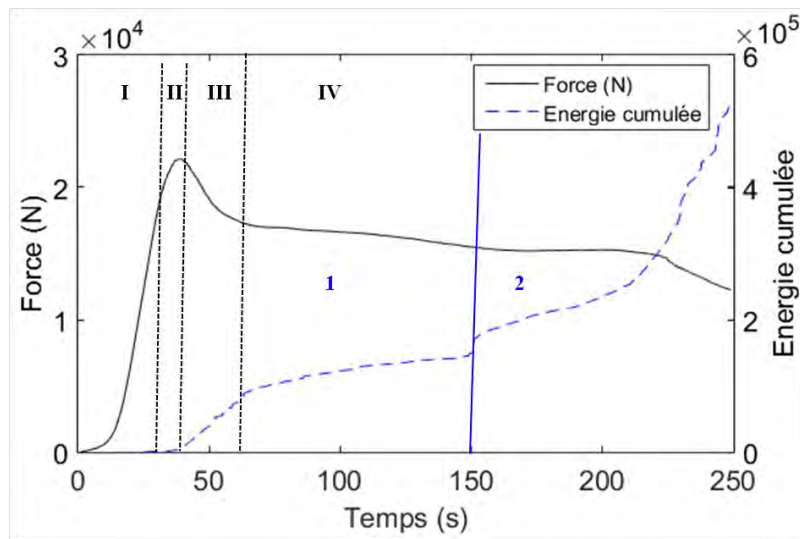
La phase IV-1 traduit le comportement d'écoulement du matériau à cause de la formation et l'élargissement de la bande de cisaillement. Les signaux enregistrés proviennent surtout du glissement par cisaillement, accompagné de la propagation des fissures aussi bien dans la bande de cisaillement et en dehors de cette bande aussi que de rupture de certaines fibres. Puisque cette bande de cisaillement dans l'éprouvette CD2 se situe à proximité de son pied, tout au long de sa formation et de son élargissement ce processus est accompagné par le glissement entre les surfaces de l'éprouvette et les plateaux en acier, surtout au pied de l'éprouvette. Dans la phase IV-2, la fissuration continue à avoir lieu dans l'éprouvette et le glissement entre les parties supérieure et inférieure de l'éprouvette continue et aboutit à la rupture des fibres dans le BI et dans le BF. A la fin, le glissement au niveau de la bande de cisaillement accélère et conduit à la rupture finale. Ces mécanismes sont accompagnés par une augmentation importante du nombre de salves et de l'énergie cumulée.



(a)



(b)



(c)

Figure 138 : Evolution de la charge et de l'activité acoustique en fonction du temps (éprouvette CD2) (a) salves cumulées (b) répartition des amplitudes (c) énergie cumulée

II.6- Classement des données acoustiques

Dans cette partie qui a pour objectif de corréler les classes de signaux d'EA avec les mécanismes d'endommagement dans le bois de Douglas en compression parallèle au fil, notre analyse est basée sur l'activité acoustique enregistrée par le capteur qui recueille le maximum de signaux. Dans ce cadre les signaux enregistrés par le capteur R6 (1), positionné au niveau du pied de l'éprouvette, sont analysés (figure 139).

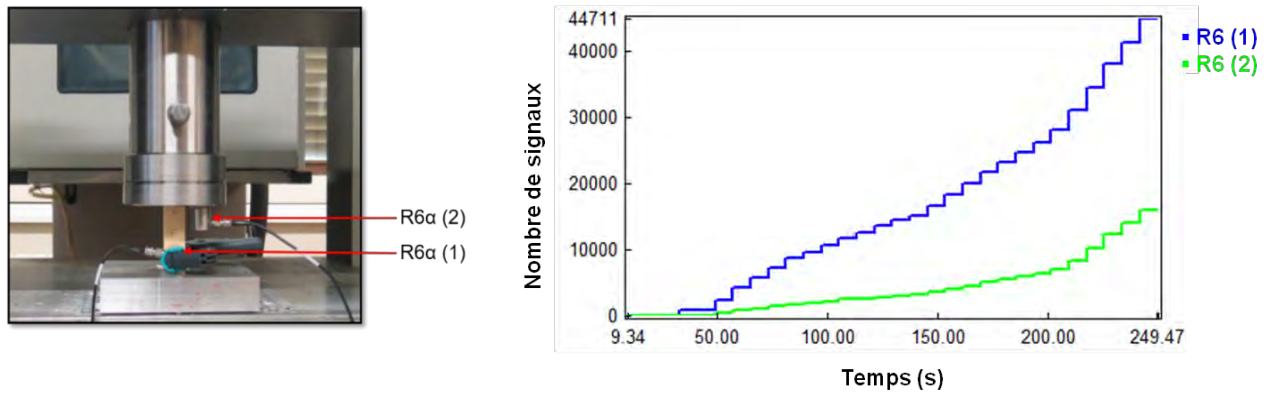


Figure 139 : (a) Positions des capteurs (b) Nombre de signaux enregistrés par chaque capteur (éprouvette CD2)

A- Optimisation du nombre de classes

Les critères statistiques permettant d'estimer le nombre de classes optimal sont le coefficient de Davies et Bouldin (D&B) et le coefficient Tou (annexe 3). La figure 140 montre l'évolution de ces critères en fonction du nombre de classes. Généralement, le nombre de classes est optimal lorsque le coefficient de Davies et Bouldin est minimisé et le coefficient Tou est maximisé. Donc, selon les résultats présentés sur la figure 140, le nombre de classes optimal est égal à 2

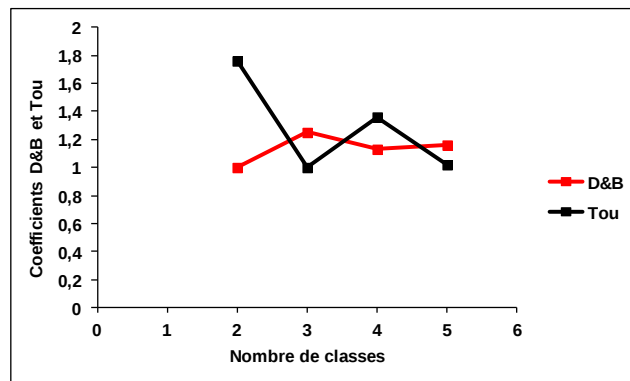


Figure 140 : Coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes (éprouvette CD2)

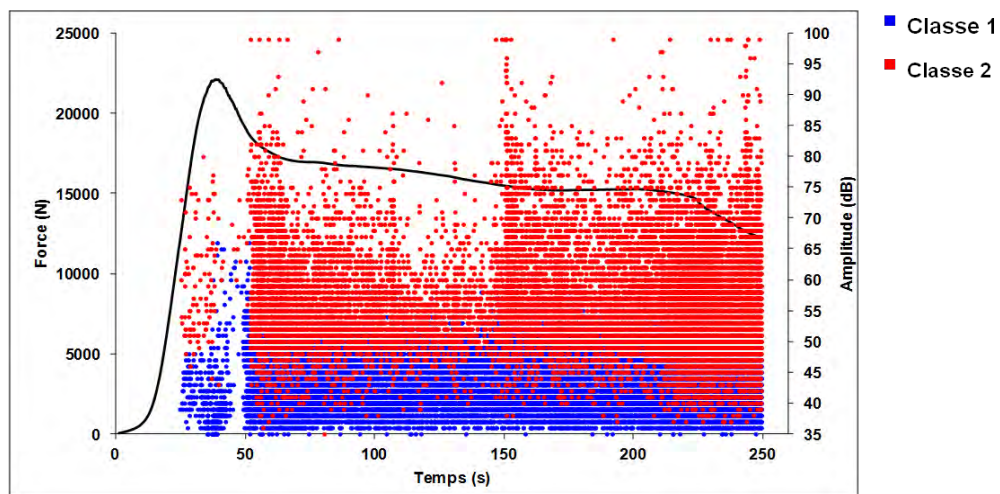
B- Résultats de la classification par la méthode des k-moyennes

Les résultats de la classification des signaux recueillis lors de l'endommagement de l'éprouvette CD2 sont présentés au regard de l'amplitude des salves sur la figure 141. Les deux classes sont superposées l'une sur l'autre du début jusqu'à la fin de l'essai.

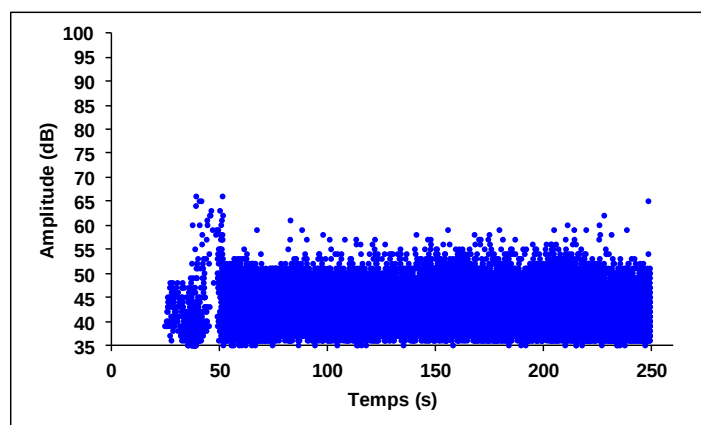
La classe 1 (classe bleue) contient 61,4% des signaux. Elle est caractérisée par une faible amplitude, une faible énergie et une durée moyenne (Tableau 25). Cette classe augmente d'une manière importante à peu près au moment où l'on arrive au début de la phase IV-1 où se situe le début du palier sur la courbe ($F-\delta$) (figure 141a-b). Ceci coïncide avec la formation et le début de l'élargissement de la bande de cisaillement macroscopique, où les fibres flambent localement et tournent pour prendre une forme de « S ». Ensuite, on constate une évolution constante de la classe bleue jusqu'à la fin de l'essai (figure 140a-b). En ce qui concerne les signaux enregistrés au début de cette classe, avant $t=50s$, ils peuvent être générés lors de la mise en place de l'éprouvette. En effet, au début du chargement, entre la feuille de téflon collée sur le plateau inférieur en acier et la surface de l'éprouvette, un léger glissement peut avoir lieu (la couche en téflon permet de réduire les frottements). Comme mentionné précédemment, quand les fissures débouchent sur la surface inférieure de l'éprouvette, les

bras séparés par ces fissures se clivent sous la sollicitation de compression. Ce processus est forcément accompagné non seulement par la fissuration de type TL ou RL, mais également par le glissement entre la surface de l'éprouvette et les plateaux en acier, surtout au pied de l'éprouvette (matage). Donc, on peut dire que la classe bleue appartient à la signature acoustique qui traduit le glissement (le frottement) entre les plateaux du montage de compression et les extrémités de l'éprouvette. La signature acoustique de la classe de frottement concorde avec celle identifiée dans les travaux de Broniewski et al. (1994), Ceaulescu-Ersen (2004) et d'Ito et Enoki (2007) caractérisée par une faible amplitude et une durée moyenne. La forme d'un signal type de la classe bleue et sa Transformée de Fourier (TF) associée sont présentés sur la figure 142. La TF montre un pic fréquentiel à 67 kHz qui correspond à la valeur moyenne du pic fréquentiel des signaux de la classe bleue. Les autres pics observés sur le TF justifient la valeur moyenne du barycentre fréquentiel qui est de l'ordre de 303 kHz.

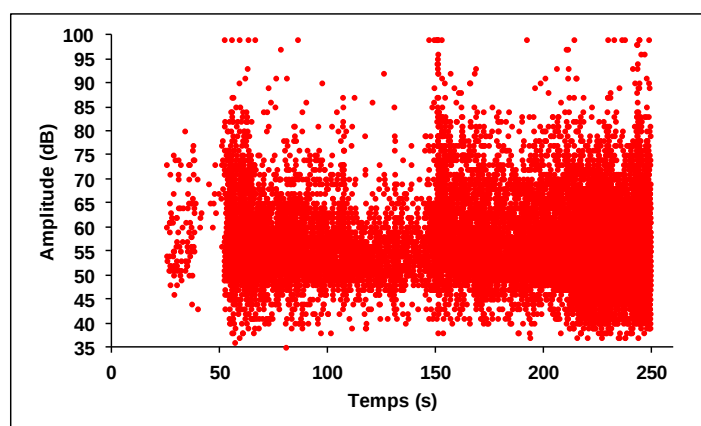
Quant à la classe rouge, elle démarre aussi dès le début de la phase II et contient 38,6% des signaux (figure 141a et 141c). La signature acoustique de cette classe est caractérisée par une très forte énergie, une amplitude moyenne et une très longue durée (Tableau 25). Elle regroupe donc tous les mécanismes d'endommagement qui se sont produits pendant l'essai. Afin d'affiner l'analyse, nous avons décidé de refaire un classement des signaux de la classe rouge puisque sur le faciès de rupture de l'éprouvette (CD2) plusieurs types d'endommagement sont observés et qu'ils peuvent avoir des signatures acoustiques différentes (figure 134). Dans la littérature, Munoz (2015) a déjà eu recours au reclassement d'une partie de ses signaux.



(a)



(b)



(c)

Figure 141: Résultats de la classification de signaux recueillis sur l'éprouvette CD2 (a) répartition temporelle de différentes classes de signaux (b) classe bleue, (c) classe rouge

Tableau 25 : Valeurs moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs acoustiques de chaque classe de signaux recueillis sur l'éprouvette CD1

Descripteurs	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	61,4	38,6
Temps de montée (μs)	171 (144)	183 (618)
Durée (μs)	607 (615)	1027 (5989)
Amplitude (dB)	42 (4)	57 (8)
Nombre de coups	14 (73)	48 (92)
Nombre de coups au pic	5 (39)	11 (43)
Energie absolue (aJ)	97 (543)	$17 \cdot 10^3$ ($5 \cdot 10^6$)
Fréquence moyenne (kHz)	54 (31)	55 (18)
Fréquence initiale (kHz)	261 (552)	221 (727)
Fréquence de réverbération (kHz)	46 (64)	51 (35)
Pic fréquentiel (kHz)	67 (32)	66 (39)
Barycentre fréquentiel (kHz)	303 (33)	194 (33)

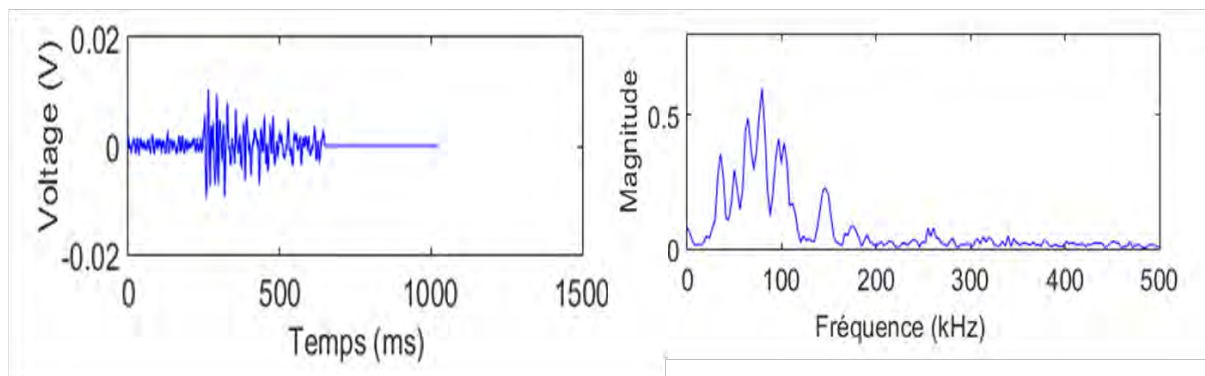


Figure 142 : Forme d'un signal type et TF associée à la classe bleue (éprouvette CD2)

Donc, dans un premier temps, les paramètres statistiques nous ont dirigés vers deux classes, puisqu'il s'agit de deux classes très différentes et très éloignées l'une de l'autre. Or, ceci n'empêche pas que dans certaines classes on peut avoir des sous classes. Basé toujours sur les deux critères de validation de Davies et Bouldin et Tou, un reclassement des signaux de la classe rouge a été réalisé. Les deux critères valident un nombre de classes égal à 3 (figure 143).

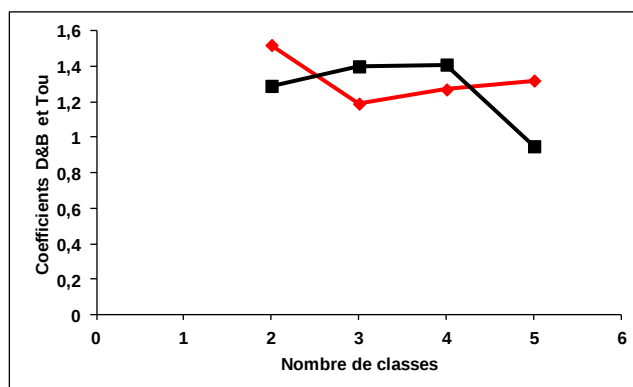


Figure 143 : Critères de validation en fonction du nombre de classes (reclassement des signaux de la casse rouge de l'éprouvette CD2)

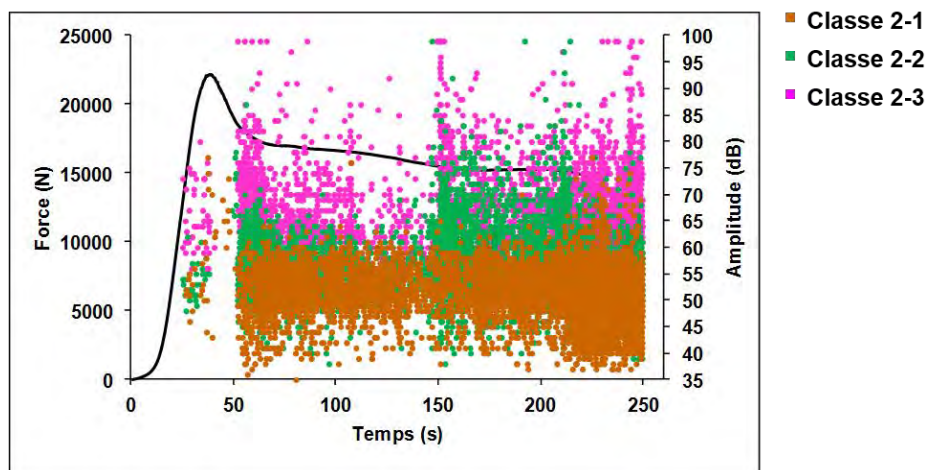
Afin d'éviter la confusion, les trois sous-classes obtenues dans la classe 2 (rouge) vont être désignées comme suit : la classe 2-1, 2-2 et 2-3. La réparation temporelle en terme d'amplitude de ces trois sous-classes de signaux est donnée sur la figure 144.

La forme des signaux de la classe 2-1 (marron) est caractérisée par une longue durée, une faible énergie, une amplitude moyenne ainsi qu'une faible fréquence (Tableau 26) (figure 145a). L'évolution de l'activité acoustique dans cette classe est quasi-constante à partir de $t=50s$, le moment d'apparition macroscopique de la bande de cisaillement.

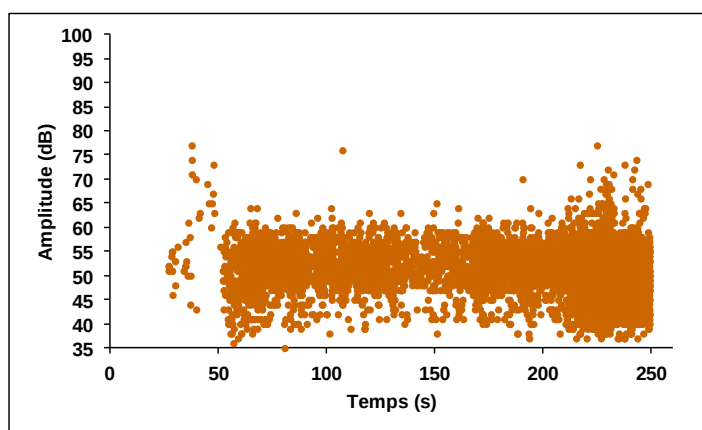
La signature acoustique de la classe 2-2 (verte) est caractérisée par une durée moyenne, une amplitude moyenne, une énergie importante ainsi qu'une fréquence élevée (Tableau 26) (figure 145b). Cette classe est quasi-superposée avec la classe 2-1 (marron). Elles se différencient au niveau de la fréquence, de la durée ainsi que de l'énergie absolue (Tableau 26). A partir de $t=150s$, on constate une intensification de la classe 2-2 (verte) par rapport à la classe 2-1 (marron) (figure 144b et 144c). A partir de cet instant, une augmentation au niveau des amplitudes des signaux de la classe 2-2 est constatée.

Quant à la classe 2-3 (rose), la signature acoustique de ses signaux est caractérisée par une longue durée, une énergie très forte, une haute amplitude et une faible fréquence (Tableau 26) (figure 145c). Cette sous-classe démarre avec une activité importante à $t=50s$, puis l'activité

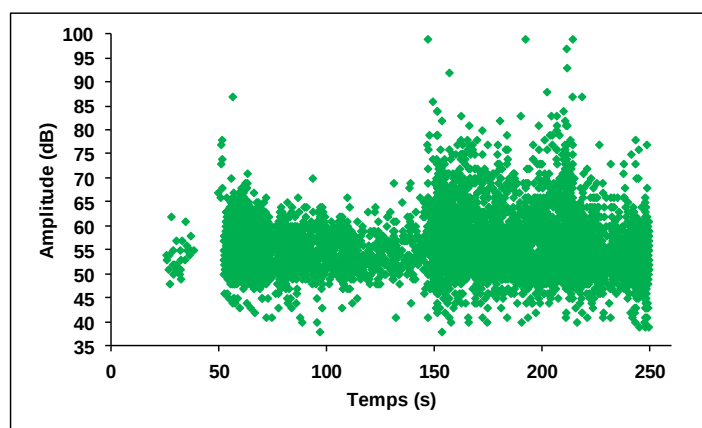
diminue pour s'intensifier de nouveau à partir de $t=150s$ et devient très importante vers la fin de l'essai (figure 144d).



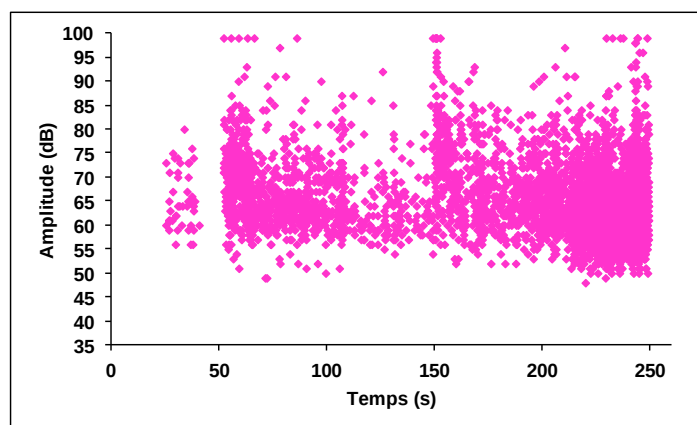
(a)



(b)



(c)

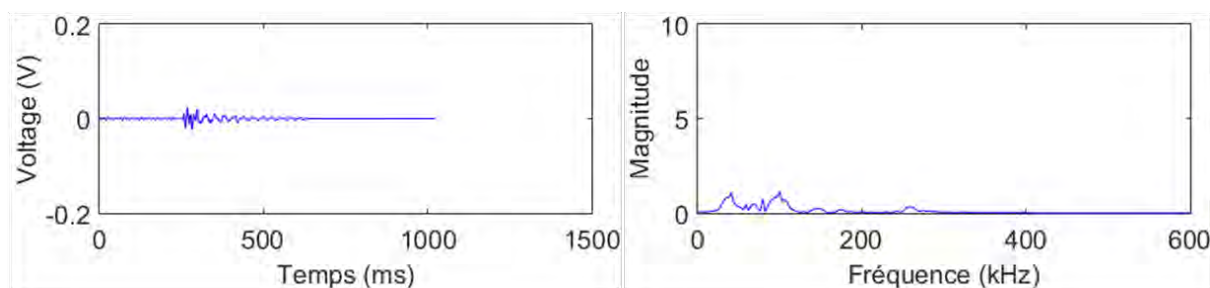


(d)

Figure 144 : Classification des sous-classes appartenant à la classe rouge de signaux recueillis sur l'éprouvette CD2 (a) répartition temporelle de trois sous-classes des signaux (b) classe 2-1, (c) classe 2-2 et (d) classe 2-3

Tableau 26 : Valeurs moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs de chaque sous-classe appartenant à la classe rouge de signaux recueillis sur l'éprouvette CD2

Descripteurs	Classe 2-1	Classe 2-2	Classe 2-3
% des signaux	40,0	32,8	27,2
Temps de montée (μs)	178 (798)	111 (580)	277 (589)
Durée (μs)	1024 (934)	608 (850)	1539 (1474)
Amplitude (dB)	51 (4)	56 (6)	65 (7)
Nombre de coups	34 (120)	40 (38)	76 (85)
Nombre de coups au pic	9 (60)	8 (32)	16 (18)
Energie absolue (aJ)	955 (4278)	$26 \cdot 10^3$ ($95 \cdot 10^4$)	$5,8 \cdot 10^5$ ($9 \cdot 10^6$)
Fréquence moyenne (kHz)	44 (12)	72 (19)	50 (13)
Fréquence initiale (kHz)	186 (439)	313 (914)	187 (799)
Fréquence de réverbération (kHz)	40 (12)	69 (53)	47 (14)
Pic fréquentiel (kHz)	40 (16)	105 (33)	59 (39)
Barycentre fréquentiel (kHz)	206 (25)	215 (24)	148 (22)



(a)

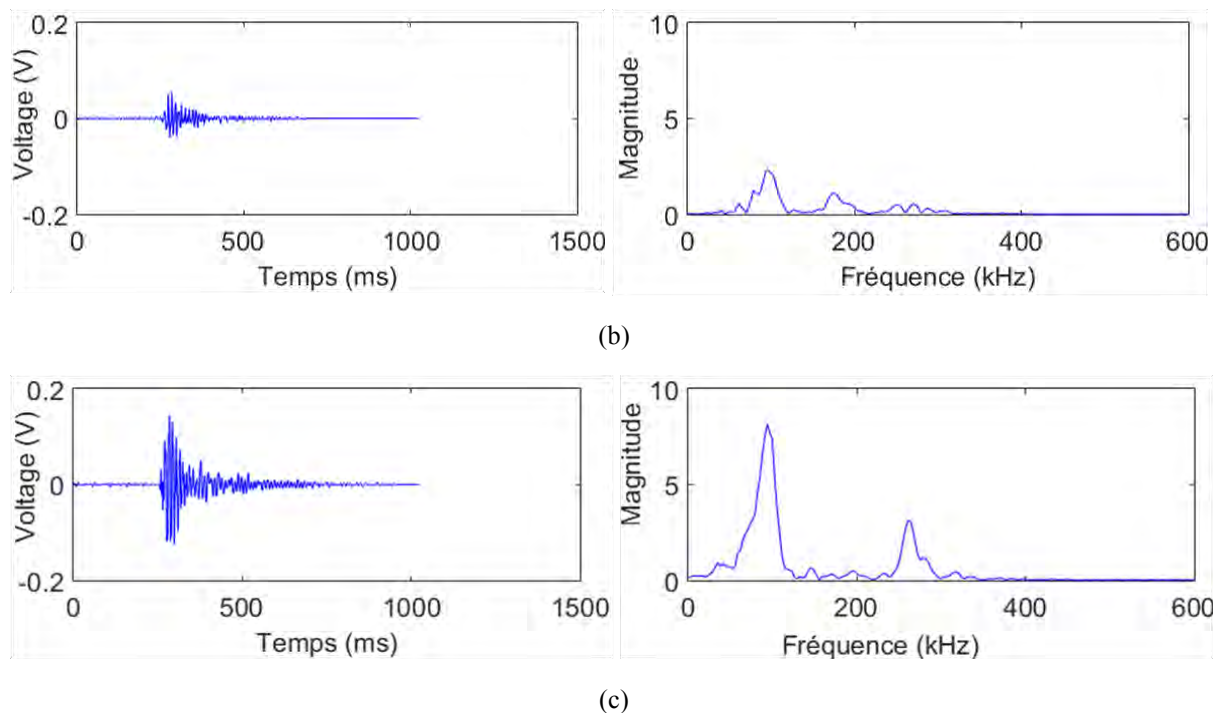


Figure 145 : Formes typiques des signaux de (a) classe 2-1 (marron), (b) classe 2-2 (verte) et (c) classe 2-3 (rose)

C- Labellisation des trois sous-classes appartenant à la classe rouge

Pour labelliser les sous-classes d'endommagement identifiées précédemment, on va se baser principalement sur des observations réalisées sur les faciès de rupture de l'éprouvette CD2. Donc, l'attribution de ces sous-classes à des mécanismes spécifiques reste une hypothèse.

Les classes 2-1 et 2-2 sont quasiment superposées durant l'essai. Or, comme on l'a évoqué précédemment, une différence énergétique entre les deux sous-classes ainsi qu'une différence fréquentielle sont observées. En observant les faciès de rupture de l'éprouvette CD2, on constate que l'orientation de la ligne de rupture provoquée par la bande de cisaillement sur la face (LR) est différente à celle sur la face (LT). La première est perpendiculaire et la dernière est inclinée par rapport à la direction du fil. Or, les microfissures au plan (LT) sont initiées par un micro-flambement à l'interface entre les trachéides longitudinales et les cellules radiales, où la participation du mode I, le mode le plus critique, est majoritaire. En effet, au fur et à mesure du glissement relatif entre les parties supérieure et inférieure de l'éprouvette, dans la sollicitation de ces microfissures, le rapport entre le mode II et le mode I devient de plus en plus important, ce qui ralentit la propagation. Donc, l'évolution de l'activité acoustique pourrait être constante tout au long de l'essai et ne pas subir d'augmentation particulière puisque les fibres sont sensés être pliées dans le plan (LT). Or, l'évolution de l'activité acoustique dans la classe marron est régulière et constante tout au long de l'essai (figure 144b). Par conséquent, la fissuration de type RL (fissuration longitudinale) dans et en dehors de la bande de cisaillement peut correspondre à cette classe (marron).

Quant à la face (LR), la ligne de rupture issue du glissement de la bande de cisaillement est horizontale. Cela résulte de la coalescence et de la propagation des microfissures dans le sens tangentiel, donc de type RT. Elle est accompagnée forcément par la rupture des fibres dans le bois initial d'abord, puis dans le bois final (figure 146). De plus la fissuration de type RT a aussi été observée en dehors de la bande de cisaillement (figure 146). Ce phénomène peut très bien être corrélé avec l'augmentation importante observée au niveau de l'activité acoustique

dans la classe 2-2 (verte) à partir de $t=150s$ (figure 144c). Donc, on peut suggérer que la classe 2-2 peut être attribuée au phénomène de coalescence transversale des microfissures de type RT par cisaillement au niveau de la bande de cisaillement et aussi en dehors de cette bande.

En ce qui concerne la classe 2-3 (rose), elle s'exprime par des salves de plus hautes amplitudes à partir de $t=50s$. Ces salves pourraient être attribuées à la rupture des fibres, car les signaux de cette classe sont très énergétiques. La présence de la classe rose durant l'essai, de la phase II jusqu'à la phase IV-2, permet de dire que tous types de fissuration s'accompagnent de rupture de fibres. Cette dernière peut être provoquée par la contrainte en tension à la pointe des microfissures initiées par micro-flambement à la phase II, par la contrainte de cisaillement dans la bande de cisaillement et par la contrainte en tension de flexion dans la zone de matage à la phase III et IV (figure 146)

Il est intéressant de noter que l'évolution de l'activité acoustique de la classe verte (figure 144c) et celle de la classe rose (figure 144d) sont en concordance (intensification d'activité suivant la même évolution temporelle). Ceci explique qu'on peut attribuer la classe verte aux microfissurations transversales qui amènent lors de l'évolution de cisaillement à la rupture des fibres.

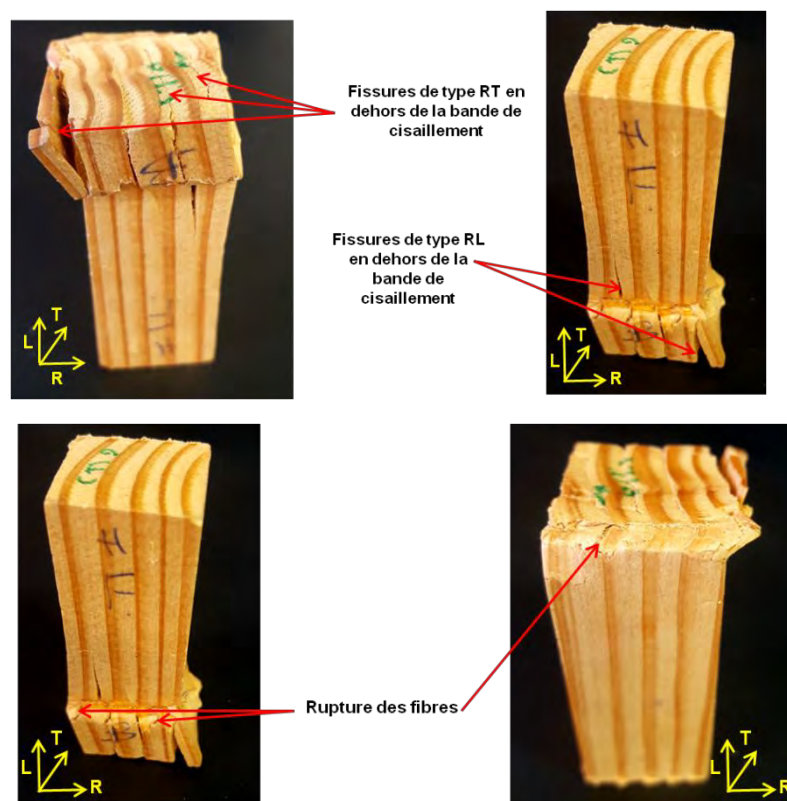


Figure 146 : Endommagements observés sur l'éprouvette CD2

II.7- Comparaison des résultats avec les autres éprouvettes

Afin de valider la reproductibilité de la classification, la même méthode a été appliquée sur les signaux de l'éprouvette CD5 qui montre un mode d'endommagement semblable à celui de l'éprouvette CD2. En effet sur ses faciès de rupture, on retrouve les mêmes mécanismes observés que sur l'éprouvette CD2 (figure 147). La même procédure a donc été suivie. Au début, les critères de validation ont donné 2 classes comme nombre de classes optimal (figure

148). Les résultats de la classification des signaux recueillis lors de l'endommagement de l'éprouvette CD5 sont présentés au regard de l'amplitude des salves sur la figure 149. On retrouve la classe bleue qui évolue d'une manière constante tout au long de l'essai (figure 150). Les valeurs moyennes des descripteurs de signaux de cette classe (Tableau 27) sont proches de celles des descripteurs de signaux de la classe bleue pour l'éprouvette CD2 (Tableau 25). Donc, cette classe représente bien le phénomène de glissement (frottement).

On retrouve aussi la classe rouge (figure 51) dont les valeurs moyennes de descripteurs de ses signaux (Tableau 27) sont proches de celles des descripteurs de signaux de la classe rouge pour l'éprouvette CD2 (Tableau 25). La classe rouge regroupe alors tous les phénomènes d'endommagement mis en jeu.

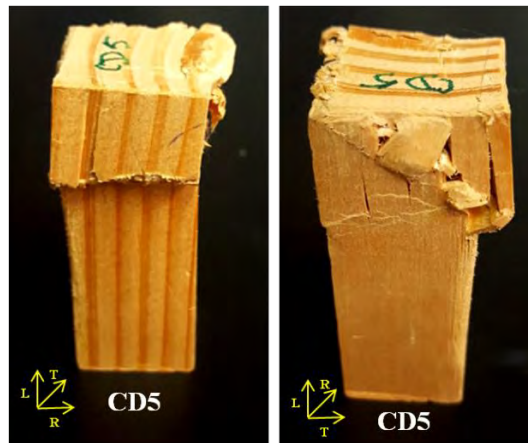


Figure 147 : Faciès de rupture de l'éprouvette CD5

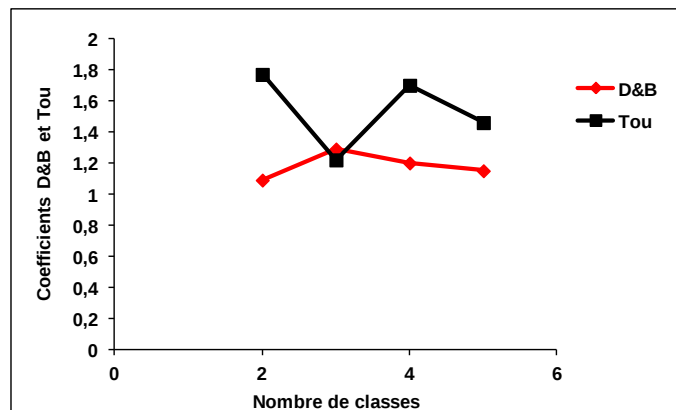


Figure 148 : Variation des critères de validation en fonction du nombre de classes (éprouvette CD5)

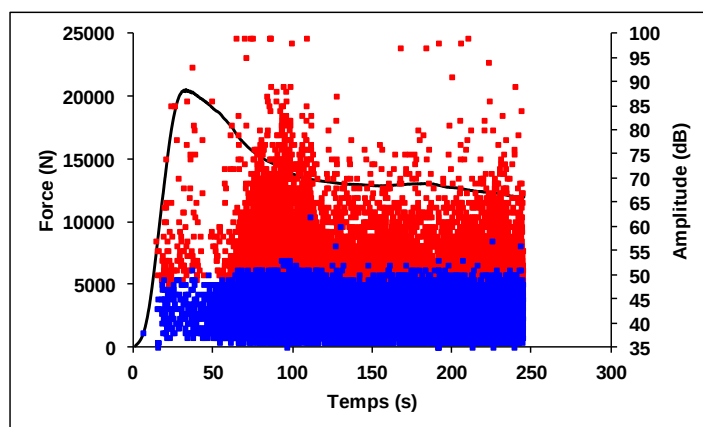


Figure 149 : Répartition temporelle de différentes classes de signaux recueillis sur l'éprouvette CD5

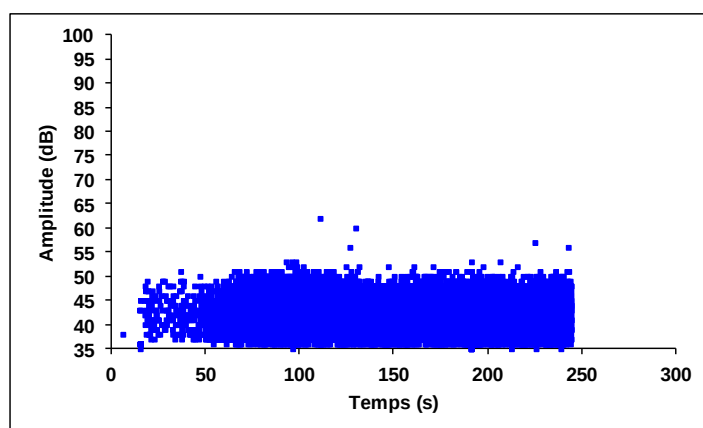


Figure 150 : Répartition temporelle de la classe de signaux bleue (éprouvette CD5)

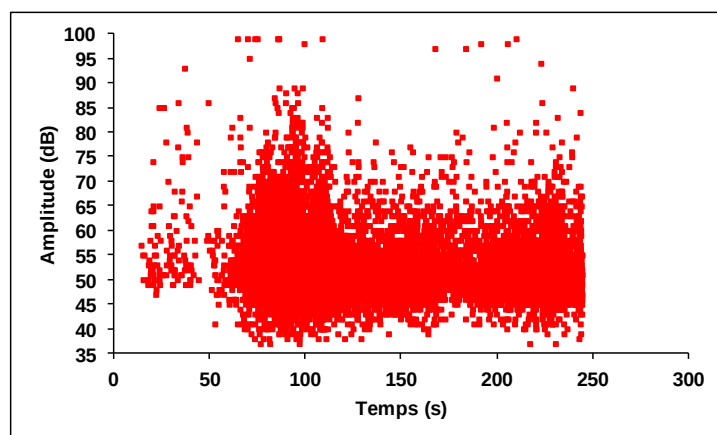


Figure 151 : Répartition temporelle de la classe de signaux rouge (éprouvette CD5)

Tableau 27 : Valeurs moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs acoustiques de chaque classe de signaux recueillis sur l'éprouvette CD5

Descripteurs	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	66,3	33,7
Temps de montée (μ s)	75 (98)	147 (245)
Durée (μ s)	305 (933)	748 (1248)
Amplitude (dB)	42 (3)	54 (7)
Nombre de coups	12 (6)	36 (32)
Nombre de coups au pic	4 (3)	10 (10)
Energie absolue (aJ)	80 (14)	$13 \cdot 10^3$ ($4 \cdot 10^6$)
Fréquence moyenne (kHz)	43 (17)	49 (14)
Fréquence initiale (kHz)	233 (344)	207 (139)
Fréquence de réverbération (kHz)	37 (43)	43 (14)
Pic fréquentiel (kHz)	52 (29)	53 (27)
Barycentre fréquentiel (kHz)	301 (33)	188 (39)

Comme pour l'éprouvette CD2, afin d'affiner les résultats de la classification, nous avons réalisé un retraitement de signaux de la classe rouge. Les deux critères de validation ont validé un nombre de classes égal à 3 (figure 152).

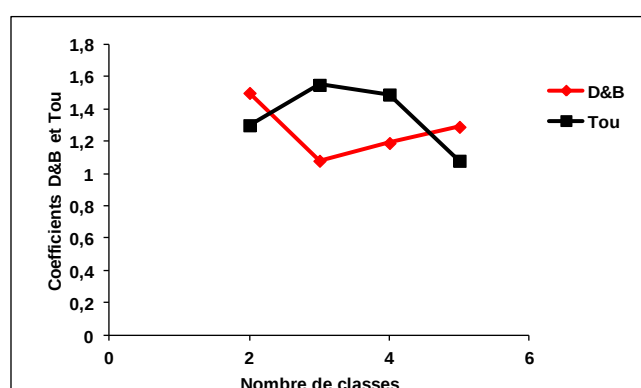


Figure 152 : Variation des critères de validation en fonction du nombre de classes (reclassement dans la classe rouge de signaux recueillis sur l'éprouvette CD5)

Le résultat de ce reclassement est donné sur la figure 153. On retrouve deux sous-classes 2-1 (marron) et 2-2 (verte) superposées et une sous-classe 2-3 (rose) qui contient des signaux de hautes amplitudes. Les sous-classes 2-1 et 2-2 se différencient principalement par leur pic fréquentiel et l'énergie absolue des signaux (Tableau 28). On constate aussi que les caractéristiques des signaux de ces trois sous-classes (Tableau 28) sont semblables à celles des signaux des trois sous-classes identifiées pour l'éprouvette CD2 (Tableau 26). On peut donc conclure que le résultat de la classification est reproductible sur les différentes éprouvettes du lot qui montrent les mêmes types d'endommagements.

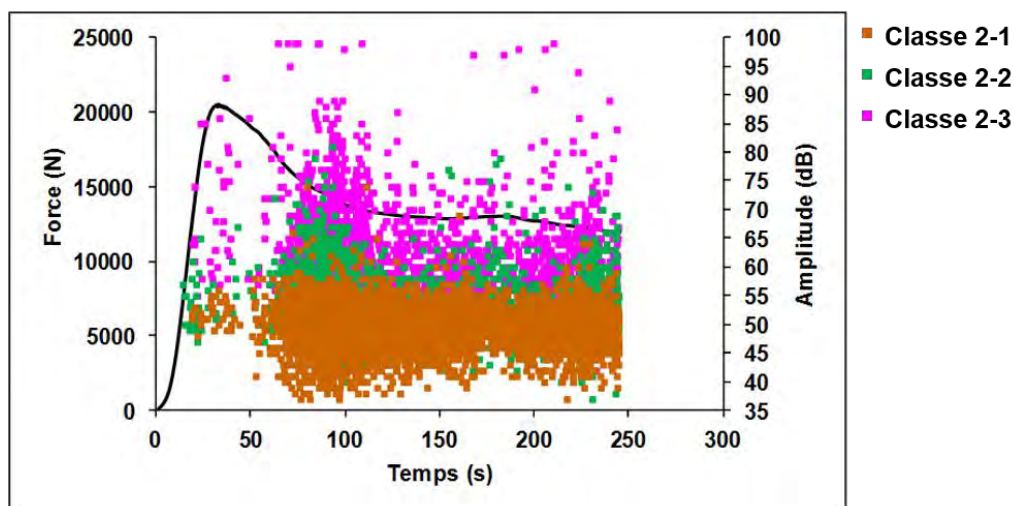


Figure 153 : répartition temporelle des trois sous-classes de signaux de l'éprouvette CD5

Tableau 28 : Valeurs moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs de chaque sous-classe appartenant à la classe rouge pour l'éprouvette CD5

Descripteurs	Classe 2-1	Classe 2-2	Classe 2-3
% des signaux	50	22,5	27,5
Temps de montée (μ s)	132 (257)	128 (190)	189 (258)
Durée (μ s)	625 (1149)	587 (334)	1107 (708)
Amplitude (dB)	49 (3)	53 (5)	61 (7)
Nombre de coups	26 (34)	38 (19)	49 (28)
Nombre de coups au pic	8 (10)	10 (8)	12 (11)
Energie absolue (aJ)	600 (2299)	2682 (22947)	$4,8 \cdot 10^5$ ($8 \cdot 10^6$)
Fréquence moyenne (kHz)	43 (9)	67 (13)	45 (9)
Fréquence initiale (kHz)	103 (138)	125 (165)	100 (112)
Fréquence de réverbération (kHz)	37 (8)	62 (12)	39 (9)
Pic fréquentiel (kHz)	40 (16)	94 (17)	46 (23)
Barycentre fréquentiel (kHz)	209 (22)	202 (31)	140 (22)

II.8- Conclusion

Dans cette partie, cinq éprouvettes de Douglas ont été sollicitées en compression parallèle au fil. Leurs courbes de l'évolution de la charge en fonction du déplacement imposé ainsi que leurs faciès de rupture ont été analysés et comparés. Nous avons observé une correspondance évidente entre l'allure de la courbe ($F-\delta$) et les faciès de rupture pour chaque éprouvette. La réponse de l'émission acoustique évolue d'une manière différente selon les stades de chargement et permet de diviser la courbe ($F-\delta$) en quatre phases.

Les mécanismes d'endommagement dans le bois de Douglas soumis à la compression parallèle au fil comprennent une déformation permanente par un pliage fin (rides) des parois des trachéides, la microfissuration longitudinale à l'interface BI/BF due à l'hétérogénéité des propriétés mécaniques, et surtout celle à l'interface fibre/rayon due au micro-flambement des fibres à cause de leurs défauts de rectitude. La coalescence des microfissures conduit non seulement à la formation d'une ou plusieurs bandes de cisaillement, dont la ligne de rupture

est perpendiculaire au fil sur la face (LR) et incliné par rapport à la direction du fil sur la face (LT), mais également à la propagation de type RL et RT aussi bien dans et en dehors de la bande de cisaillement. Ces endommagements s'accompagnent de ruptures de fibres et aussi de glissement entre les plateaux du montage de compression et les extrémités des éprouvettes.

Afin de comprendre les mécanismes d'endommagement associés à chaque phase de sollicitation, l'analyse de la réponse acoustique associée à des observations permet de proposer une correspondance entre les quatre classes identifiées.

Concernant l'activité acoustique, elle peut être divisée en quatre classes ou sous classes :

- Classe 1 (bleue) : les signaux acoustiques de la classe bleue pourraient être attribués au glissement entre les plateaux du montage de compression et les extrémités des éprouvettes.
- Classe 2-1 (marron) : les signaux de la classe 2-1 proviennent de la microfissuration longitudinale, soit à l'interface BI/BF soit à l'interface fibre/rayon par la coalescence des microfissures dans le sens longitudinal.
- Classe 2-2 (verte) : les signaux de la classe 2-2 sont émis par la microfissuration transversale dans le BI et le BF par la coalescence des microfissures dans le sens tangentiel.
- Classe 2-3 (rose) : les signaux de la classe 2-3 témoignent de la rupture des fibres dans le BI et dans le BF.

En ce qui concerne le scénario d'endommagement, la réponse acoustique des éprouvettes en Douglas peut également être divisée en 4 phases :

Phase I : Phase linéaire élastique

Phase I représente le comportement linéaire de la courbe ($F-\delta$) où peu d'endommagement est décelé. L'EA n'a permis de recueillir que quelques signaux dans cette phase.

Phase II : Phase d'endommagement par microfissuration

Cette phase caractérise le comportement non-linéaire de la courbe ($F-\delta$) jusqu'à la charge maximale. Dans la phase II, les endommagements commencent à se développer au sein du matériau, tels que la déformation permanente en compression sous forme de rides de pliage dans les parois des trachéides, la microfissuration non seulement par cisaillement au niveau des interfaces longitudinales des constituants hétérogènes, mais surtout par le micro-flambement au niveau des rayons/fibres à cause des défauts de rectitude des fibres. Notons que les premières se situent dans le plan (LT) tandis que les dernières dans le plan (LR). En compression les microfissures provoquées par le micro-flambement dans le plan (LR) sont ouvertes, donc se propagent de préférence dans la direction L à cause de la participation du mode I due à la contrainte de pelage (la propagation de type TL). Au fur et à mesure de la propagation des microfissures de type TL, la densité de ces microfissures augmente, le matériau s'assouplit de plus en plus, donc la courbe ($F-\delta$) devient non linéaire. Ce mécanisme forme une zone endommagée dans le BI pendant cette phase, ce qui favorise par la suite la formation d'une bande de cisaillement microscopique. Ce phénomène est bien connu dans un bois en compression parallèle au fil sous le nom anglais de « incipient kinking » (Poulsen 1997).

Phase III : Phase de déclenchement de la formation de la bande de cisaillement

Cette phase commence avec la chute rapide de l'effort et se termine quand la vitesse de la diminution de charge devient très faible. En effet, au début de la chute de charge, la naissance et la coalescence de microfissures dans le plan (LR) dû au micro-flambement se produit à l'interface fibre/rayon. Cela forme une bande de cisaillement microscopique. Ensuite poussé

par la contrainte de cisaillement dont la valeur maximale s'oriente à 45° par rapport au fil sur la face (LT), le glissement entre les parties supérieure et inférieure de l'éprouvette dans le sens incliné par rapport à la direction du fil commence. Cela coïncide avec le début de la formation de la bande de cisaillement macroscopique. Elle s'accompagne d'une propagation des fissures, de rupture de fibres et du flambement des mèches de fibres formées par la fissuration dans et en dehors de la bande. Comme mentionnée précédemment, cette phase a été définie en anglais par le terme « transient kinking » (Poulsen 1997).

Phase IV : Elargissement de la bande de cisaillement macroscopique

La majorité de cette phase correspond au palier de la courbe (F- δ) où la charge continue à diminuer mais d'une façon très lente, ce qui forme une droite légèrement inclinée. Elle peut elle-même être divisée en deux parties. La partie 1 traduit le comportement d'écoulement du matériau à cause de la formation et de l'élargissement de la bande de cisaillement. Le glissement par cisaillement est accompagné de la propagation des fissures aussi bien dans la bande de cisaillement et en dehors de cette bande aussi que par la rupture de certaines fibres. Puisque cette bande de cisaillement dans l'éprouvette CD2 se situe à proximité de son pied, tout au long de sa formation et de son élargissement ce processus est accompagné par le glissement entre les surfaces de l'éprouvette et les plateaux du montage de compression. Cette partie de charge stable est nommée en anglais dans la littérature comme « steady-state kinking » (Poulsen 1997). Dans la phase IV-2, la fissuration continue et les fibres du BI et du BF rompent de plus en plus. En même temps, à la fin de la phase IV-2, le glissement au niveau de la bande de cisaillement est accéléré ce qui conduit à la rupture finale.

Il est important de noter que les conclusions ci-dessus sur le comportement de Douglas en compression parallèle au fil suivi par EA sont proposées en se basant sur des informations limitées. Elles restent à être confirmées par des études complémentaires et plus approfondies.

III- Endommagement du sapin pectiné sous sollicitation de compression parallèle au fil

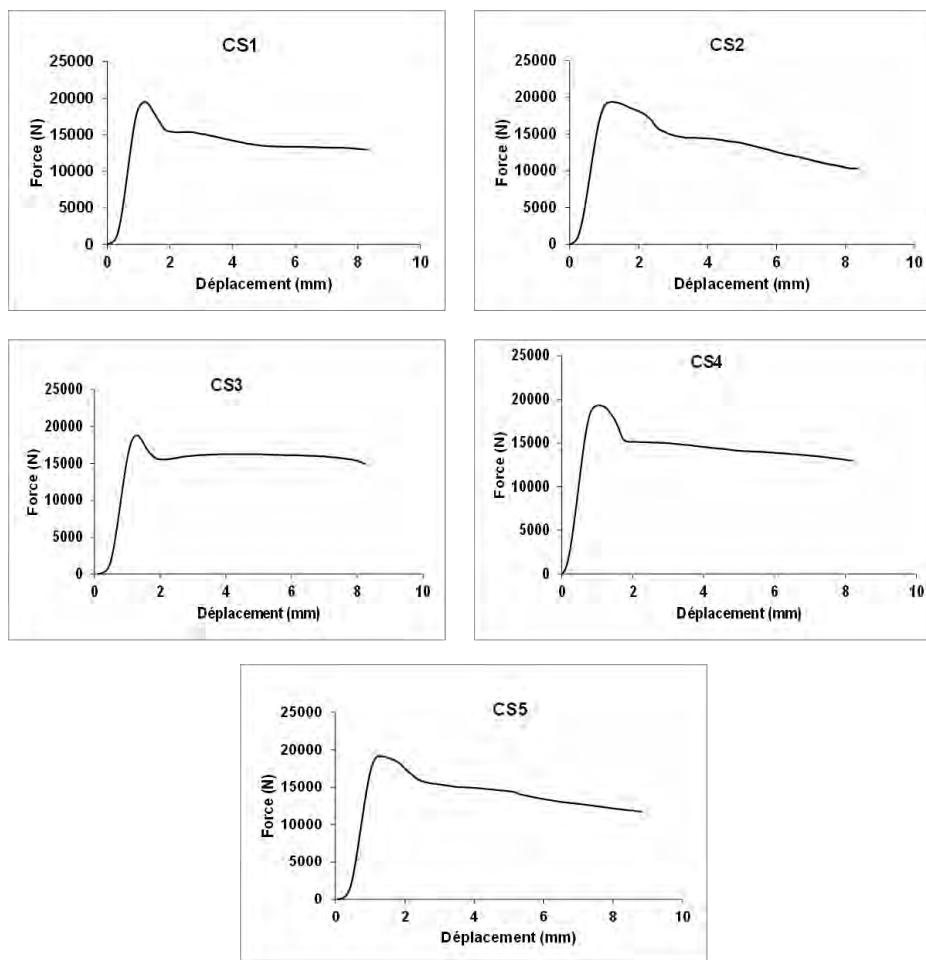
III.1- Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à l'endommagement du bois de sapin pectiné sous sollicitation de compression parallèle au fil. La même démarche que celle proposée pour le bois de Douglas sollicitée en compression est utilisée pour cette nouvelle essence.

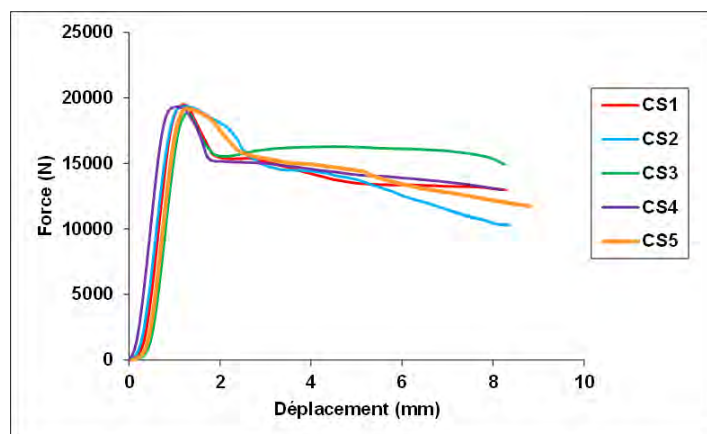
III.2- Comportement en compression et propriétés mécaniques associées

Les courbes expérimentales force-déplacement (F- δ) de cinq éprouvettes de sapin pectiné sollicitées en compression parallèle au fil sont présentées sur la figure 154a. Une bonne répétitivité a été observée pour la rigidité, la contrainte maximale et l'allure de ces courbes (figure 154b). Toutes les courbes suivent pratiquement la même tendance. Cette tendance est également similaire à celle du Douglas (voir Chapitre 4 paragraphe II.2 page 142). L'allure typique de ces courbes peut être décrite ainsi: une partie linéaire au début, une petite partie non-linéaire avant la charge maximale, puis une chute de charge rapide, pour terminer cette chute ralentie et se stabilise pour former un palier légèrement incliné.

Si l'on rentre plus dans le détail, on peut observer que la chute de charge chez les éprouvettes CS2 et CS5 est moins brutale et le palier de la partie stable est plus incliné que pour les trois autres éprouvettes (figure 154a).



(a)



(b)

Figure 154 : Courbes contrainte-déplacement du lot d'éprouvettes de sapin pectiné sollicitées en compression parallèle au fil (a) les cinq courbes isolées (b) les cinq courbes superposées

De la même façon que pour la partie II-2 de ce chapitre, le module d'Young et la contrainte maximale en compression axiale sont mesurés sur chaque éprouvette. Leurs valeurs sont résumées dans le Tableau 29 et comparées avec les résultats de la littérature. Encore une fois, la dispersion des mesures est très faible : elle est de l'ordre de 3% pour la mesure du module d'élasticité et de 1,5% pour la mesure de la contrainte maximale. Ces mesures rentrent parfaitement dans la fourchette donnée par la littérature.

Tableau 29 : Propriétés mécaniques mesurées sur les éprouvettes de sapin pectiné sollicitées en compression parallèle au fil

Eprouvettes	Modules d'Young mesurés (GPa)	Module d'Young (GPa) (Littérature)	Contraintes maximales (MPa)	Contrainte maximale (MPa) (Littérature)
CS1	11,5	10-14,5*	48,6	40-52*
CS2	11,5		48,2	
CS3	11,0		46,8	
CS4	11,9		48,3	
CS5	11,3		48,0	
Moyenne	11,4		48,0	
Coefficient de variation	± 3,0 %		± 1,5 %	

*Sell et Kropf 1990. Propriétés et caractéristiques des essences de bois

III.3-Observation des faciès de rupture

Les faciès de rupture du lot d'éprouvettes de sapin pectiné affichent un mode de rupture commun qui attire l'attention. Il s'agit de bandes de cisaillement (figures 155-159). Ces bandes sont quasiment horizontales sur la face (LR) et inclinées sur la face (LT). La position de ces bandes peut se situer à différentes hauteurs dans l'éprouvette. Concernant l'éprouvette CS2, l'endommagement semble un peu différent que pour les autres éprouvettes (figure 156). Cette différence se reflète sur la courbe (F- δ) de l'éprouvette CS2 qui affiche une chute de charge après sa valeur maximale beaucoup plus progressive que les autres éprouvettes (figure 154). Les angles d'inclinaison pour chaque éprouvette sont fournis dans le Tableau 30. Leur moyenne est de 26°. Cette valeur est plus faible que celle mesurée sur les éprouvettes de Douglas, mais elle rentre bien dans la fourchette indiquée pour les bois résineux (entre 23° et 60° selon les travaux de Wadrop et Addo Ashong 1982 ; Kucera 1985 ; Poulsen 1997 et de Benabou 2008).

Tous les échantillons présentent aussi un écrasement (matage) au niveau du pied. Ce phénomène est plus prononcé pour le cas de l'éprouvette CS2 (figure 156). Concernant la propagation de fissure longitudinale, elle est beaucoup moins visible, même si quelques courtes fissures longitudinales sont observées, sur les éprouvettes CS2 et CS3 (figures 156-157). Par contre, on constate qu'au niveau de la bande de cisaillement inclinée, de nombreuses fissures courtes et régulières sur la face (LT) se sont formées sur les éprouvettes CS1, CS4 et CS5 (figures 155, 158 et 159). Elles prennent une forme d'écailles (figure 159). On remarque que chaque écaille correspond à la largeur d'une bande de BI d'un cerne de croissance et présente une petite couche semi épluchée. On imagine que ce phénomène est formé par la propagation dans le sens T et L d'une microfissure générée dans le BI dans le plan (LT). Cette propagation est gênée par la forte résistance à la rupture des fibres dans le

BF. En effet, les fibres du BI cassées et détachées de la surface sont ramenées par le glissement de la bande. En plus du mode I et du mode II, ces fissures subissent également une torsion, caractérisée par le mode III.

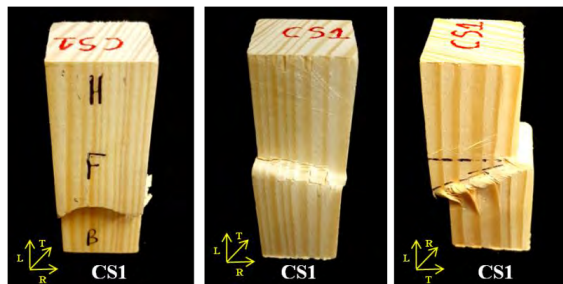


Figure 155 : Faciès de rupture de l'éprouvette CS1

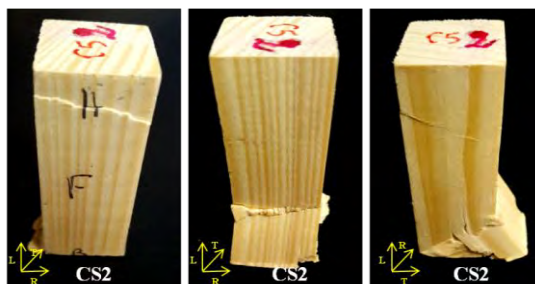


Figure 156 : Faciès de rupture de l'éprouvette CS2

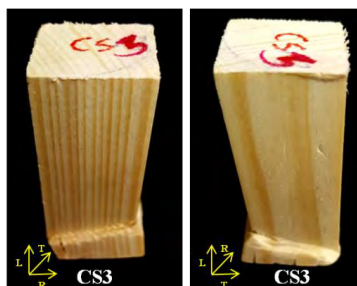


Figure 157 : Faciès de rupture de l'éprouvette CS3

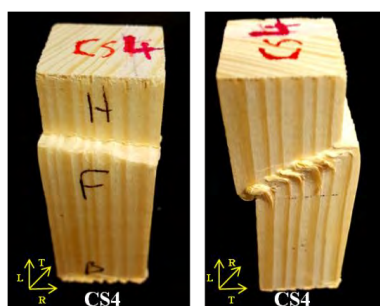


Figure 158 : Faciès de rupture de l'éprouvette CS4

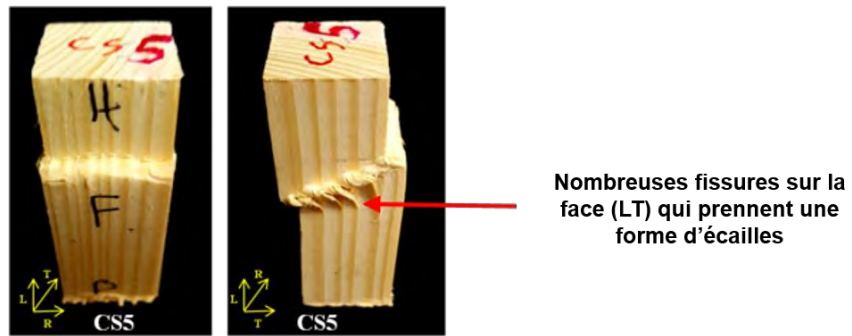


Figure 159 : Faciès de rupture de l'éprouvette CS5

Tableau 30 : Angles d'inclinaison par rapport à la direction du fil de la bande de cisaillement sur la face LT pour le lot de sapin pectiné

Eprouvettes	Angles d'inclinaison de la bande de cisaillement sur la face (LT)
CS1	25°
CS2	25°
CS3	20°
CS4	30°
CS5	30°

L'éprouvette CS5 est sélectionnée pour l'analyse de sa réponse acoustique.

III.4- Mécanismes de rupture des éprouvettes de sapin pectiné sollicitées en compression parallèle au fil

Par rapport aux éprouvettes de Douglas, l'hétérogénéité des propriétés mécaniques entre le BI et le BF est moins importante chez le sapin pectiné. La quasi-absence de fissuration longitudinale à l'interface BI/BF due à la différence de rigidité nous permet d'attribuer la partie non linéaire juste avant la charge maximale aux micro-flambements dans le BI au niveau des rayons. La chute de charge après la valeur maximale de manière brutale et de courte durée correspond plutôt aux micro-flambements accompagnés de fissuration dans le BF au niveau des rayons radiaux et la propagation instable des fissures. Le comportement d'écoulement au niveau de palier provient surtout du glissement par cisaillement entre les parties supérieure et inférieure de l'éprouvette dû à la formation d'une bande de cisaillement ce qui entraîne le glissement aux extrémités de l'éprouvette entre les plateaux du montage de compression et l'éprouvette.

III.5- Analyse de l'activité acoustique

La figure 160 représente l'évolution de la charge appliquée au matériau associée à l'activité acoustique en fonction du temps. L'activité acoustique est représentée par le nombre de salves cumulées (figure 160a), l'amplitude (figure 160b) et l'énergie cumulée (figure 160b). En se basant sur l'allure de la courbe (F- δ) et sur la réponse acoustique, quatre phases peuvent être distinguées :

Phase I : Phase du comportement linéaire

Cette phase correspond à la partie linéaire de la courbe (F- δ). Dans cette phase, quelques signaux sont enregistrés. L'amplitude varie entre 35 dB et 45 dB (figure 160b). L'énergie cumulée reste très faible (figure 160c).

Phase II : Phase d'endommagement par microfissuration

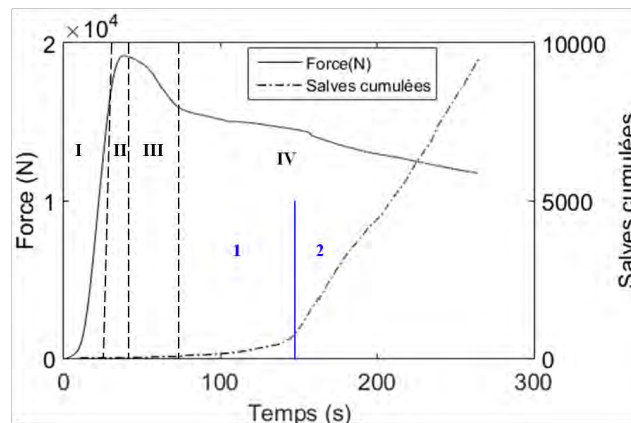
Elle débute lorsque la courbe ($F-\delta$) commence à devenir non-linéaire et se termine quand la charge atteint sa valeur maximale. La réponse acoustique dans cette phase est similaire à la phase I. Le nombre de salves cumulées (figure 160a) et l'énergie cumulée (figure 160c) restent faibles. L'amplitude des signaux enregistrés dans cette phase varie entre 35 dB et 50 dB (figure 160b).

Phase III : Phase de déclenchement de la formation de la bande de cisaillement

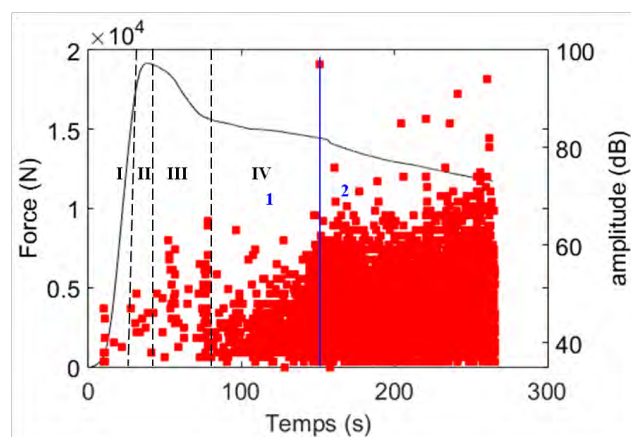
La phase III commence avec la chute rapide de charge et se termine avant le début du palier. Le nombre de salves cumulées (figure 160a) et l'énergie cumulée (figure 160c) restent faibles. L'amplitude des signaux enregistrés ne dépasse pas 65 dB (figure 160b).

Phase IV : Elargissement de la bande de cisaillement macroscopique

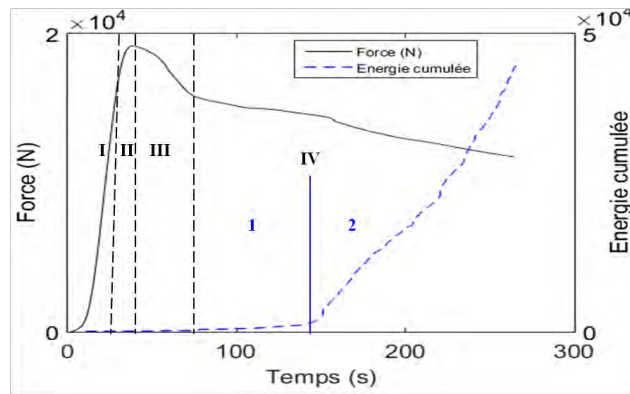
Cette phase correspond au palier de charge stable sur la courbe ($F-\delta$). En terme de réponse acoustique, cette phase peut être divisée en deux parties. Partie IV-1 où le nombre de salves cumulées (figure 160a) et l'énergie cumulée (figure 160c) subissent une faible augmentation. La partie IV-2 commence par l'enregistrement d'un évènement de haute amplitude (97dB). Par la suite l'amplitude des signaux diminue et reste inférieure à 70 dB pour augmenter de nouveau à partir de $t=200s$ (figure 160b). Cependant une augmentation régulière du nombre de salves cumulées (figure 160a) et de l'énergie cumulée (figure 160c) a été observée durant la partie IV-2.



(a)



(b)



(c)

Figure 160 : Evolution de la charge et de l'activité acoustique en fonction du temps (éprouvette CS5) (a) salves cumulées (b) répartition des amplitudes (c) énergie cumulée

III.6- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique

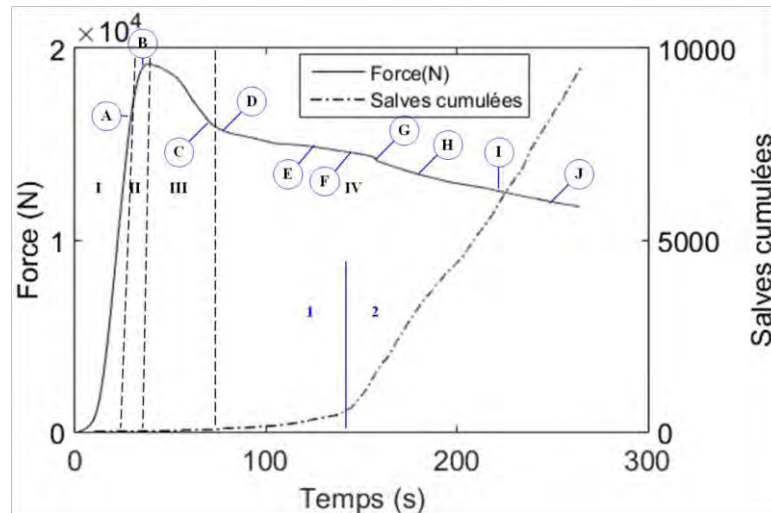
Dans la phase I, un faible nombre de signaux est enregistré dès le début du chargement (figure 161a). Or, cette phase est sensée être exempte de tout endommagement mécanique, même la photo extraite du film à la fin de cette phase ne montre aucun endommagement visible (figure 161b-Point A). Donc, on pourrait dire que les signaux enregistrés dans cette phase peuvent être générés par la mise en place de l'éprouvette ou peut être peu d'endommagement est décelé.

Dans la phase II, la photo extraite du film ne montre aucun endommagement visuel particulier (figure 161b-Point B). La différence de rigidité entre le BI et BF est beaucoup moins importante dans le bois de sapin pectiné que pour le bois de Douglas, ce qui explique la quasi-absence de fissuration longitudinale à l'interface BI/BF. Donc, les signaux enregistrés dans cette phase pourraient être générés par les micro-flambements dans le BI au niveau des interfaces fibre/rayon.

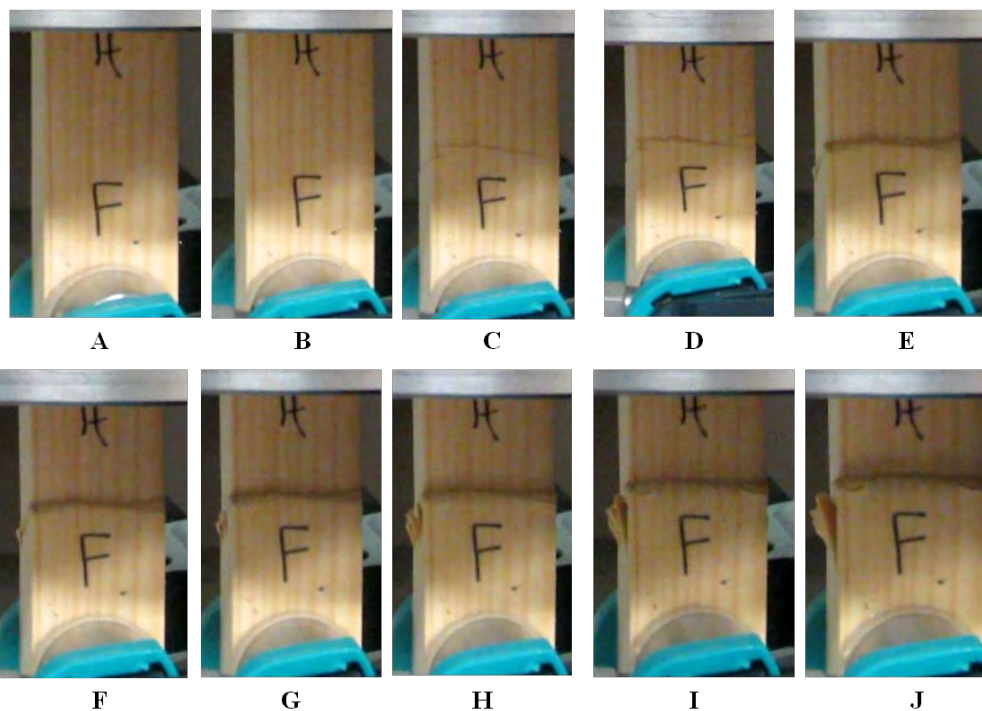
Dans la phase III, les signaux enregistrés lors de la chute de charge peuvent être générés probablement par les micro-flambements accompagnés par la fissuration dans le plan (LR) dans le BF au niveau des rayons radiaux et par la propagation rapide des microfissures de type TL. A la fin de cette phase, des traces d'une bande de cisaillement apparaissent sur les deux faces (LR) et (LT) (figure 161b-Point C).

La phase IV traduit le comportement d'écoulement qui provient surtout du glissement par cisaillement qui entraîne le glissement aux extrémités de l'éprouvette. Cette phase commence par l'apparition de la bande de cisaillement de manière nette dans les deux plans (figure 161b-Point D). Durant la phase IV-1 (entre le point D et le point E), le glissement entre les parties supérieure et inférieure de l'éprouvette au niveau de la bande de cisaillement commence et les microfissures dans cette bande continuent à se propager. Ici, l'augmentation de l'activité acoustique est faible et régulière, il n'y a pas de signaux de haute amplitude. Dans la dernière phase IV-2, la bande de cisaillement s'élargit et de nombreuses fissures sous forme d'écailles plus ou moins ouvertes dans la bande inclinée sont observées (figure 161b-Points E-J). Ceci témoigne de leur propagation sous sollicitation avec une forte participation du mode I. Ce processus est accompagné par une augmentation importante de l'activité acoustique où des signaux de haute amplitude sont observés à partir du point G. La rupture des fibres arrive au niveau de la bande de cisaillement par le glissement des parties inférieure et supérieure de l'éprouvette. Des ruptures de fibres deviennent visibles au niveau de la bande de cisaillement à partir du point H (figure 161b-Point H).

Il est à noter que le bois de sapin pectiné ne génère que peu de signaux de très hautes amplitudes (99dB). En effet, seuls un ou deux signaux isolés de très hautes amplitudes sont enregistrés lors de son endommagement en compression. Par conséquent la rupture des fibres du BF de sapin pectiné devrait être moins énergétique que celle de Douglas.



(a)



(b)

Figure 161 : Différents stades d'endommagement de l'éprouvette CS5 (a) Courbe de l'évolution de la charge et de l'activité acoustique en fonction du temps (b) Photos de la surface de l'échantillon extraites du film à des points particuliers

III.7- Classement des données acoustiques

Les signaux recueillis par le capteur R6(1) positionné au pied de l'éprouvette sont utilisés pour la classification puisqu'il s'agit du capteur qui a recueilli le plus de signaux (figure 162).

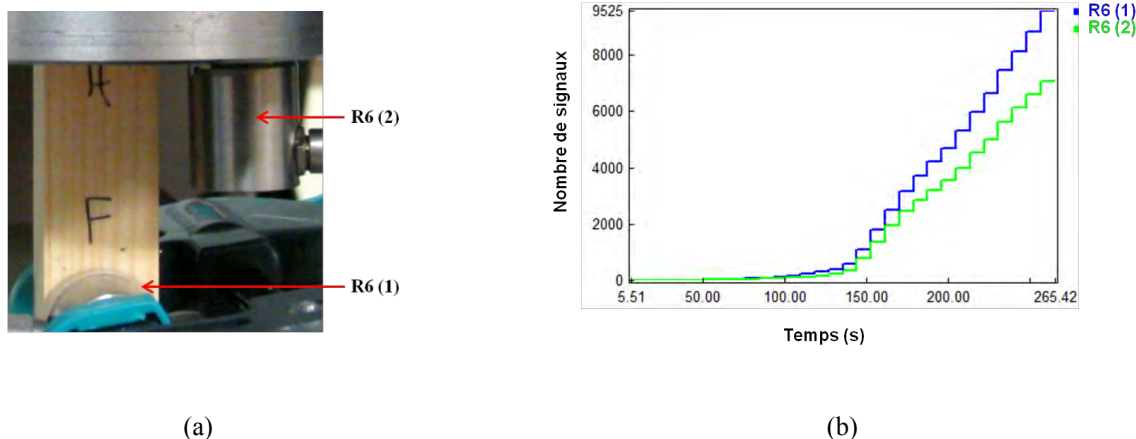


Figure 162 : (a) Positions des capteurs (b) Nombre de signaux enregistrés par chaque capteur (éprouvette CS5)

A- Optimisation du nombre de classes

La figure 163 montre l'évolution des critères de validation (Davies et Bouldin et Tou) en fonction du nombre de classes. Le coefficient de Davies et Bouldin est minimisé pour un nombre de classes égal à 3 et le critère Tou est maximisé pour un nombre de classes égal à 2. Les coefficients de validation ne sont pas en cohérence l'un avec l'autre. Dans ce cas, les deux résultats seront présentés et analysés.

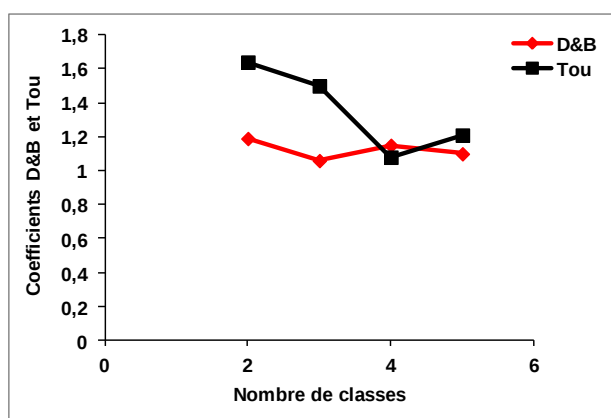


Figure 163 : Coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes (éprouvette CS5)

B- Résultats de la classification par la méthode des k-moyennes

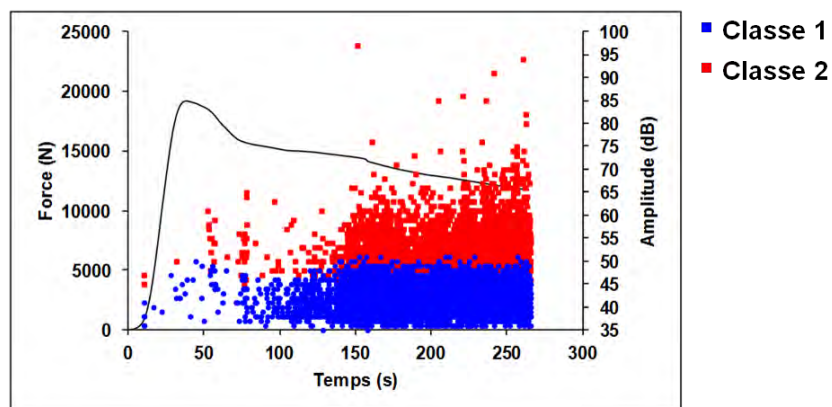
Résultats de deux classes (nombre de classes validé par le critère Tou)

Les résultats de regroupement des signaux recueillis lors de l'endommagement de l'éprouvette CS5 en deux classes sont présentés au regard de l'amplitude des salves sur la figure 164.

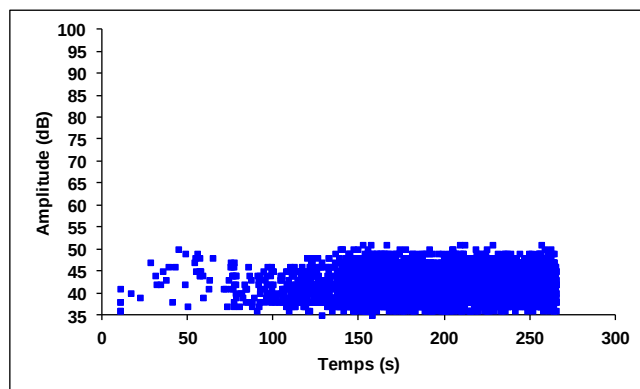
On retrouve une classe bleue qui contient 60,5% des signaux. La signature acoustique de ces signaux est caractérisée par une faible amplitude, une faible énergie et une durée moyenne (Tableau 31). Cette classe démarre d'une façon importante lors de l'apparition macroscopique de la bande de cisaillement. Elle évolue ensuite d'une manière constante jusqu'à la fin de l'essai (figure 164a-b). Ici, l'hypothèse est faite que ce groupe de signaux représente le frottement entre l'éprouvette et les plateaux du montage de compression.

La classe rouge contient 39,5% des signaux. La forme d'onde de ces signaux est caractérisée par une longue durée, une amplitude moyenne et une énergie très importante

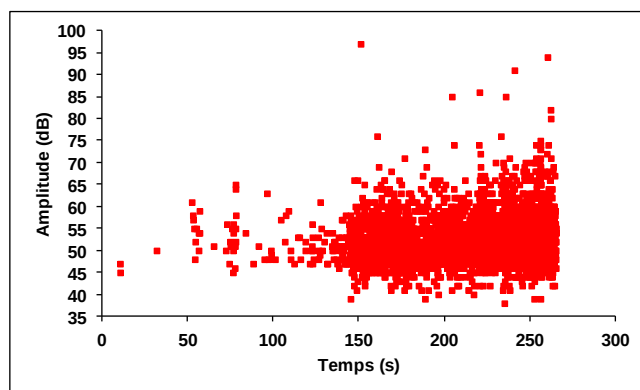
(Tableau 31). Cette classe démarre d'une manière importante à partir de $t=50s$ (figure 164a et 164c). Cette classe est attribuée à l'ensemble des endommagements présents dans le matériau.



(a)



(b)



(c)

Figure 164 : Répartition des signaux recueillis sur l'éprouvette CS5 en deux classes (a) Répartition temporelle des classes de signaux (b) classe bleue (c) classe rouge

Tableau 31 : Moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs de chaque classe pour l'éprouvette CS5

Descripteurs	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	60,5	39,5
Temps de montée (μ s)	52 (54)	82 (109)
Durée (μ s)	287 (139)	630 (306)
Amplitude (dB)	42 (3)	52 (5)
Nombre de coups	13 (6)	32 (15)
Nombre de coups au pic	4 (2)	7 (6)
Energie absolue (aJ)	78 (54)	7877 (2 10 ⁴)
Fréquence moyenne (kHz)	48 (18)	53 (13)
Fréquence initiale (kHz)	161 (362)	159 (412)
Fréquence de réverbération (kHz)	40 (39)	46 (12)
Pic fréquentiel (kHz)	51 (27)	49 (25)
Barycentre fréquentiel (kHz)	306 (32)	204 (35)

La même logique que celle suivie pour le Douglas précédemment est utilisée également pour le sapin pectiné. On a réalisé un retraitement des signaux de la classe rouge pour voir si on pouvait différencier les différents mécanismes d'endommagement. Toujours en se basant sur les critères statistiques, les résultats montrent que la classe rouge peut être divisée en trois sous classes : classe 2-1, classe 2-2 et classe 2-3 (figure 165).

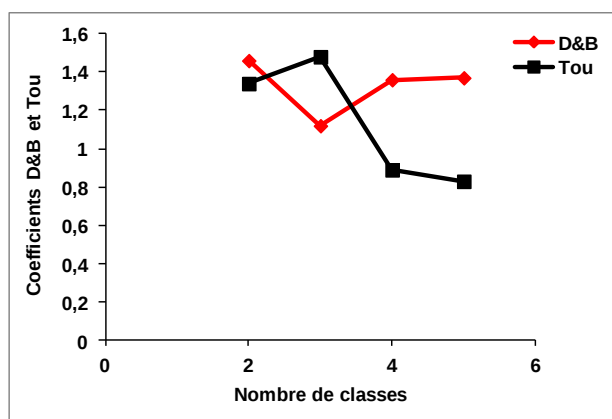


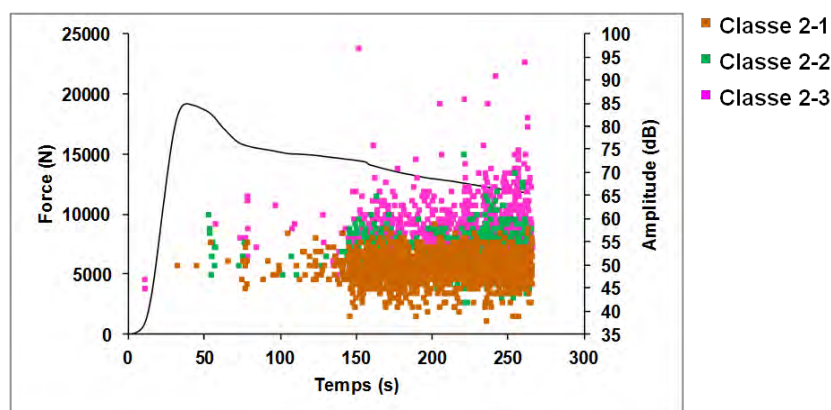
Figure 165 : D&B et Tou en fonction du nombre de classes (reclassement dans la classe rouge de signaux recueillis sur l'éprouvette CS5)

Les résultats de la reclassification des signaux de la classe rouge sont présentés au regard de l'amplitude des salves sur la figure 166. Les caractéristiques des trois sous-classes, désignées classes 2-1, 2-2 et 2-3 sont résumées dans le Tableau 32.

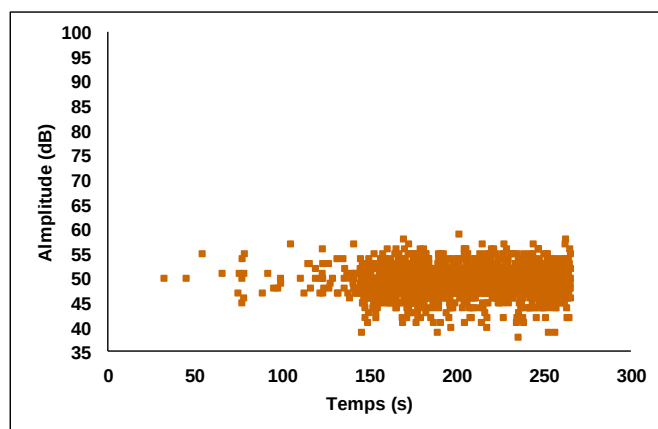
Les deux classes 2-1 (marron) et 2-2 (verte) sont quasiment-superposées durant l'essai (figure 166a). Ces deux classes se différencient juste au niveau du pic fréquentiel et de l'énergie absolue (Tableau 32). Ces deux classes pourraient être attribuées à la fissuration longitudinale et à la fissuration transversale dans la bande de cisaillement. A ce stade, les indices que l'on possède ne sont pas suffisants pour confirmer quelle classe est attribuée à quel type de microfissure. Par contre, on pourrait suggérer une labellisation en se basant sur l'analyse faite sur le Douglas montrant que la microfissuration transversale est plus énergétique que celle longitudinale ainsi que le pic fréquentiel de la première est plus élevé que la deuxième. Donc, les signaux de la classe 2-1 (marron) la moins énergétique et

possédant un pic fréquentiel plus faible (Tableau 32) pourraient provenir de la microfissuration longitudinale à l'interface fibre/rayon par la coalescence des microfissures dans le sens longitudinal. Alors que les signaux de la classe 2-2 pourraient être émis par la microfissuration transversale dans le BI et le BF par coalescence des microfissures dans le sens tangentiel.

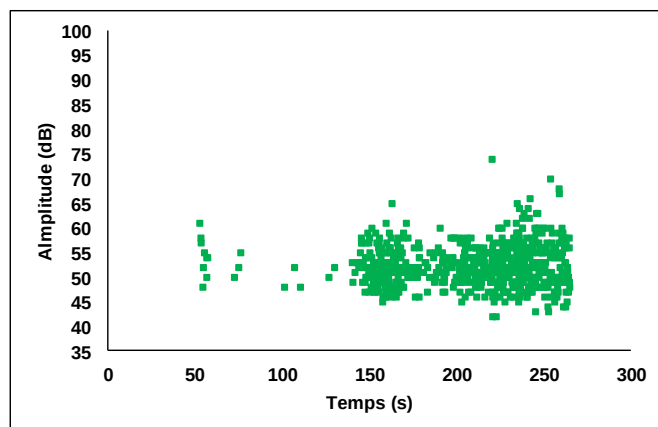
La classe 2-3 (rose) se différencie des deux autres par une énergie beaucoup plus importante, une durée plus longue et une amplitude un peu plus élevée (Tableau 32). On pourrait l'attribuer au phénomène de rupture des fibres dans le BI et dans le BF.



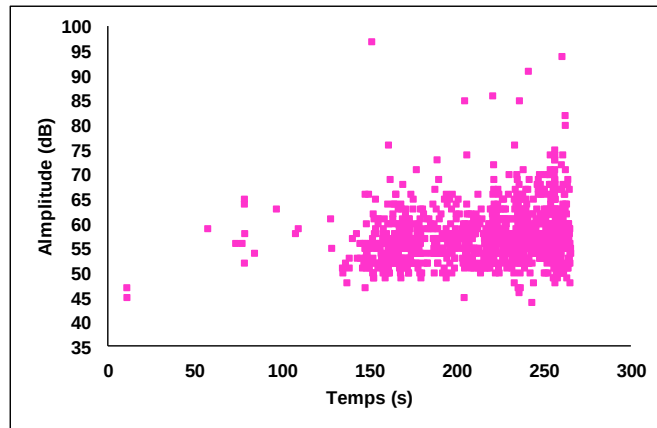
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 166 : Reclassement dans la classe rouge des signaux recueillis sur l'éprouvette CS5 (a) répartition temporelle des trois sous-classes de signaux de la classe rouge (b) classe 2-1, (c) classe 2-2 et (d) classe 2-3

Tableau 32 : Moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs de chaque sous-classe pour l'éprouvette CS5

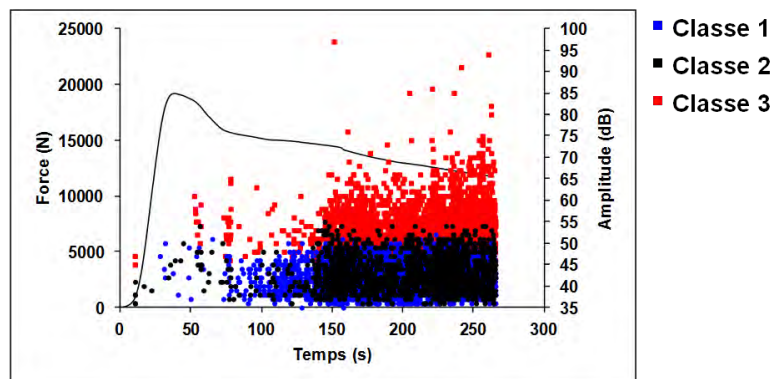
Descripteurs	Classe 2-1	Classe 2-2	Classe 2-3
% des signaux	50,4	19,5	30,2
Temps de montée (μs)	69 (84)	72 (76)	109 (152)
Durée (μs)	553 (165)	466 (168)	862 (406)
Amplitude (dB)	49 (3)	52 (4)	57 (5)
Nombre de coups	26 (7)	32 (10)	42 (21)
Nombre de coups au pic	6 (4)	8 (5)	9 (8)
Energie absolue (aJ)	406 (221)	1001 (3078)	24 10 ³ (36 10 ⁴)
Fréquence moyenne (kHz)	48 (9)	71 (11)	49 (8)
Fréquence initiale (kHz)	171 (488)	160 (354)	138 (285)
Fréquence de réverbération (kHz)	41 (8)	63 (11)	42 (8)
Pic fréquentiel (kHz)	38 (12)	89 (23)	43 (20)
Barycentre fréquentiel (kHz)	225 (18)	218 (26)	161 (22)

Résultats de trois classes (nombre de classes validé par le critère de Davies et Bouldin)

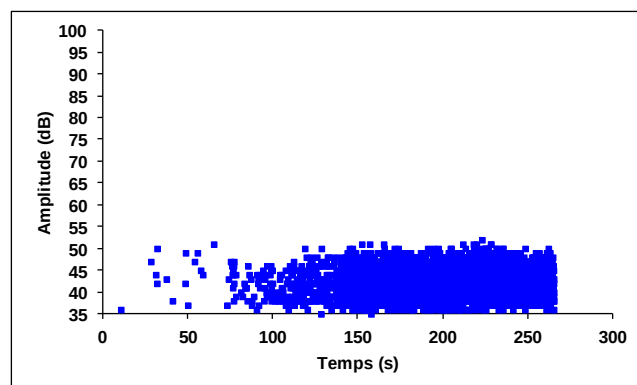
On s'intéresse maintenant à la deuxième solution donnée par le critère statistique de Davies et Bouldin. Il s'agit maintenant de regrouper les signaux d'EA en trois classes principales. La figure 167 montre les résultats de la classification des signaux recueillis lors de l'endommagement de l'éprouvette CS5 en trois classes. On retrouve une classe bleue qui a les caractéristiques d'une classe de frottement (Tableau 33) si on se base sur les analyses précédentes. On retrouve aussi une classe rouge que l'on pourrait très bien subdiviser en trois sous-classes comme réalisé précédemment en se basant toujours sur les critères statistiques (figure 168). On retrouve comme précédemment une classe marron et une classe verte quasiment-superposées et une classe rose au-dessus contenant les signaux de hautes amplitudes (figure 168).

La classe supplémentaire est la classe noire qui se différencie de la classe bleue uniquement par le pic fréquentiel (Tableau 33). L'activité de cette classe commence à devenir importante et évolue d'une manière constante à partir de $t=140$ s jusqu'à la fin de l'essai

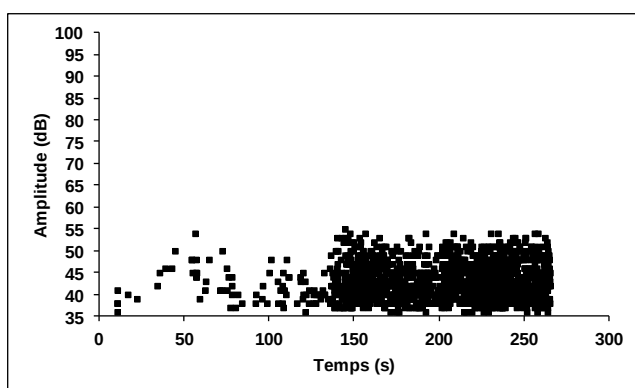
(figure 167a et 167c). En se basant sur le film enregistré, l'instant où la classe noire devient importante correspond à l'ouverture des fissures sous formes d'écailles (figure 161- Points E-J) observées sur le faciès de rupture de l'éprouvette CS5 (sur la face LT) (figure 159 page 169). Donc, une hypothèse pouvait être faite est que ce nouveau groupe que l'on ne voit pas sur les autres essences pourrait être dû à l'écailage observé uniquement sur les éprouvettes de sapin pectiné. A ce stade, les analyses mériteraient un approfondissement afin de valider cette hypothèse.



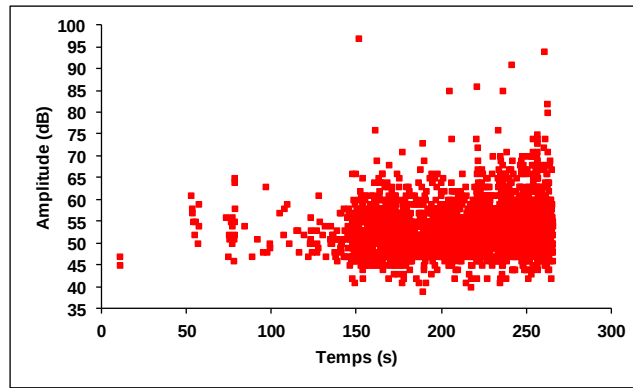
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 167 : Résultats de classification (3 classes) (a) Répartition temporelle des classes de signaux recueillis sur l'éprouvette CS5 (b) classe bleue (c) classe noire (c) classe rouge

Tableau 33 : Moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs de chaque classe pour l'éprouvette CS5

Descripteurs	Classe bleue	Classe Noire	Classe rouge
% des signaux	48,0	18,1	33,9
Temps de montée (μs)	55 (57)	48 (46)	85 (116)
Durée (μs)	327 (143)	223 (112)	665 (313)
Amplitude (dB)	42 (3)	43 (4)	53 (5)
Nombre de coups	13 (6)	14 (8)	33 (16)
Nombre de coups au pic	4 (2)	5 (2)	8 (6)
Energie absolue (aJ)	92 (64)	101(122)	9140 (21 10 ⁴)
Fréquence moyenne (kHz)	43 (12)	67 (20)	52 (11)
Fréquence initiale (kHz)	160 (373)	173 (392)	155 (390)
Fréquence de réverbération (kHz)	34 (15)	59 (65)	45 (10)
Pic fréquentiel (kHz)	36 (5)	96 (13)	47 (23)
Barycentre fréquentiel (kHz)	297 (30)	311 (44)	197 (33)

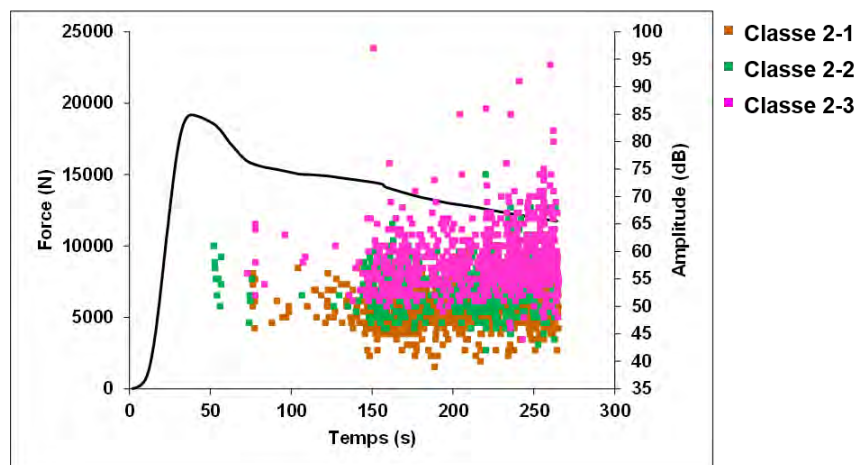


Figure 168 : Résultat du reclassement dans la classe rouge pour la deuxième solution de classification (éprouvette CS5)

III.8- Comparaison des résultats avec les autres éprouvettes

Comme les critères de validation du nombre de classes ne sont pas cohérents entre eux pour le cas de l'éprouvette CS5, nous avons décidé de refaire l'analyse statistique multi-variables sur les signaux recueillis lors de l'endommagement de l'éprouvette CS1 qui affiche un endommagement semblable à celui de l'éprouvette CS5 (figures 155 et 159). Les critères statistiques de Davies et Bouldin (D&B) et Tou valident cette fois un nombre de classes égal à 2 (figure 169).

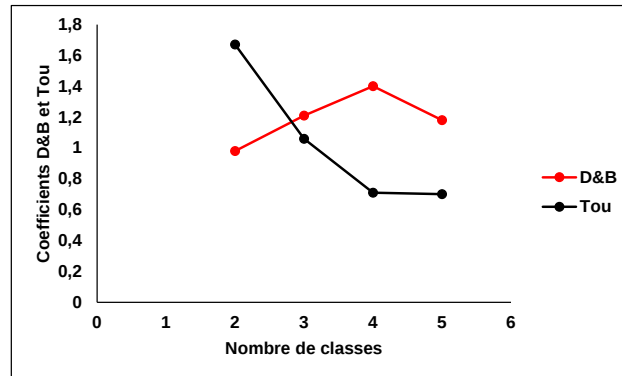
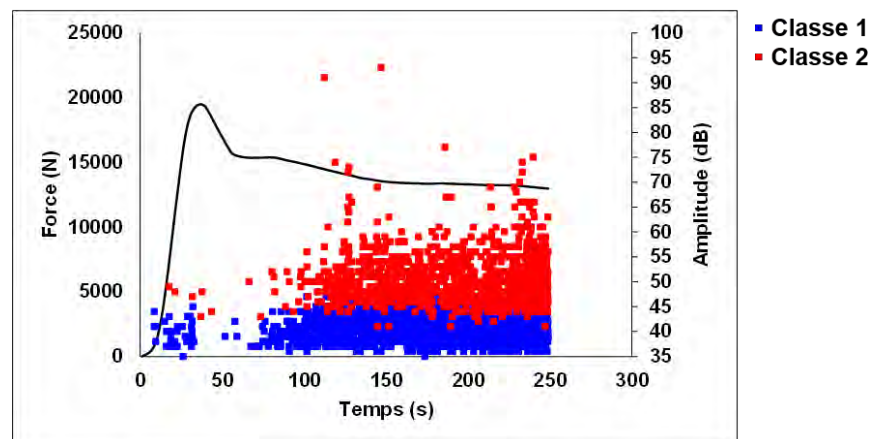
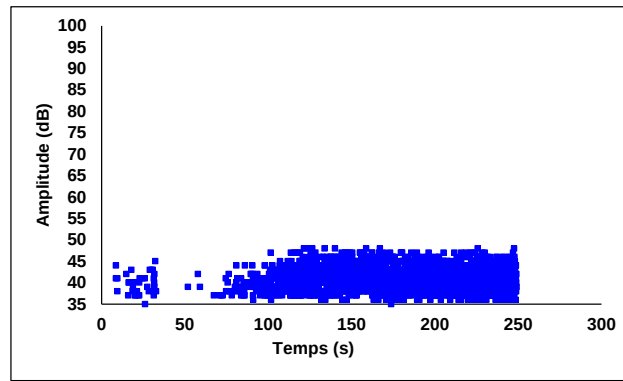


Figure 169 : D&B et Tou en fonction du nombre de classes (éprouvette CS1)

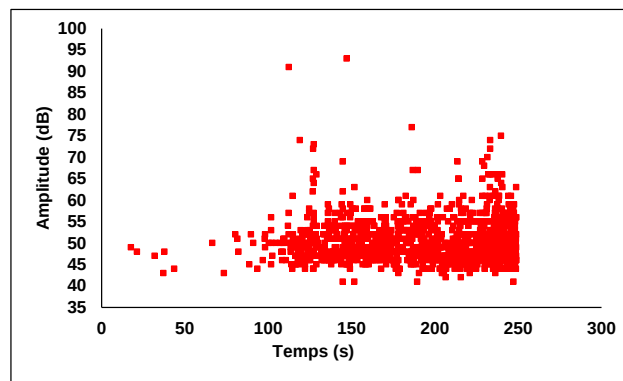
Les résultats de la classification des signaux d'EA enregistrés pendant l'endommagement de l'éprouvette CS1 sont présentés en terme d'amplitude sur la figure 170. On retrouve la classe bleue qui contient les signaux émis par le frottement et la classe rouge qui contient le reste de l'endommagement. Les valeurs moyennes de descripteurs de ces deux classes (Tableau 34) sont proches de celles de descripteurs caractérisant les deux classes identifiées dans le cas de l'éprouvette CS5 (Tableau 31).



(a)



(b)



(c)

Figure 170 : Résultats de la classification (2 classes) (a) Répartition temporelle des classes de signaux recueillis sur l'éprouvette CS1 (b) classe bleue (c) classe rouge

Tableau 34 : Moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs de chaque classe pour l'éprouvette CS1

Descripteurs	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	68	32
Temps de montée (μs)	75 (85)	133 (199)
Durée (μs)	449 (220)	1296 (779)
Amplitude (dB)	41 (2)	50 (5)
Nombre de coups	14 (8)	58 (44)
Nombre de coups au pic	4 (3)	10 (10)
Energie absolue (aJ)	70 (45)	$22 \cdot 10^3$ ($58 \cdot 10^4$)
Fréquence moyenne (kHz)	32 (11)	45 (12)
Fréquence initiale (kHz)	147 (500)	119 (250)
Fréquence de réverbération (kHz)	28 (63)	40 (11)
Pic fréquentiel (kHz)	54 (20)	59 (24)
Barycentre fréquentiel (kHz)	288 (21)	207 (31)

En se basant toujours sur les critères statistiques, le reclassement dans la classe rouge a permis d'obtenir trois sous-classes (figure 171). Les résultats de cette classification en terme d'amplitudes des salves acoustiques sont présentés sur la figure 172. On retrouve les deux classes 2-1 (marron) et 2-2 (verte) superposées l'une sur l'autre et une classe 2-3 (rose) au-dessus. Donc, on peut conclure que la classification est reproductible pour les éprouvettes de sapin pectiné montrant le même type d'endommagement. En outre, puisque les critères de

validation statistiques sont incohérents entre eux pour le cas de l'éprouvette CS5 et ne donne que deux classes principales pour le cas de l'éprouvette CS1, on adopte le résultat suivant : il existe deux classes principales pour les signaux recueillis sur les éprouvettes de sapin pectiné sollicité en compression parallèle au fil : une classe bleue attribuée au frottement et une classe rouge contenant tous les autres mécanismes d'endommagement. Cette dernière peut ensuite être divisée en trois sous-classes : classe 2-1 (marron) pouvait être attribuée au phénomène de microfissuration longitudinale, classe 2-2 (verte) pouvait être attribuée au phénomène de microfissuration transversale et classe 2-3 (rose) pouvait être attribuée à la rupture des fibres. Néanmoins, des investigations supplémentaires pourraient être mises en place pour identifier la signature acoustique des « écaillages » observés sur les différentes éprouvettes.

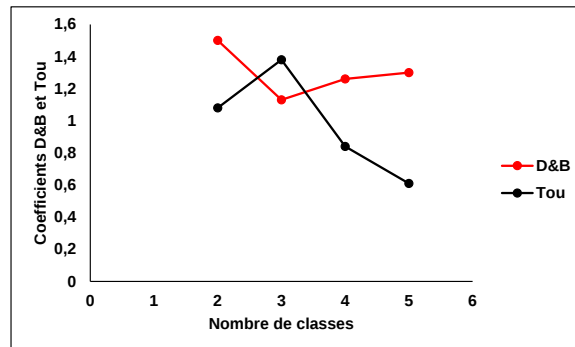


Figure 171 : D&B et Tou en fonction du nombre de classes (reclassement dans la classe rouge de signaux recueillis sur l'éprouvette CS1)

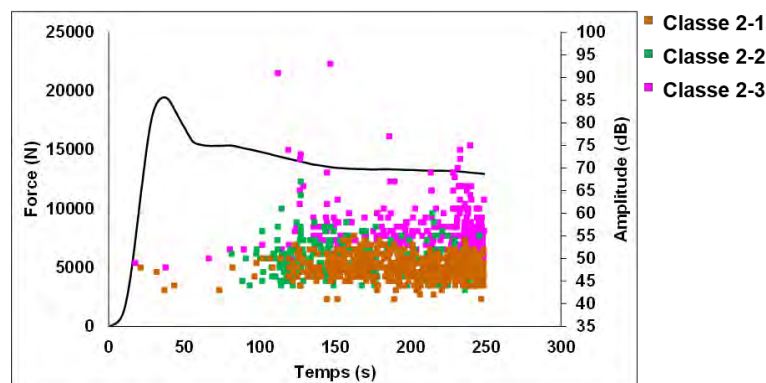


Figure 172 : Résultat du reclassement dans la classe rouge (éprouvette CS1)

III.9- Conclusion

Dans cette partie, cinq éprouvettes de sapin pectiné ont été sollicitées en compression dans le sens du fil. Leurs courbes présentant l'évolution de la charge en fonction du déplacement imposé ainsi que leurs faciès de rupture ont été analysés et comparés. Comme pour le bois de Douglas nous avons observé une correspondance évidente entre l'allure de la courbe ($F-\delta$) et les faciès de rupture pour chaque éprouvette.

La courbe ($F-\delta$) peut aussi être divisée en quatre phases selon son allure, chaque phase pouvait être associée à l'évolution de l'activité acoustique. L'émission acoustique évolue d'une manière différente selon les quatre phases de chargement. Elle reste faible jusqu'à le palier de compression. L'augmentation significative de l'activité acoustique arrive tardivement, dans la dernière phase d'endommagement. La rupture des fibres est provoquée essentiellement par le glissement entre les parties supérieure et inférieure de l'éprouvette au niveau de la bande de cisaillement. Les signaux acoustiques émis n'atteignent que rarement une valeur d'amplitude élevée.

Les mécanismes d'endommagement dans le bois de sapin pectiné soumis à la compression parallèle au fil sont similaires à ceux dans le bois de Douglas, excepté la microfissuration longitudinale à l'interface BI/BF, car le sapin pectiné a des cernes de croissance plus fins et une rigidité beaucoup plus homogène entre le BI et BF. Il semble que, les endommagements du sapin pectiné soient plus concentrés sur la zone de la bande de cisaillement. On retrouve aussi certains endommagements aux extrémités des éprouvettes où la dégradation du matériau due à matage est moins visible que pour le Douglas.

Suivant les mêmes démarches que celles utilisées pour le bois de Douglas, nous arrivons à la même classification des signaux acoustiques et à la même proposition sur le lien entre chaque classe d'EA et les mécanismes d'endommagement.

Concernant les signaux d'EA, ils peuvent être regroupés en deux classes principales, la deuxième classe pouvait être divisée en trois sous-classes. On trouve :

- Classe 1 (bleue) : les signaux acoustiques de la classe 1 peuvent être attribués au glissement entre les plateaux du montage de compression et les extrémités des éprouvettes.
- Classe 2-1 (marron) : Les signaux de la classe 2-1 proviennent de la microfissuration longitudinale à l'interface fibre/rayon due à la coalescence des microfissures dans le sens longitudinal.
- Classe 2-2 (verte) : Les signaux de la classe 2-2 sont émis par les microfissurations transversales dans le BI et le BF initiées par la coalescence des microfissures dans le sens tangentiel.
- Classe 2-3 (rose) : Les signaux de la classe 2-3 témoignent de la rupture des fibres dans le BI et dans le BF.

En ce qui concerne le scénario d'endommagement, la réponse acoustique des éprouvettes en sapin pectiné peut être divisée en 4 phases :

Phase I : Phase linéaire élastique

La phase I représente le comportement linéaire du sapin pectiné où peu d'endommagements n'est décelé. Seuls quelques signaux d'EA de faible amplitude ont été enregistrés.

Phase II : Phase d'endommagement par microfissuration

Cette phase caractérise le comportement non-linéaire de la courbe ($F-\delta$) jusqu'à la charge maximale. Dans la phase II, les endommagements initiés au sein du matériau concernent essentiellement la microfissuration longitudinale par le micro-flambement au niveau des rayons/fibres à cause des défauts de rectitude des fibres. Notons que ces microfissures se situent dans le plan (LR). En compression les microfissures provoquées par le micro-flambement dans le plan (LR) sont ouvertes, donc se propagent de préférence dans le sens L à cause de la participation du mode I due à la contrainte de pelage (la propagation de type TL). Au fur et à mesure de la propagation des microfissures de type TL, la densité de ces microfissures augmente, le matériau s'assouplit de plus en plus, donc la courbe ($F-\delta$) devient non linéaire. Ce mécanisme forme une zone endommagée dans le BI pendant cette phase, ce qui favorise par la suite la formation d'une bande de cisaillement microscopique. Ce phénomène est bien connu dans un bois en compression parallèle au fil sous le nom en anglais de « incipient kinking » (Poulsen 1997).

Phase III : Phase de déclenchement de la formation de la bande de cisaillement

Cette phase commence avec la chute de charge et se termine quand la vitesse de la diminution de charge devient très faible. En effet, au début de la chute de charge, la naissance

et la coalescence des microfissures dans le plan (LR) dues au micro-flambement se produit à l'interface fibre/rayon dans le BF, cela forme une bande de cisaillement microscopique. Ensuite poussé par la contrainte de cisaillement dont la valeur maximale s'oriente à 45° par rapport à la direction du fil sur la face TL, le glissement entre les parties supérieure et inférieure de l'éprouvette dans le sens incliné par rapport au fil est entamé. Ceci est le début de la formation de la bande de cisaillement macroscopique. Elle s'accompagne de la propagation des microfissures, la rupture des fibres et le flambement des mèches de fibres formées par la fissuration dans la bande. Comme mentionnée précédemment, cette phase a été définie en anglais comme « transient kinking » (Poulsen 1997).

Phase IV : Elargissement de la bande de cisaillement macroscopique

Cette partie de charge stable est nommée en anglais dans la littérature « steady-state kinking » (Poulsen 1997). La majorité de cette phase correspond au palier de la courbe où la charge continue à diminuer mais d'une façon très lente, ce qui forme une droite légèrement inclinée. Elle peut elle-même être divisée en deux parties. La partie IV-1 traduit le comportement d'écoulement du matériau à cause de la formation et l'élargissement de la bande de cisaillement. Le glissement par cisaillement est accompagné de la propagation des fissures surtout dans la bande de cisaillement et peu de rupture de fibres est observé. Dans la partie IV-2, la fissuration continue et les fibres du BI et du BF se rompent de plus en plus. En même temps. A la fin de la phase IV-2, le glissement au niveau de la bande de cisaillement s'accélère et conduit à la rupture finale.

Il est important de noter que les conclusions ci-dessus sur le comportement du sapin pectiné en compression parallèle au fil suivi par EA sont proposées en se basant sur des informations limitées. Elles restent à être confirmées par des études complémentaires et plus approfondies.

IV- Endommagement du peuplier sous sollicitation sous sollicitation de compression parallèle au fil

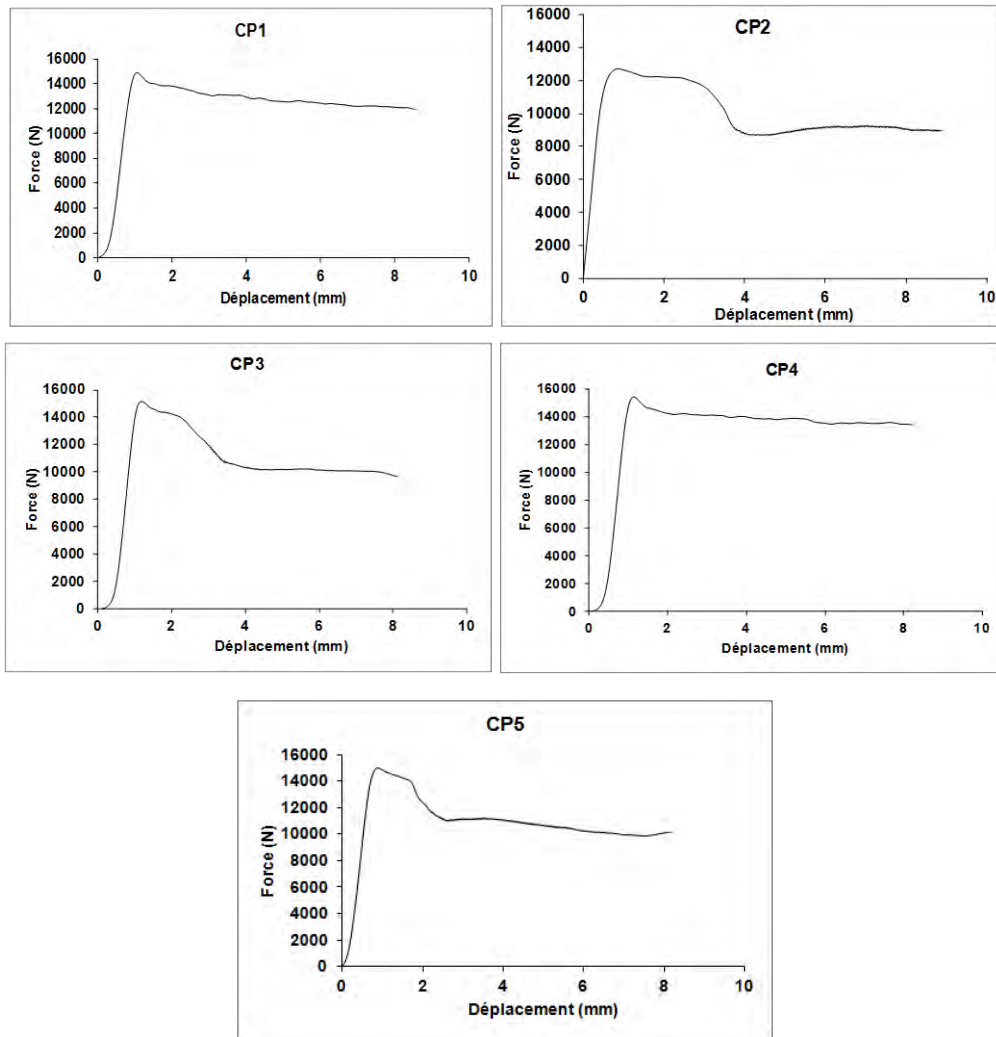
IV.1- Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à l'endommagement du bois de peuplier sous sollicitation de compression parallèle au fil. La même démarche que celle utilisée pour les deux autres bois va être utilisée dans cette partie.

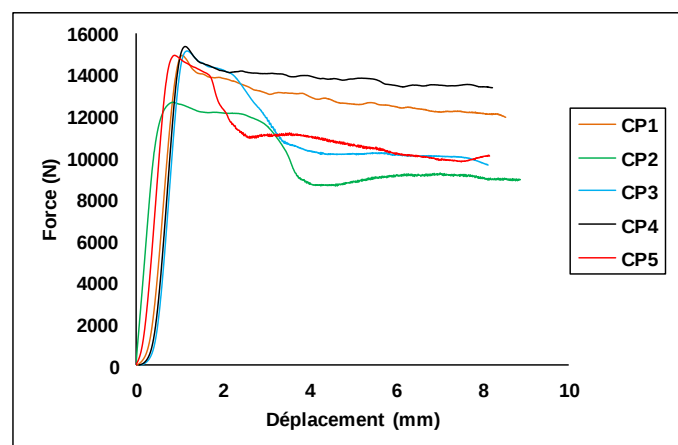
IV.2- Comportement en compression et propriétés mécaniques associées

Le peuplier appartient aux bois feuillus à pores diffus et il est souvent considéré comme un bois homogène. Les courbes force-déplacement ($F-\delta$) (figures 174a-b) affichent une charge maximale et une pente de la partie linéaire assez proche d'une éprouvette à l'autre excepté pour l'éprouvette CP2. En observant l'allure des courbes ($F-\delta$) on distingue facilement comme pour les autres essences, une partie linéaire suivie d'une partie non-linéaire jusqu'à la charge maximale. Ensuite, une chute de la charge commence suivie par un écoulement du matériau. Les courbes des éprouvettes peuvent être divisées en deux groupes selon leur allure après la chute de charge. En effet, pour les éprouvettes CP1 et CP4, leurs courbes montrent une chute après le pic de charge beaucoup moins significative avec une durée très courte, la charge se stabilise à un niveau proche de 90% de la charge maximale durant toute la partie de l'écoulement. Or, pour les trois autres éprouvettes CP2, CP3 et CP5, la chute de charge dure plus longtemps, et le palier d'écoulement affiche une valeur de charge de l'ordre de 70% à 75% de la charge maximale pour les éprouvette CP3 et CP5. L'éprouvette CP2 affiche une charge maximale plus faible et la chute de charge s'effectue après une période de stabilisation

de la charge autour de 90% de la force maximale. La durée de cette période est quasiment identique à celles observées pour les éprouvette CP3 et CP5.



(a)



(b)

Figure 173 : Courbes force-déplacement du lot d'éprouvettes de peuplier sollicitées en compression parallèle au fil (a) les cinq courbes isolées (b) les cinq courbes superposées

Les propriétés mécaniques mesurées sur les cinq éprouvettes en peuplier sollicitées en compression parallèle au fil sont regroupées dans le tableau 35 et comparées avec les résultats de la littérature. La dispersion des résultats est très faible si l'on élimine la contrainte maximale mesurée sur l'éprouvette CP2. Elle est inférieure à 1,5%. Les résultats obtenus dans cette étude sont situés en haut de la fourchette des résultats indiquée par Sell et Kropf 1990.

Tableau 35 : Propriétés mécaniques mesurées sur les éprouvettes en peuplier sollicitées en compression longitudinale

Eprouvettes	Modules d'Young mesurés (GPa)	Module d'Young (GPa) (littérature)	Contraintes maximales (MPa)	Contrainte maximale (MPa) (littérature)
CP1	9,5	8,1-9,6**	37,3	29,0-37,0**
CP2	9,8		31,6*	
CP3	9,6		37,7	
CP4	9,6		38,2	
CP5	9,7		37,1	
Moyenne	9,6		37,7	
Coefficient de variation	±1,5 %		±1,5 %	

*Valeur éliminée du calcul de contrainte moyenne

**Sell et Kropf 1990. Propriétés et caractéristiques des essences de bois

IV.3- Observation des faciès de rupture

Les faciès de rupture du lot d'éprouvettes de peuplier peuvent être regroupés en deux séries. La première série comprend trois éprouvettes CP2, CP3 et CP5, dont la chute de charge après la valeur maximale est progressive et significative. La rupture principale observée est surtout liée à l'écoulement du matériau. La bande de cisaillement est localisée en dehors des extrémités de l'éprouvette (figures 174-176). La ligne de rupture par glissement sur la face (LR) est soit horizontale et perpendiculaire au fil, soit légèrement inclinée (figure 174). Sur la face (LT) la bande est fortement inclinée. Les angles d'inclinaison sont de 30°, 20° et 25° pour les éprouvettes CP2, CP3 et CP5 respectivement. Une faible zone de matage au niveau du pied des éprouvettes est aussi observée. Nous avons remarqué également des fissurations transverses sur les éprouvettes CP2 et CP5. Des ouvertures de fissures sous l'effet du mode I sont constatées dans la face (LT) de l'éprouvette CP3 dans la bande de cisaillement, qui est proche du pied de l'éprouvette (figure 175).

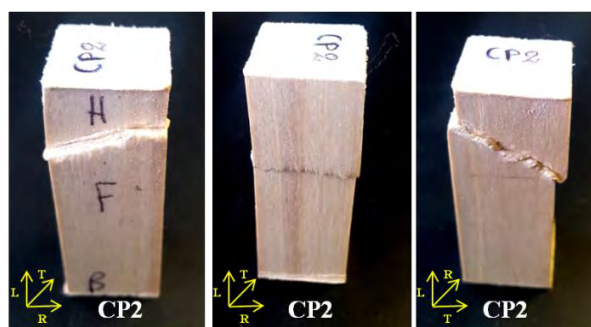


Figure 174 : Faciès de rupture de l'éprouvette CP2

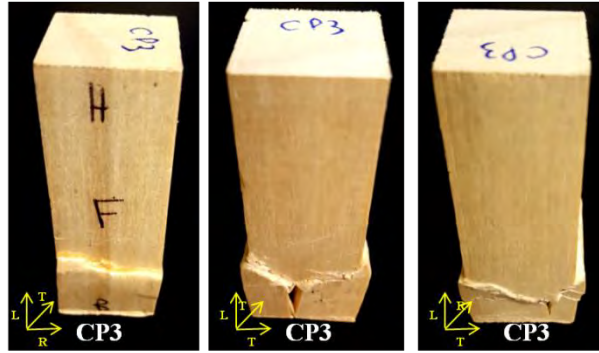


Figure 175 : Faciès de rupture de l'éprouvette CP3

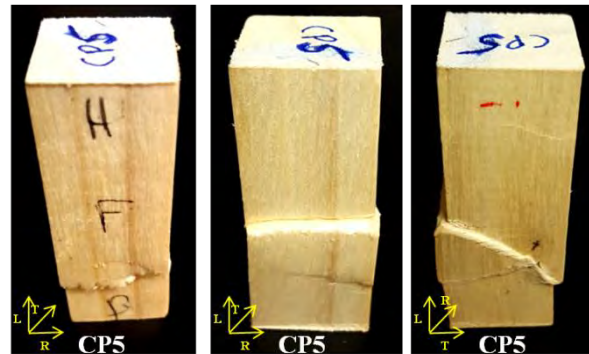


Figure 176 : Faciès de rupture de l'éprouvette CP5

Les faciès de rupture des éprouvettes CP1 et CP4 sont similaires. Sur l'éprouvette CP1, une zone importante de matage au niveau du pied a été constatée (figure 177), où l'on voit des clivages aussi bien sur la face (LT) que sur la face (LR). Cela témoigne de l'existence de fissuration de type TL et RL. Lorsque ces fissures débouchent à la surface de l'éprouvette, sous la sollicitation de compression et flexion combinée, le glissement des bois fissurés et des fibres écrasées engendrent une déchirure au bord de l'éprouvette (figure 177). On peut aussi constater le début de la formation d'une bande de cisaillement sur la face (LR) avant (première photo de la figure 177) et les rides horizontales sur la face (LR) arrière (deuxième photo de la figure 177). Quant à l'éprouvette CP4 (figure 178), le faciès de rupture affiche un énorme écrasement des fibres au niveau du pied comme pour l'éprouvette CP1 et un léger écrasement en haut de l'éprouvette. On voit également une bande de cisaillement qui s'est formée au pied de l'éprouvette.

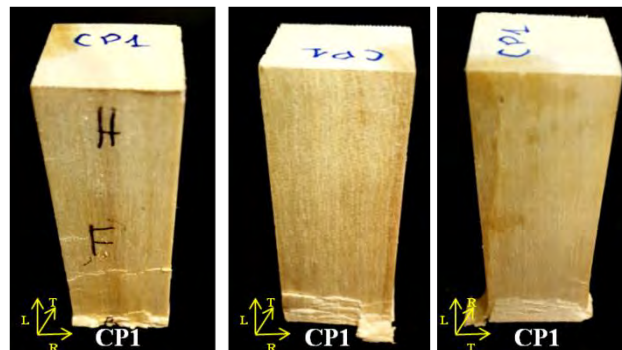


Figure 177 : Faciès de rupture de l'éprouvette CP1

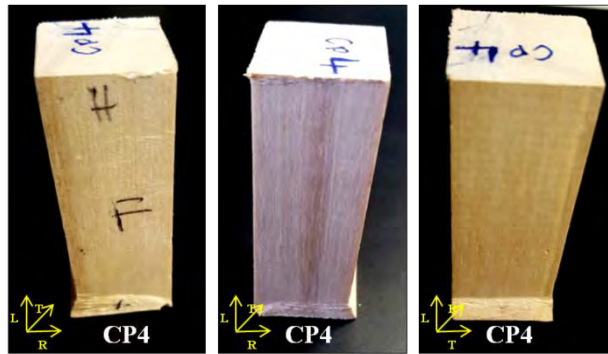


Figure 178 : Faciès de rupture de l'éprouvette CP4

L'éprouvette CP2 est sélectionnée pour la suite de l'analyse, favorisant ainsi une meilleure propagation des signaux jusqu'au capteur.

IV.4- Mécanismes d'endommagement des éprouvettes de peuplier sollicitées en compression parallèle au fil

Les mécanismes de rupture observés sur les éprouvettes en peuplier sont proches de ceux observés pour le sapin pectiné. Etant homogène, la fissuration longitudinale aux interfaces des constituants due à une rigidité différente devrait être quasiment absente. La partie non linéaire juste avant la charge maximale provient du micro-flambement dans le bois au niveau des rayons. Si ce micro-flambement se localise assez loin des extrémités de l'éprouvette, la chute de charge après la valeur maximale est relativement progressive et de durée moyenne. Elle correspond plutôt à la propagation des microfissures de type TL au niveau des rayons radiaux. Le comportement d'écoulement au niveau du palier provient surtout du glissement par cisaillement pour former une bande de cisaillement. Lorsque le micro-flambement au niveau des cellules dans le sens radial intervient d'abord dans une zone proche du pied de l'éprouvette, la microfissuration à partir du flambement pourrait être limitée par la force de frottement entre les deux surfaces en contact. Le glissement par cisaillement rencontre alors plus de résistance. Cela explique pourquoi la charge au palier reste quasiment proche de celle de la valeur maximale. Dans ce cas on peut conclure que les mécanismes principaux sont la fissuration de type TL et RL et aussi le glissement entre les deux surfaces en contact au pied de l'éprouvette.

IV.5- Analyse de l'activité acoustique

La figure 179 représente l'évolution de la charge appliquée au matériau associée à l'activité acoustique en fonction du temps d'essai. L'activité acoustique est représentée par le nombre de salves cumulées (figure 179a), l'amplitude (figure 179b) et l'énergie cumulée (figure 179c). En se basant sur l'allure de la courbe force-déplacement ($F-\delta$) et sur la réponse acoustique, quatre phases peuvent être distinguées :

Phase I : Phase élastique linéaire

Cette phase correspond à la partie linéaire de la courbe ($F-\delta$). Dans cette phase aucun signal d'EA n'est détecté.

Phase II : Phase d'endommagement par microfissuration

Cette phase débute lorsque la courbe commence à devenir non-linéaire et se termine lorsque la charge atteint une valeur maximale. Cette phase caractérise le comportement non-linéaire de la courbe ($F-\delta$) jusqu'à la charge maximale. Quelques signaux de faible amplitude

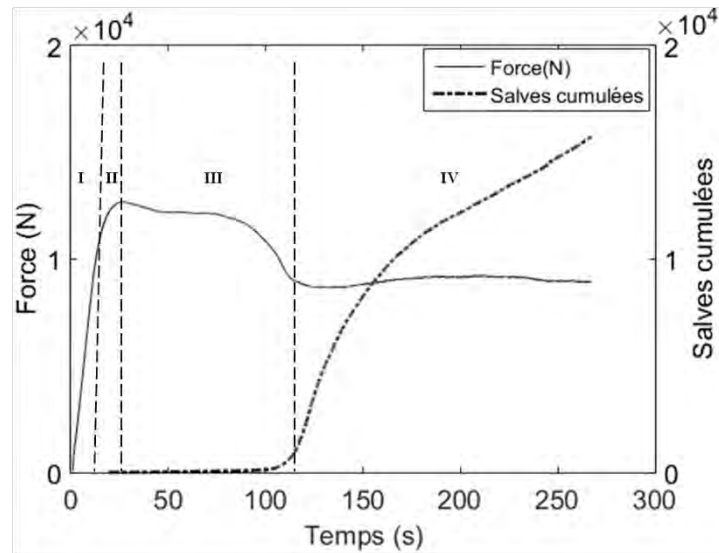
(<45 dB) sont détectés à la fin de cette phase (figure 179a-b). L'énergie cumulée est faible (figure 179c).

Phase III : Phase de déclenchement de la formation de la bande de cisailment

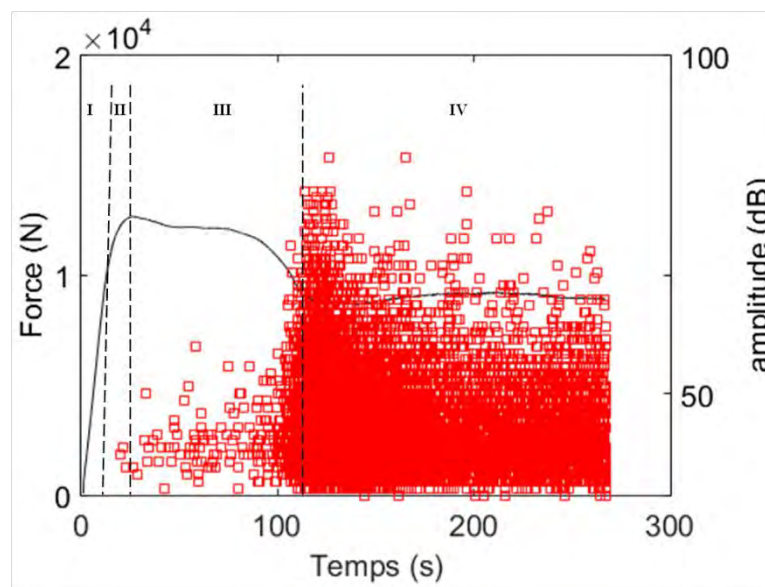
Cette phase commence avec la chute de charge et se termine quand la vitesse de la diminution de charge devient très faible. Au début de cette phase l'évolution du nombre de salves cumulées (figure 179a) ainsi que l'évolution de l'énergie cumulée (figure 179c) restent faibles avec une amplitude qui ne dépasse pas 55 dB (figure 179b). Vers la fin de la phase l'activité acoustique subit une augmentation et l'amplitude des signaux atteint une valeur de 75 dB (figure 179b).

Phase IV : Elargissement de la bande de cisailment macroscopique

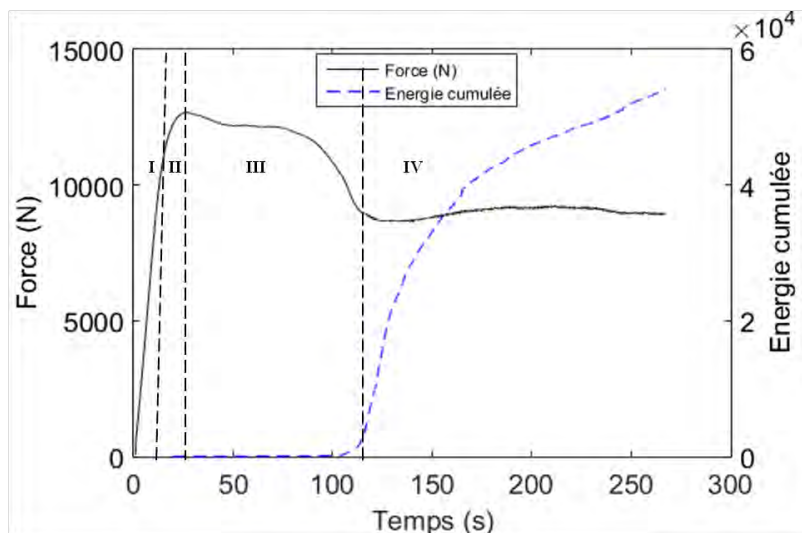
Cette phase correspond au plateau de la courbe. Elle est caractérisée par une intensification de l'activité acoustique. Les courbes de l'évolution du nombre de salves cumulées ainsi que l'énergie cumulée suivent la même allure. L'amplitude des signaux est comprise entre 35 dB et 85 dB (figure 179b).



(a)



(b)

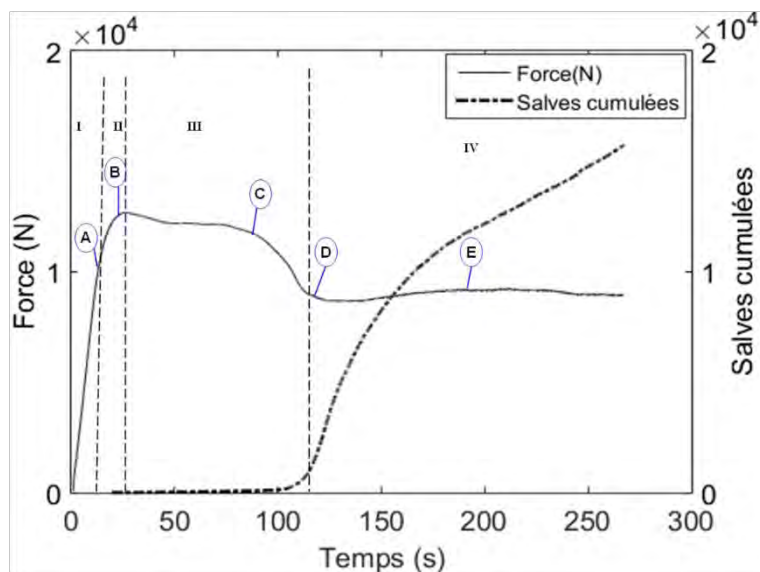


(c)

Figure 179 : Evolution de la charge et de l'activité acoustique en fonction du temps (a) salves cumulées (b) répartition des amplitudes (c) énergie cumulée

IV.6- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique

Pour le peuplier, la phase I est exempte de tout endommagement visible (figure 180-Point A). Dans la phase II, la photo extraite du film ne montre aucun endommagement particulier (figure 180b-Point B). Les signaux détectés peuvent être générés par le début du micro-flambement dans le bois au niveau des rayons. Si ce flambement se localise assez loin des extrémités de l'éprouvette, la chute de charge après la valeur maximale se met en place de manière progressive (Phase III) correspond plutôt à la propagation de microfissures au niveau des rayons radiaux. Au cours de cette phase, des traces de bande de cisaillement apparaissent sur l'éprouvette (figure 180-Point C). Le comportement d'écoulement au palier (Phase IV) provient surtout du glissement par cisaillement de la bande. On observe pendant cette phase, l'apparition nette de la bande (figure 180b-Point D) et son élargissement (figure 180b-Point E).



(a)

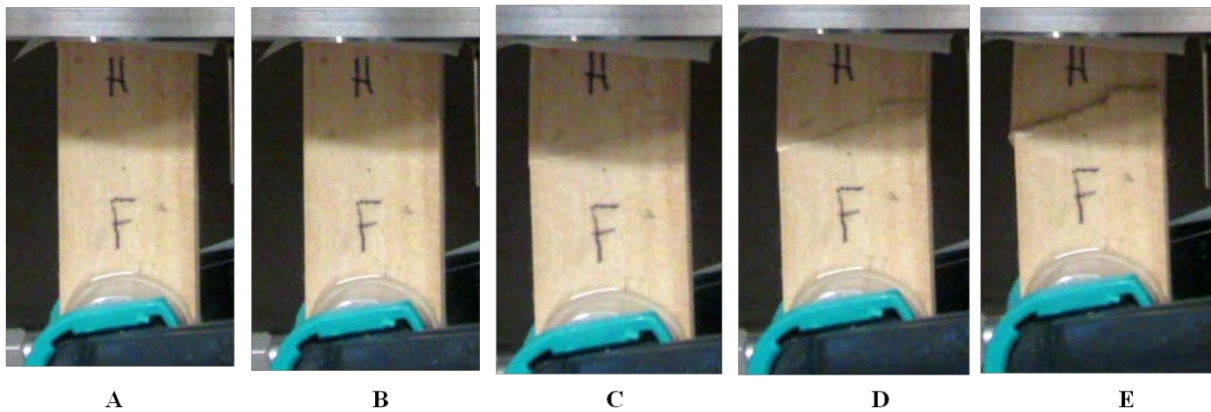


Figure 180 : Différents stades d'endommagement de l'éprouvette CP2 (a) Courbe de l'évolution de la charge et de l'activité acoustique en fonction du temps (b) Photos de la surface de l'échantillon (face LR) extraites du film à des points particuliers

IV.7- Classement des données acoustiques

La majorité des signaux sont recueillis par le capteur R6(1) comme montré sur la figure 181, donc, nous utiliserons ses résultats pour la suite de l'analyse.

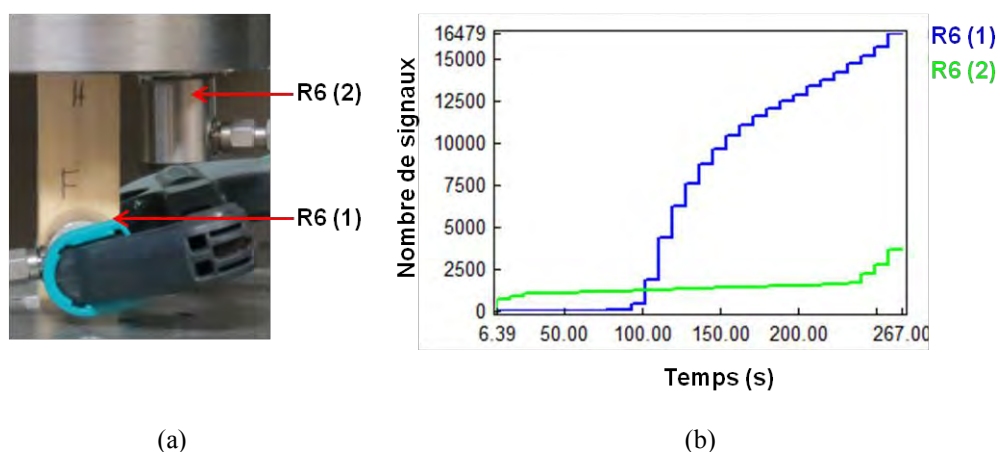


Figure 181 : (a) Positions des capteurs (b) Nombre de signaux enregistrés par chaque capteur

A- Optimisation du nombre de classes

La figure 182 montre l'évolution des critères de validation (Davies et Bouldin et Tou) en fonction du nombre de classes. Le nombre de classe qui minimise le critère de Davies et Bouldin et maximise Tou est égal à 2.

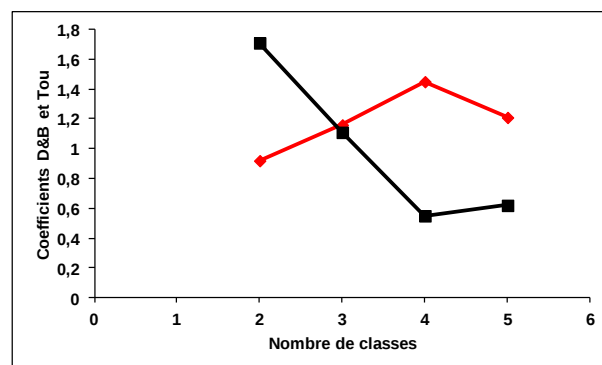


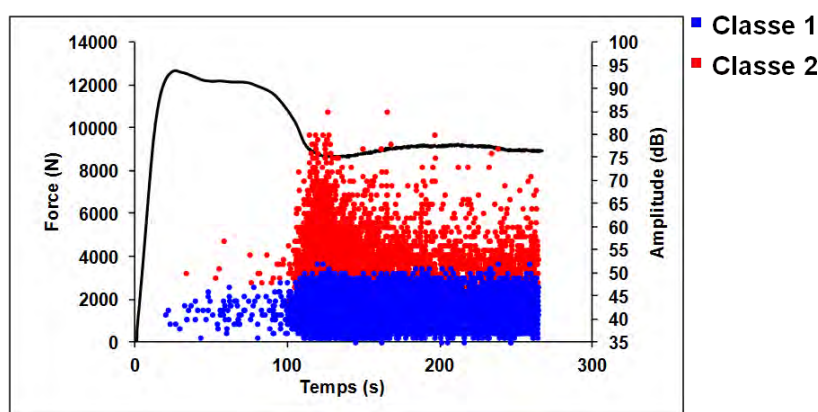
Figure 182 : Variation des coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes (éprouvette CP2)

B- Résultats de la classification par la méthode des k-moyennes

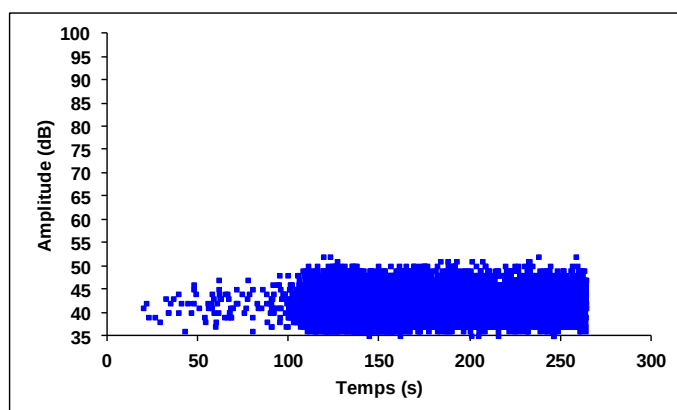
Les résultats de la classification des signaux recueillis lors de l'endommagement de l'éprouvette CP2 sont présentés au regard de l'amplitude des salves sur la figure 183.

La classe 1 (classe bleue) contient 70,7% des signaux. La signature acoustique de ces signaux est caractérisée par une faible amplitude, une faible énergie et une durée moyenne (Tableau 36). Cette classe démarre d'une façon importante lors de l'apparition macroscopique de la bande de cisaillement. Elle évolue ensuite d'une manière constante jusqu'à la fin de l'essai. Ainsi, le glissement des parties supérieure et inférieure de l'éprouvette engendre un frottement entre l'éprouvette et les plateaux du montage de compression. Les caractéristiques de cette classe (Tableau 36) sont proches des caractéristiques des autres classes bleue identifiées pendant l'endommagement du Douglas et du sapin pectiné en compression parallèle au fil (Tableaux 27, 31,34). Par analogie avec les résultats de Douglas et de sapin pectiné, cette classe peut être attribuée à tout type de frottement entre l'éprouvette et les plateaux du montage de compression.

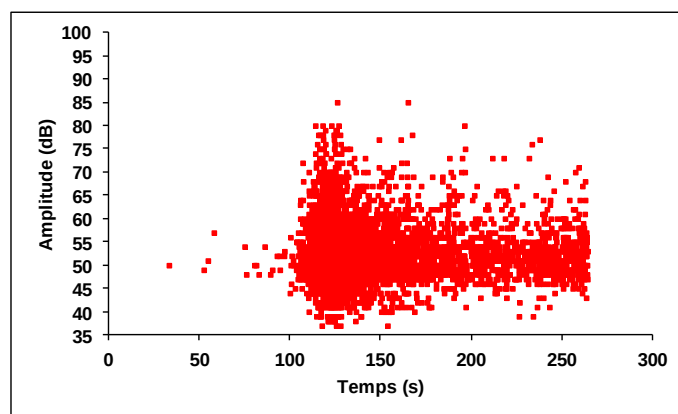
La classe 2 (classe rouge) contient 29,4% des signaux. La forme d'onde de ces signaux est caractérisée par une longue durée, une amplitude moyenne et une énergie importante (Tableau 36). Cette classe démarre d'une manière importante lorsque l'on approche du palier de compression. Elle peut être attribuée à tous les types d'endommagements observés sur le faciès de rupture de l'éprouvette CP2 qui ont principalement comme conséquence la formation et l'élargissement de la bande de cisaillement sur les deux faces (LT) et (LR) (figure 184).



(a)



(b)



(c)

Figure 183 : Résultats de classification (a) Répartition temporelle des classes de signaux recueillis sur l'éprouvette CP2 (b) classe bleue (c) classe rouge

Tableau 36 : Moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs de chaque classe pour l'éprouvette CP2

Descripteurs	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	70,6	29,4
Temps de montée (μ s)	62 (150)	97 (149)
Durée (μ s)	323 (317)	676 (351)
Amplitude (dB)	41 (3)	53 (6)
Nombre de coups	11 (7)	34 (16)
Nombre de coups au pic	4 (3)	11 (7)
Energie absolue (aJ)	66 (53)	3175 (25687)
Fréquence moyenne (kHz)	41 (19)	54 (17)
Fréquence initiale (kHz)	182 (568)	179 (422)
Fréquence de réverbération (kHz)	33 (48)	47 (16)
Pic fréquentiel (kHz)	43 (13)	68 (33)
Barycentre fréquentiel (kHz)	304 (25)	213 (35)

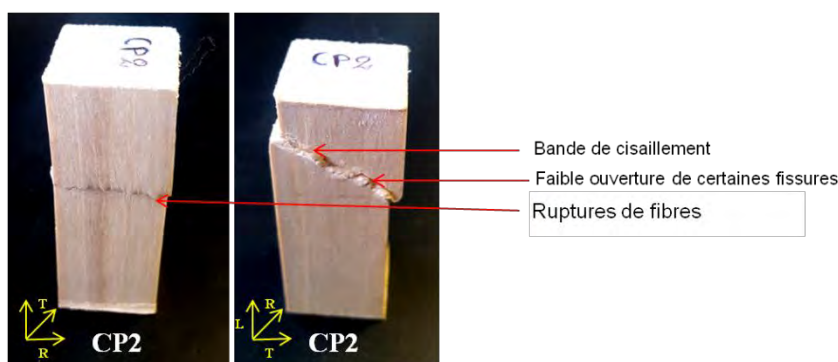


Figure 184 : Différents modes de rupture observés sur le faciès de rupture de l'éprouvette CP2

Comme pour les autres essences, un reclassement des signaux de la classe rouge a été réalisé afin d'affiner l'analyse et voir si l'on peut dissocier les classes des différents mécanismes d'endommagement. Les critères statistiques ne sont pas totalement en cohérence l'un avec l'autre (figure 185). En effet, le critère de Davies et Bouldin est minimisé pour un nombre de classes égal à 3 alors que le critère de validation Tou est maximisé pour un nombre

de classes égal à 2 (figure 185). Cependant, la variation du critère Tou entre 2 et 3 classes est faible. En effet Tou est égal à 1,27 pour un nombre de classe égal à 2 et 1,21 pour un nombre de classe égal à 3. Donc, on se base dans notre classification principalement sur le critère de Davies et Bouldin qui valide 3 classes de signaux.

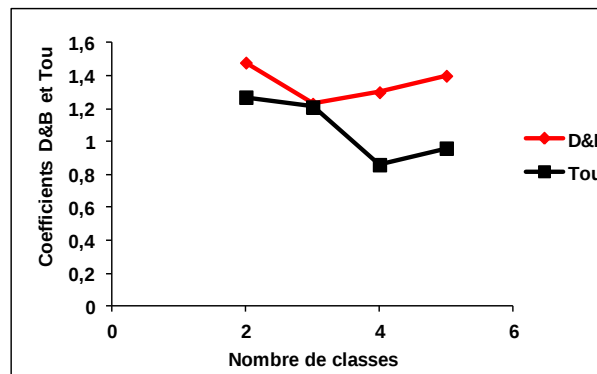
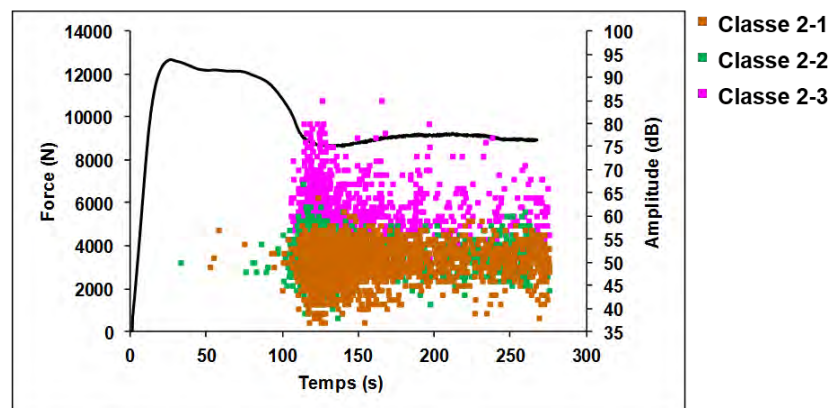


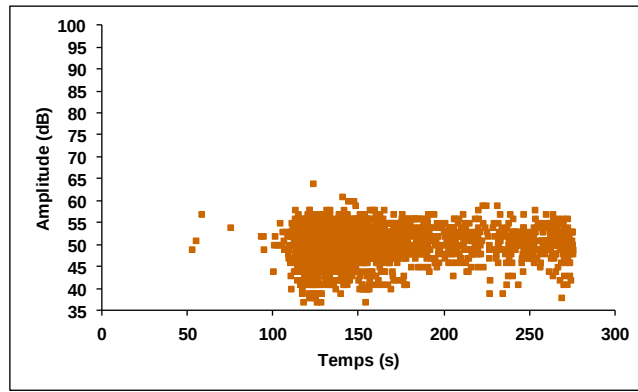
Figure 185 : Variation des coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes (reclassement des signaux de la classe rouge éprouvette CP2)

Les résultats du retraitement des signaux de la classe rouge (classe 2) sont présentés au regard de l'amplitude des salves sur la figure 186. Les caractéristiques des trois sous-classes, nommées classe 2-1, 2-2 et 2-3, sont résumées dans le Tableau 37. La classe 2-1 (marron) et la classe 2-2 (verte) sont quasiment superposées à partir du palier de la courbe. Ces deux sous-classes possèdent pratiquement les mêmes caractéristiques (Tableau 37). Elles ne se différencient qu'au niveau du pic fréquentiel (Tableau 37). Les deux sous-classes pourraient être attribuées à la fissuration longitudinale et à la fissuration transversale dans la bande de cisaillement. A ce stade, étant donné que les signatures acoustiques de ces deux classes sont très proches, il est donc difficile de faire la différence de ces deux classes par rapport au type de fissuration. Cependant on va quand-même dans un premier temps attribuer la classe 2-1 à la microfissuration longitudinale et la classe 2-2 à la microfissuration transversale. Ce choix est basé sur le fait que les signaux d'EA de la classe 2-1 sont plus nombreux que ceux de la classe 2-2 dans la phase II et III où la fissuration longitudinale due au micro-flambement est le mécanisme principal. Mais cette attribution reste une hypothèse qu'il va falloir approuver par d'autres essais plus approfondis.

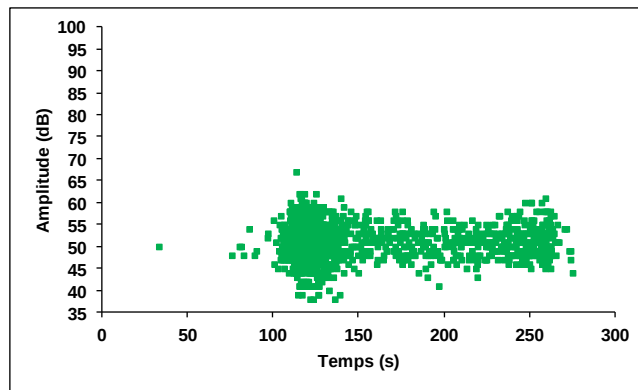
Quant à la sous-classe 2-3 (rose), elle se différencie des deux autres sous-classes par une énergie beaucoup plus importante, une longue durée et une amplitude un peu plus élevée (Tableau 37). On pourrait l'attribuer aux phénomènes de rupture de fibres par cisaillement.



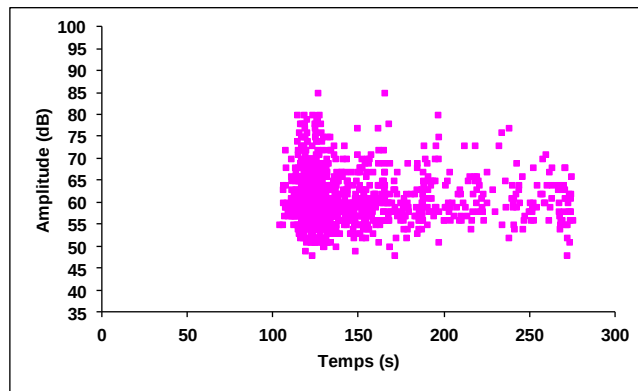
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 186 : Résultats de la classification (a) Répartition temporelle des sous-classes de signaux recueillis sur l'éprouvette CP2 (b) sous-classe 2-1 (c) sous-classe 2-2 (d) sous-classe 2-3

Tableau 37 : Moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs de chaque sous-classe pour l'éprouvette CP2

Descripteurs	classe 2-1	classe 2-2	classe 2-3
% des signaux	44,1	31,9	23,9
Temps de montée (μ s)	95 (152)	66 (80)	142 (195)
Durée (μ s)	669 (278)	439 (154)	1007 (397)
Amplitude (dB)	50 (4)	51 (4)	61 (6)
Nombre de coups	28 (10)	29(9)	52 (19)
Nombre de coups au pic	7 (5)	7 (4)	12 (10)
Energie absolue (aJ)	431 (349)	459 (494)	11868 (51581)
Fréquence moyenne (kHz)	45 (10)	69 (15)	54 (12)
Fréquence initiale (kHz)	160 (267)	222 (634)	158 (268)
Fréquence de réverbération (kHz)	36 (9)	60 (14)	48 (12)
Pic fréquentiel (kHz)	47 (24)	96 (23)	69 (32)
Barycentre fréquentiel (kHz)	223 (23)	235 (23)	166 (20)

IV.8- Comparaison des résultats avec les autres éprouvettes

Le faciès de rupture de l'éprouvette CP3 présente des fissures plus importantes que celles de l'éprouvette CP2. En effet, des ouvertures de fissures sous l'effet du mode I sont constatées sur la face (LT) dans la bande de cisaillement inclinée (figure 187). Le nombre de classes optimal pour les signaux recueillis lors de l'endommagement de cette éprouvette (CP3) est égal à deux. Les résultats de classification sont montrés sur la figure 188. Les valeurs moyennes des descripteurs qui caractérisent les deux classes sont résumées dans le Tableau 38. On constate qu'ils varient dans le même ordre de grandeur que ceux qui caractérisent les deux classes principales dissociées pour le cas de l'éprouvette CP2 (Tableau 36). On constate aussi, que les signaux de la classe rouge ont des amplitudes plus importantes que les signaux de l'éprouvette CP2. En effet, les amplitudes montent à 99 dB, ce qui n'est pas le cas pour l'éprouvette CP2. Ceci peut être expliqué par l'importance de l'ouverture de la fissure observée sur la bande de cisaillement à proximité du pied de l'éprouvette (figure 187), qui induit une rupture de fibres plus importante. Ensuite, il reste à reclasser les signaux du groupe rouge, pour voir si la classification est reproductible.

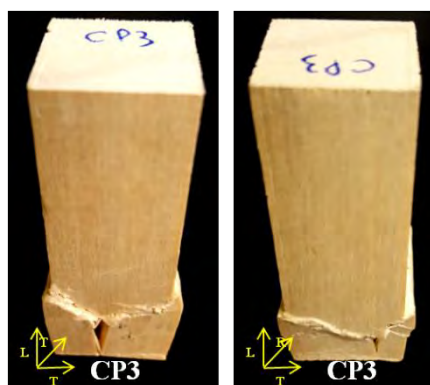


Figure 187 : Faciès de rupture de l'éprouvette CP3

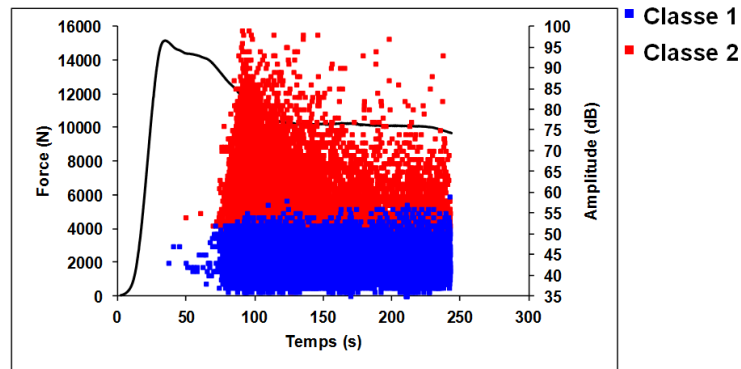


Figure 188 : Répartition temporelle des classes de signaux recueillis sur l'éprouvette CP3

Tableau 38 : Moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs de chaque classe pour l'éprouvette CP2

Descripteurs	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	58,4	41,6
Temps de montée (μ s)	45 (518)	95 (357)
Durée (μ s)	214 (692)	658 (853)
Amplitude (dB)	44 (3)	58 (9)
Nombre de coups	11 (17)	40 (36)
Nombre de coups au pic	3 (13)	7 (13)
Energie absolue (aJ)	72 (123)	36312 (518704)
Fréquence moyenne (kHz)	65 (28)	64 (16)
Fréquence initiale (kHz)	264 (480)	209 (407)
Fréquence de réverbération (kHz)	54 (48)	60 (17)
Pic fréquentiel (kHz)	58 (32)	82 (31)
Barycentre fréquentiel (kHz)	308 (37)	193 (34)

Les critères statistiques pour le reclassement de la classe rouge de l'éprouvette CP3 ne sont pas en cohérence entre eux. En effet, le critère de Davies et Bouldin est minimisé pour un nombre de classes égal à 3 par contre il ne varie pas beaucoup par rapport à un nombre de classes égal à 2 (1,27 pour 3 classes et 1,29 pour 2 classes) (figure 189). D'autre part, le critère Tou est maximisé pour un nombre de classes égal à 2. Afin de faire une comparaison avec les résultats de l'éprouvette CP2, on va analyser le résultat des trois sous-classes.

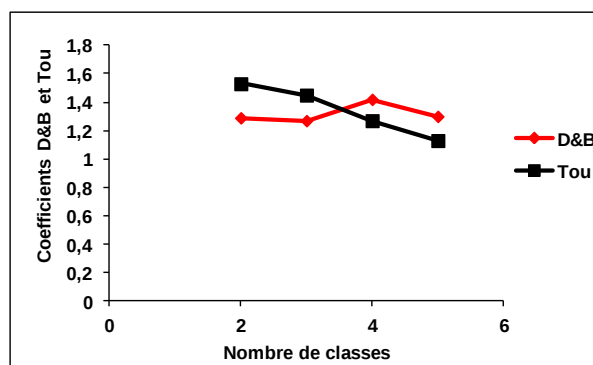


Figure 189 : Variation des coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes (reclassement dans la classe rouge des signaux recueillis sur l'éprouvette CP3)

Les résultats de la reclassification des signaux de la classe rouge de signaux recueillis sur l'éprouvette CP3 sont présentés au regard de l'amplitude des salves sur la figure 190. On retrouve un résultat identique à celui de CP2, avec les deux classes 2-1 (marron) et 2-2 (verte) superposées et une troisième classe 2-3 (rose) au-dessus qui contient les signaux de hautes amplitudes. Les caractéristiques de ces trois sous-classes sont résumées dans le Tableau 39. La première constatation en analysant les données du Tableau 39 est que les valeurs moyennes des descripteurs de la classe 2-1 (marron) et la classe 2-2 (verte) sont quasi-identiques. La différence est observée juste au niveau du pic fréquentiel. En outre, en comparant avec le résultat de l'éprouvette CP2 (Tableau 37), on constate que tous les descripteurs des trois sous-classes pour les deux éprouvettes sont du même ordre de grandeur mis à part l'énergie. En effet, l'énergie est plus importante pour le cas de l'éprouvette CP3. Ceci est logique puisque cette éprouvette présente plus de ruptures de fibres que l'éprouvette CP2.

Finalement, comme pour l'éprouvette CP2, les deux sous-classes 2-1 et 2-2 peuvent être attribuées aux microfissurations longitudinales et transversales. Elles se différencient uniquement au niveau d'un seul paramètre qui est le pic fréquentiel. Ceci explique la faible variation des deux critères de validation de Davies et Bouldin et Tou entre un nombre de classes égal à 2 et un nombre de classes égal à 3 lors du reclassement dans la classe d'endommagement (classe rouge).

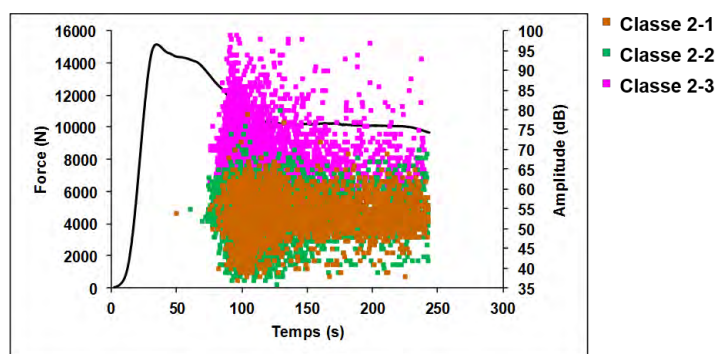


Figure 190 : Répartition temporelle des sous-classes des signaux recueillis sur l'éprouvette CP3

Tableau 39 : Moyennes et écarts-types entre parenthèses des descripteurs de chaque sous-classe pour l'éprouvette CP3

Descripteurs	Classe 2-1	Classe 2-2	Classe 2-3
% des signaux	21,1	49,7	29,2
Temps de montée (μs)	78 (688)	75 (146)	142 (238)
Durée (μs)	557 (1606)	470 (244)	1035 (556)
Amplitude (dB)	53 (5) :	53 (5)	68 (7)
Nombre de coups	28 (50)	31 (14)	65 (36)
Nombre de coups au pic	5 (19)	5 (7)	10 (15)
Energie absolue (aJ)	1025 (3611)	884 (3378)	122131 (954577)
Fréquence moyenne (kHz)	53 (5)	53 (5)	68 (7)
Fréquence initiale (kHz)	217 (402)	229 (479)	168 (238)
Fréquence de réverbération (kHz)	50 (13)	65 (18)	61 (14)
Pic fréquentiel (kHz)	36 (8)	100 (16)	85 (27)
Barycentre fréquentiel (kHz)	207 (25)	211 (23)	152 (19)

IV.9- Conclusion

Dans cette partie, les courbes d'évolution de la charge en fonction du déplacement de cinq éprouvettes de peuplier ainsi que leurs faciès de rupture sont analysés et comparés. Il semble que l'allure des courbes dépende du mode de rupture. En effet, les éprouvettes qui présentent des faciès de rupture similaires, ont des courbes qui évoluent de la même manière contrairement aux éprouvettes qui montrent des faciès différents.

L'émission acoustique évolue d'une manière différente selon les quatre stades de chargement. Elle est quasi-nulle avant que la charge atteigne sa valeur maximale. L'augmentation importante de l'activité est observée à la fin de la chute de la charge et au début du palier de compression. Les signaux de très hautes amplitudes ne sont observés que pour le cas des éprouvettes qui montrent une rupture de fibres sous tension.

La méthode de classification a permis de dissocier quatre classes de signaux. En revanche, les deux classes associées à la microfissuration sont difficiles à distinguer. On propose cependant une correspondance entre les quatre classes de signaux d'EA dissociées et les mécanismes comme suit.

- Classe 1 (bleue) : les signaux acoustiques de la classe bleue pourraient être attribués au glissement entre les plateaux du montage de compression et les extrémités des éprouvettes.
- Classe 2-1 (marron) : les signaux de la classe 2-1 proviennent de la microfissuration longitudinale à l'interface fibre/rayon, conséquence de la coalescence des microfissures dans le sens longitudinal.
- Classe 2-2 (verte) : les signaux de la classe 2-2 sont émis par la microfissuration transversale dans le BI et le BF, conséquence de la coalescence des microfissures dans le sens tangentiel.
- Classe 2-3 (rose) : les signaux de la classe 2-3 témoignent de la rupture des fibres.

En ce qui concerne le scénario d'endommagement chez le peuplier, la réponse des éprouvettes ressemble beaucoup à celle du sapin pectiné. Elle peut être divisée en 4 phases :

Phase I : Phase linéaire élastique

La phase I représente le comportement linéaire du peuplier où aucun endommagement visuel n'est décelé. Aucun signal d'EA n'est enregistré.

Phase II : Phase d'endommagement par microfissuration

Cette phase caractérise le comportement non-linéaire de la courbe ($F-\delta$) jusqu'à la charge maximale. Dans la phase II, les endommagements développés au sein du matériau concernent essentiellement la microfissuration longitudinale par micro-flambement au niveau des interfaces rayons/fibres dû aux défauts de rectitude des fibres.

Phase III : Phase de déclenchement de la formation de la bande de cisaillement

Cette phase commence avec la chute de charge et se termine quand la vitesse de diminution de charge devient très faible. En effet, au début de la chute de charge, la naissance et la coalescence des microfissures dans le plan (LR) dû au micro-flambement se produit à l'interface fibre/rayon dans le bois. Cela forme une bande de cisaillement microscopique. Ce processus est très lent et progressif pour les éprouvettes de peuplier. Dès que la densité des microfissures devient suffisamment importante, le glissement incliné entre les parties supérieure et inférieure de l'éprouvette est entamé.

Phase IV : Elargissement de la bande de cisaillement macroscopique

La majorité de cette phase correspond au palier de la courbe où la charge continue à diminuer mais d'une façon très lente. Cette phase couvre la partie de charge quasi-constante. Le comportement d'écoulement du matériau est engendré par la formation et l'élargissement de la bande de cisaillement. Le glissement par cisaillement est accompagné de la propagation des fissures longitudinales surtout dans la bande de cisaillement et de la propagation de fissures dans le sens tangentiel. Ces propagations sont accompagnées de rupture de fibres. A la fin de la phase IV, le glissement au niveau de la bande de cisaillement s'accélère et conduit à la rupture finale.

Il est important de noter que les conclusions ci-dessus sur le comportement du peuplier en compression parallèle au fil suivi par EA sont proposées en se basant sur des informations limitées. Elles restent à être confirmées par des études complémentaires plus approfondies.

V- Comparaison entre les trois essences

En compression parallèle au fil, les propriétés mécaniques mesurées sur les éprouvettes de Douglas sont plus élevées que celles mesurées sur les éprouvettes de sapin pectiné qui sont à leur tour plus élevées par rapport aux propriétés mesurées sur les éprouvettes de peuplier. Ceci est lié à la densité des essences. En général, les propriétés mécaniques du matériau bois augmentent avec l'augmentation de sa densité (Johansson 2002, Da Silva et Kyriakides 2007, Crekin et Surini 2008, Trouy et Triboulot 2012) (Tableau 40).

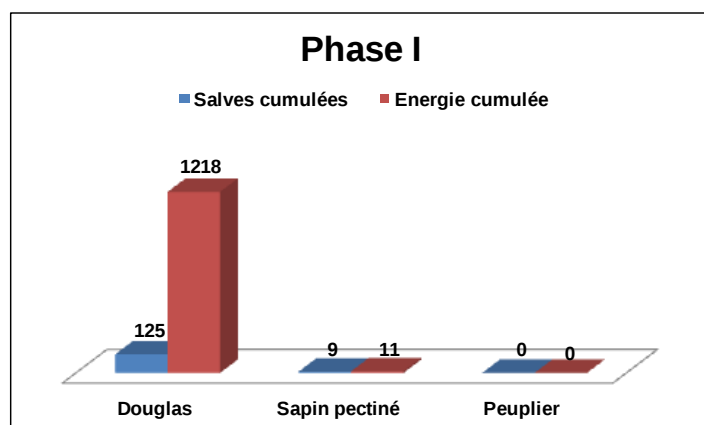
Tableau 40 : Propriétés mécaniques et densités mesurées sur les trois essences étudiées

Essences	Densité	Module d'élasticité (MPa)	Contrainte maximale (MPa)
Douglas	0,50	11,90	50,80
Sapin pectiné	0,45	11,40	48,00
Peuplier	0,41	9,60	37,70

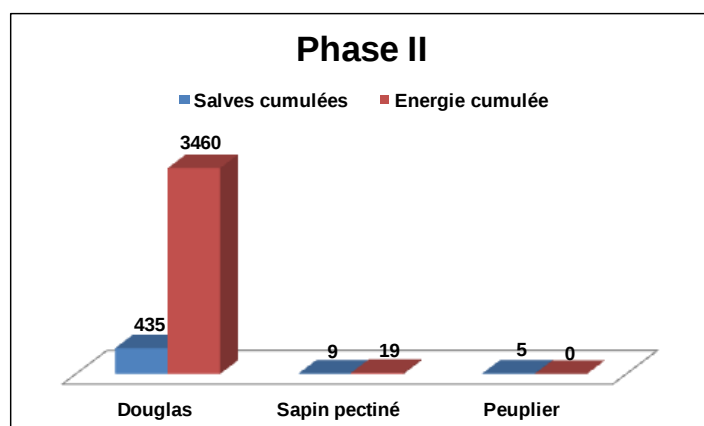
Pour les trois essences, les éprouvettes qui sont endommagées en formant une bande de cisaillement présentent des courbes (F- δ) d'allures similaires. En effet, ces courbes présentent quatre parties : la phase I montre la partie linéaire de la courbe, la phase II désigne la partie non-linéaire jusqu'à la charge maximale, la phase III présente la période où la charge subit une chute de durée plus ou moins courte, suivie par un palier de compression (Phase IV), où la charge demeure quasi-constante. De plus, pour les trois essences étudiées, l'allure de la courbe est liée aux modes de rupture. En effet, les éprouvettes qui ont des faciès de rupture semblables, leurs comportements en compression parallèle au fil se manifestent par une courbe (F- δ) de même allure.

En ce qui concerne l'activité acoustique, dans la première et la deuxième phase du chargement, le peuplier reste silencieux et le sapin pectiné ne génère que quelques signaux tandis que le Douglas génère un nombre de signaux plus élevé que les deux autres essences (figure 191a et b). Dans la troisième phase du chargement, le Douglas et le peuplier génèrent un nombre de signaux équivalent mais les signaux sont beaucoup plus énergétiques pour le cas du Douglas (figure 191c). Quant au sapin pectiné, il ne génère qu'un faible nombre de signaux dans la phase III. Au niveau du palier de charge (Phase IV), pendant lequel l'écoulement du matériau se poursuit, l'activité acoustique s'intensifie pour les trois essences (figure 191d). Le Douglas génère le maximum de signaux avec une énergie très importante. Le sapin pectiné et le peuplier génèrent un nombre de signaux quasi-identique avec une énergie quasi-équivalente (figure 191d).

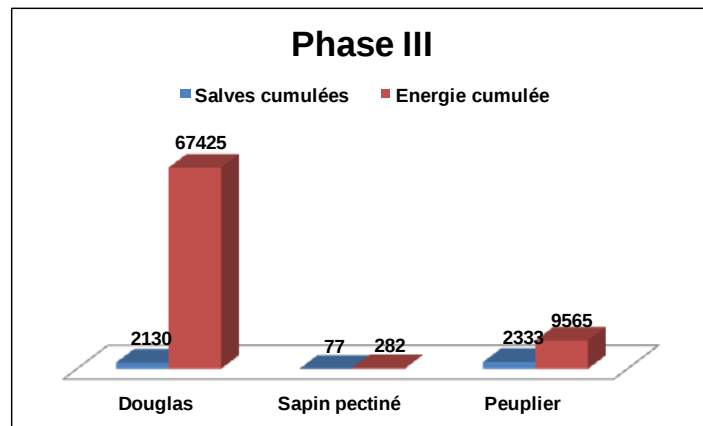
La différence au niveau de la réponse acoustique peut être expliquée par les différences au niveau des modes d'endommagement spécifiques à chaque essence dans les différentes échelles. En effet, selon les travaux de Kucera et Bariska (1982), les modes d'endommagement en compression pour un bois homogène et un bois hétérogène présentent des similarités ainsi que des différences à différentes échelles. Parmi les similarités, quel que soit le type d'essence, des zones de flambement sont observées à différentes échelles. Des microfissures et des macro-fissures peuvent être aussi observées quel que soit l'essence, mais dans des plans différents. Dans notre étude, plusieurs fissures longitudinales sont observées surtout sur la face (LR) pour les éprouvettes de Douglas. L'ouverture de ces fissures est accompagnée de rupture de fibres en tension dans le BI et le BF, donc des salves de très hautes amplitudes à 99dB sont émises. Par contre, ce type de fissures est moins visible pour le sapin pectiné. La rupture des fibres est provoquée plutôt par le glissement provoqué par le cisaillement entre les parties supérieure et inférieure de l'éprouvette au niveau de la bande de cisaillement, ce qui explique l'absence de salves de très hautes amplitudes. Pour le peuplier, des fissures macroscopiques sont aussi observées mais sur la face (LT). L'ouverture de ces fissures est accompagnée par une rupture de fibres qui génère quelques salves de très hautes amplitudes, mais en nombre limité par rapport au Douglas. Kuceara et Bariska (1982) ont également constaté que les différents éléments anatomiques qui constituent le bois résineux et le bois feuillus ne se déforment pas de la même manière sous l'effet d'une compression longitudinale. En effet, le bois initial et les vaisseaux sont pliés et prennent la forme d'un élément télescopique et le bois final flambe (figure 192). Les fibres chez les feuillus peuvent subir les deux types de déformation.



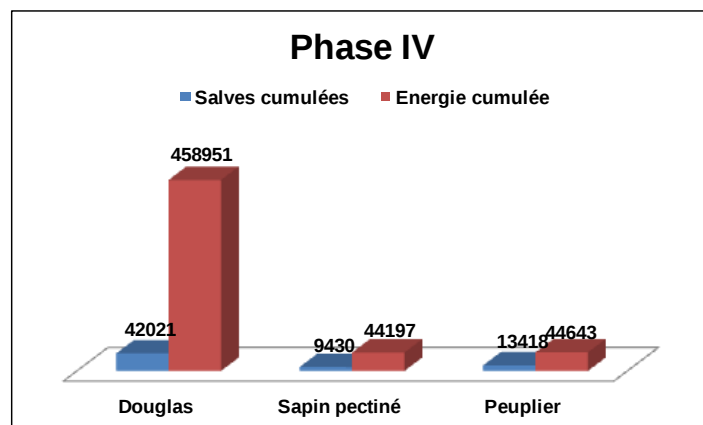
(a)



(b)

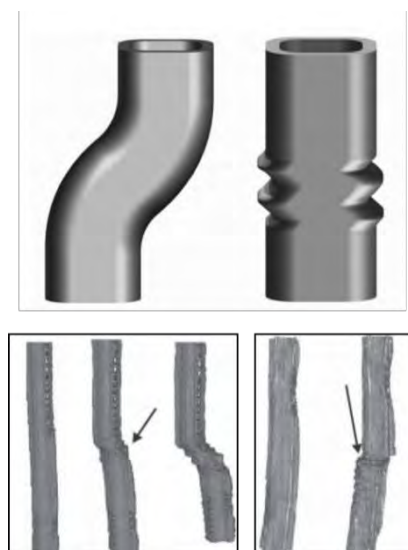


(c)



(d)

Figure 191 : Comparaison entre les réponses acoustiques des trois essences étudiées pendant les quatre phases de chargement (a) phase I, (b) phase II et (c) phase III (d) phase IV



(a)

(b)

Figure 192 : Différentes formes de déformations des éléments du bois en compression (a) flambement du bois final (b) raccourcissement sous forme d'élément télescopique du bois initial (Zauner 2014)

En ce qui concerne la classification, une classe de frottement a été distinguée pour les trois essences (classes bleue). Cette classe représente plus de 60% du nombre de signaux pour les trois essences (Tableau 41). La plupart des caractéristiques des signaux de frottement sont relativement proches quelque soit l'essence (Tableau 41). Mais on remarque quelques divergences sur le Douglas. Ceci pourrait être lié au fait que l'éprouvette de Douglas a subi un écrasement très important au niveau du pied qui peut perturber la propagation des signaux. Etant donné que la déformation est plus importante sur le Douglas, le frottement est également plus important pendant l'essai entre l'éprouvette et les plateaux du montage de compression. Ceci est visible sur l'activité acoustique puisque le nombre de signaux de frottement sur le Douglas est plus important que sur les autres essences (figure 193).

Tableau 41 : Caractéristiques de la classe de frottement pour les trois essences étudiées

Descripteurs	Classe de frottement Douglas	Classe de frottement sapin pectiné	Classe de frottement peuplier
% des signaux	61,4	60,5	70,6
Temps de montée (μ s)	171 (1446)	52 (54)	62 (150)
Durée (μ s)	607 (6151)	287 (139)	323 (317)
Amplitude (dB)	42 (4)	42 (3)	41 (3)
Nombre de coups	14 (73)	13 (6)	11 (7)
Nombre de coups au pic	5 (39)	4 (2)	4 (3)
Energie absolue (aJ)	97 (543)	78 (54)	66 (53)
Fréquence moyenne (kHz)	54 (31)	48 (18)	41 (19)
Fréquence initiale (kHz)	261 (552)	161 (362)	182 (568)
Fréquence de réverbération (kHz)	46 (64)	40 (39)	33 (48)
Pic fréquentiel (kHz)	67 (32)	51 (27)	43 (13)
Barycentre fréquentiel (kHz)	303 (33)	306 (32)	304 (25)

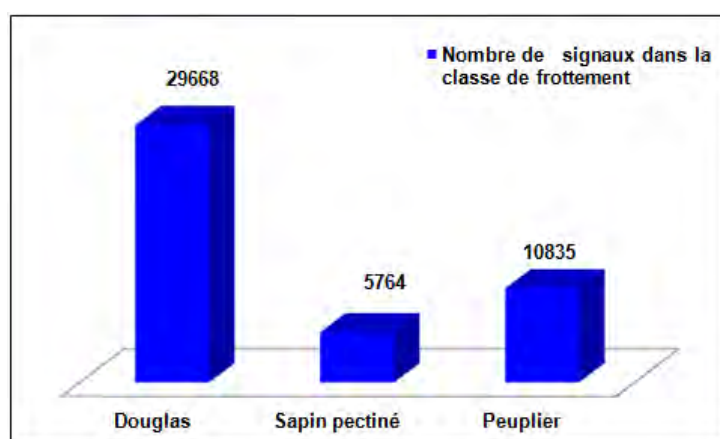


Figure 193 : Nombre de signaux enregistrés dans la classe de frottement pour chaque essence

On a constaté aussi au niveau de la classification des signaux d'EA qu'il est difficile de différencier entre les classes de signaux de microfissurations transversales et longitudinales pour un bois à structure homogène comme le peuplier. En effet, lors de reclassement dans la classe rouge, les critères de validation statistiques varient peu entre un nombre de classe égal à 2 et un nombre de classe égal à 3. De plus, ces deux classes attribuées aux microfissurations

transversales et longitudinales ne se différencient qu'au niveau un seul paramètre qui est le pic fréquentiel pour le cas de peuplier.

VI- Conclusion

Ce quatrième chapitre avait pour objectif d'étudier la réponse acoustique de trois essences de bois sollicitées en compression parallèle au fil. Les résultats ont montré que cette réponse dépend fortement du type d'essence. L'analyse par la méthode de reconnaissance de forme a permis de distinguer quatre classes de signaux pour les trois essences qui possèdent un mode d'endommagement plutôt semblable. Une attribution de ces classes de signaux à des mécanismes d'endommagement a été proposée. Outre une classe liée au frottement entre les plateaux du montage d'essai et les éprouvettes, trois classes sont associées à la fissuration longitudinale, à la fissuration transversale et à la rupture des fibres. La réponse acoustique peut aussi être influencée non seulement par la microstructure de l'essence, mais également par le type de contrainte qui provoque l'endommagement (tension, cisaillement).

Il est important de noter que les conclusions ci-dessus sur le comportement des trois essences en compression dans le sens du fil suivi par EA sont proposées en se basant sur des études limitées. L'exploitation des résultats est loin d'être terminée. Par conséquent, ces conclusions ne sont pas définitives. Elles restent à vérifier par des études complémentaires et plus approfondies.

Le chapitre suivant est donc dédié au suivi des mécanismes d'endommagement d'éprouvettes sous sollicitation de flexion 4-points. Après une analyse des faciès de rupture et des propriétés mécaniques mesurées, nous essaierons d'identifier les différentes caractéristiques de l'activité acoustique enregistrée. Pour ce faire, une analyse statistique multi-variables est mise en place. L'objectif de cette analyse est d'identifier les groupes de signaux. Une corrélation entre ces groupes et les endommagements des éprouvettes est ensuite présentée.

Chapitre 5 : Suivi de l'endommagement du matériau bois sous sollicitation de flexion

I- Introduction

Le bois est utilisé en structure généralement sous forme de poutres. Durant leurs vies en service, les poutres en bois sont souvent sollicitées en flexion. Si le bois se dégrade en fonction du temps ou que la poutre est surchargée, des endommagements peuvent être générés conduisant à la ruine prématurée de la structure. Il est donc intéressant de déceler l'initiation et la propagation de l'endommagement en fonction des contraintes appliquées afin de mettre en place les opérations de maintenance dès l'identification des premiers critères d'alarme. Cependant, le comportement du bois en flexion peut être déduit des mécanismes d'endommagement présents en compression et en traction, et le mode de rupture dépend du ratio entre résistance en traction/compression (Lacroix 2000). En effet, la flexion provoque une distribution de contraintes présentant à la fois un gradient de contraintes de traction et de compression de part et d'autre de la fibre neutre (figure 194). Les étapes d'endommagement du matériau bois sollicité en flexion peuvent être expliquées donc comme suit (Bodig et Jayne 1982, Pluvinage 1992, Brancheriau et Lanvin 2008) : les fibres comprimées les plus chargées sont soutenues par les fibres les moins chargées. En dépassant la limite élastique, les premières fibres à atteindre la limite de rupture sont les fibres comprimées extrêmes. En revanche, cela ne provoque pas forcément la rupture de l'éprouvette car les fibres les moins chargées prennent le relais. Dans cette étape, il apparaît un effet de flambage dans le bois. L'augmentation de la charge amène l'apparition de contraintes de rupture vers l'intérieur de l'éprouvette ce qui engendre le déplacement de la fibre neutre. La rupture ne survient que lorsque les fibres tendues atteignent leur propre contrainte de rupture. Donc, la fin de l'essai de flexion se traduit par un endommagement du matériau en traction (Kolmann et Côté 1968, Pluvinage 1992). La contrainte ultime apparente en flexion $\sigma_{u,f}$ est reliée à la contrainte ultime longitudinale en traction $\sigma'_{u,L}$ selon une relation qui dépend des hypothèses prises sur la distribution des contraintes (Pluvinage 1992). La forme générale de cette relation est donnée par l'équation (15), où C est une constante expérimentale qui dépend de l'essence.

$$\sigma_{u,f} = C \sigma'_{u,L} \quad (15)$$

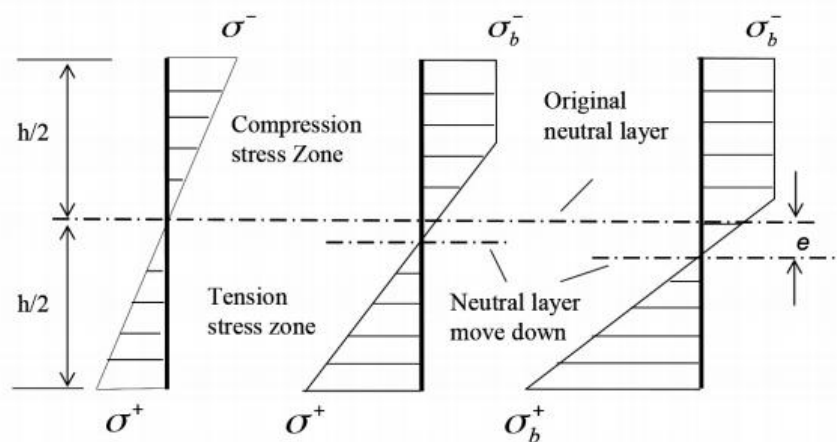


Figure 194 : Distribution des contraintes normales lors d'un essai de flexion (d'après Wu 2014)

A l'échelle macroscopique, d'après Bodig et Jayne, 1982 et Pluvinage 1992, six modes de rupture dans le bois sollicité en flexion peuvent être distingués selon l'apparence des lignes de ruptures finales sur les éprouvettes rompues (figure 195):

Mode a : Rupture par traction simple (*simple tension*) : La rupture commence par la rupture des fibres engendrée par la contrainte de traction dans la partie la plus tendue de la poutre. La ligne de rupture est perpendiculaire à l'axe de la poutre. À un certain niveau dans l'épaisseur, la fissure bifurque dans une direction parallèle à l'axe de la poutre. Ce mode de rupture est souvent observé dans une poutre avec un alignement des fibres horizontal.

Mode b : Rupture en biseau (*cross-grain failure*) : La ligne de rupture s'incline par rapport à l'axe de la poutre. Ce mode de rupture est plutôt observé lorsque l'orientation des fibres dans la partie tendue de la poutre a une forme diagonale, spirale ou autre par rapport à l'axe de la poutre.

Mode c : Rupture par éclatement en traction (*splintering tension*) : La ligne de rupture forme un zigzag dans la section le plus chargée.

Mode d : Rupture fragile en traction (*Brash tension*) : Ce mode de rupture correspond à une rupture typiquement fragile par traction, dont la ligne est perpendiculaire à l'axe de la poutre.

Mode e : Rupture en compression : Ce mode de rupture est beaucoup plus observé dans le bois vert ($H\% > 18\%$). Les contraintes de compression parallèles au fil engendrent le flambement local des fibres sur la face supérieure de l'éprouvette une fois que la limite élastique est atteinte. Des multiples fissures sont couramment observées dans la zone de compression.

Mode f : Rupture par cisaillement longitudinal (*horizontal shear*) : La ligne de rupture est parallèle à l'axe de la poutre. Elle est engendrée par le glissement de la partie supérieure sur la partie inférieure au niveau de l'axe neutre. Ce type de rupture arrive surtout dans une poutre courte, où la hauteur de la section est du même ordre de grandeur que celui de la longueur.

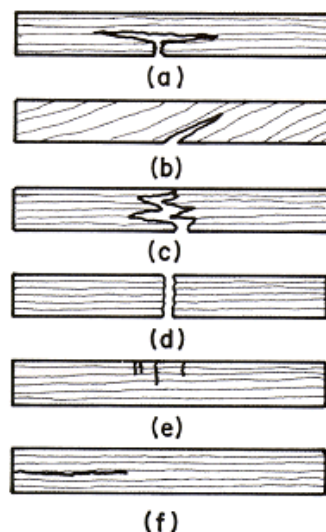


Figure 195 : Modes de rupture dans le bois en flexion (Bodig et Jayne, 1982 et Pluvinage 1992) Mode a: Rupture par traction simple, Mode b: Rupture en biseau, Mode c: Rupture par éclatement en traction, Mode d: Rupture fragile en traction, Mode e : Rupture en compression, Mode f : Rupture par cisaillement longitudinal

A l'échelle micro/mesoscopique, comme vu en traction et en compression, l'ordre chronologique de l'initiation des différents types de microfissures dépend du rapport de résistance R introduit dans le chapitre 3 (équation 14 page 87), ce dernier dépend de la structure anatomique du bois concerné. Il en est de même pour la propagation de la fissure à l'échelle macroscopique. Elle peut se caractériser facilement par l'application de la mécanique de la rupture. Comme indiqué dans le chapitre 3 partie I, la sollicitation par rapport aux fronts d'une fissure se compose en trois modes élémentaires : mode I, mode II et mode III (figure 87a page 88) et la propagation peut se définir par l'un des six types de propagation décrits également dans le chapitre 3 partie I (figure 87b page 88).

Dans ce chapitre on s'intéresse au suivi par EA de l'évolution de l'endommagement au sein de trois essences sollicitées en flexion quatre points. Comme présenté dans le chapitre 2 (partie III.4.2 page 66), la charge est appliquée dans la direction T (normale au plan LR) afin de solliciter le bois initial et le bois final de la même manière. Les essais de flexion sont aussi effectués en mode de déplacement imposé.

La démarche de cette étude est exposée dans les différentes parties de ce chapitre. Elle comprend l'observation du comportement mécanique global de chaque essence testée en flexion et leurs faciès de rupture, l'analyse de l'évolution de l'activité acoustique au cours du chargement, la proposition d'une corrélation entre les classes de signaux identifiées et les mécanismes d'endommagement et finalement la comparaison de la réponse acoustique entre les différentes essences ainsi que la comparaison de la réponse acoustique en flexion avec les réponses acoustiques en traction et en compression.

II- Endommagement du Douglas sous sollicitation de flexion

II.1- Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à l'endommagement du bois de Douglas sous sollicitation de flexion quatre-points. Le comportement et les propriétés mécaniques des cinq éprouvettes testées ainsi que leurs faciès de rupture sont analysés en premier lieu. Ensuite, une éprouvette représentative du lot est sélectionnée pour étudier sa réponse acoustique. Une analyse statistique multi-variables est réalisée afin de dissocier les différentes classes de signaux. A la fin le scénario d'endommagement est alors proposé en couplant les observations réalisées pendant les essais à l'activité acoustique.

II.2- Comportement en flexion et propriétés mécaniques associées

La figure 196 montre les courbes force-déplacement ($F-\delta$) de cinq éprouvettes de Douglas de dimensions identiques sollicitées en flexion quatre-points. La répétitivité au niveau de la rigidité et de la résistance est très bonne si l'on prend 4 éprouvettes sur cinq. En effet, l'éprouvette FD2 présente une rigidité légèrement inférieure par rapport aux autres tandis que la force maximale de l'éprouvette FD5 est nettement plus faible. L'allure des courbes des éprouvettes FD1, FD2 et FD4 montre une rupture en plusieurs étapes ce qui n'est pas le cas pour les éprouvettes FD3 et FD5. En général, l'allure de ces courbes peut être décrite ainsi : une partie linéaire au début de la sollicitation suivie par une partie non-linéaire jusqu'à ce que l'effort atteigne sa valeur maximale. La durée de cette partie est très différente d'une éprouvette à l'autre. Ensuite la charge maximale subit une chute brutale, dont l'amplitude dépend de l'éprouvette testée. Par la suite pour les éprouvettes FD1, FD2 et FD4 la charge augmente de nouveau et atteint un nouveau pic dont la valeur est toujours inférieure à la précédente. Après cela, une nouvelle chute est observée. Ce scénario se répète jusqu'à la

rupture finale de l'éprouvette. Les courbes des éprouvettes FD3 et FD5 n'affichent qu'une seule chute après que la charge atteigne sa valeur maximale.

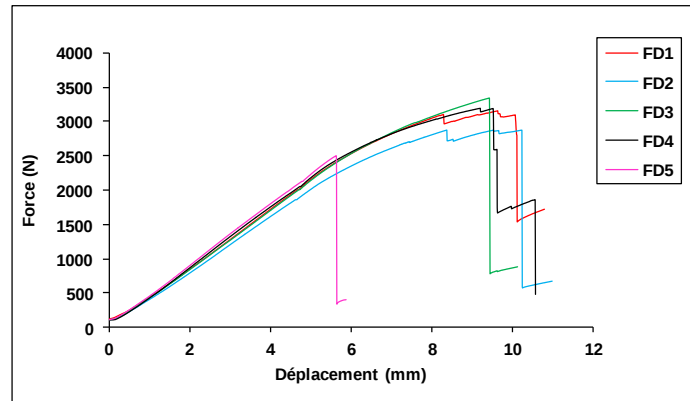


Figure 196 : Courbes force-déplacement (F- δ) des cinq éprouvettes de Douglas sollicitées en flexion 4-points

A partir de ces courbes expérimentales, la contrainte maximale apparente en flexion est mesurée selon l'équation (11) (cf. chapitre 2 partie III.4.2 page 67). Puisque l'éprouvette FD5 présente un pic d'effort inférieur au reste des éprouvettes, cette valeur est donc écartée pour le calcul de la moyenne de la contrainte maximale. En outre, comme il a été évoqué dans le chapitre 2 (partie III.4.2 pages 66-67), le module d'élasticité est mesuré par deux méthodes : la première méthode consiste à utiliser la flèche mesurée par un capteur LVDT selon une formule adaptée de la formule de la norme (Equation 9 page 67), et la deuxième méthode est basée sur les déformations mesurées à l'aide des jauges de déformation installées sur une seule éprouvette de chaque lot (Equation 10 page 67). Toutes les propriétés mécaniques mesurées sont résumées dans le Tableau 42. On constate une faible dispersion au niveau des résultats mesurés (aux alentours de 6%). Cependant le module d'élasticité mesuré via les jauges de déformation est 17% supérieur à celui mesuré par le capteur LVDT. Cette différence peut être expliquée par le fait que la flèche mesurée par le capteur LVDT est une valeur globale, qui est influencée par la dispersion de la qualité et par la dimension des sections de la poutre, tandis que les déformations mesurées par les jauges de déformation sont des valeurs locales par rapport à la section centrale sur laquelle sont collées ces jauges. En comparant avec les valeurs publiées dans la littérature, les résultats obtenus dans cette étude semblent en bonne concordance.

Tableau 42 : Propriétés mécaniques mesurées sur les éprouvettes de Douglas sollicitées en flexion

Eprouvettes	Contraintes maximales en flexion (MPa)	Contrainte maximale en flexion (MPa) (Littérature)	Modules d'élasticité en flexion (LVDT) (GPa)	Module d'élasticité en flexion (jauges) (GPa)	Module d'élasticité en flexion (GPa) (Littérature)
FD1	94,6	70,0-100,0**	11,5	13,7	11,0-16,8***
FD2	86,4		10,9		
FD3	100,5		11,4		
FD4	95,7		12,1		
FD5	74,9*		12,6		
Moyenne	94,3		11,7		
Coefficient de variation	± 6,0 %		± 5,6 %		

* Valeur non considérée pour le calcul de la moyenne

** Gérard et al. (2011) Tropix ; *** Sell et Kropf(1990). Propriétés et caractéristiques des essences de bois

II.3- Observation des faciès de rupture

Afin de comprendre ce qui se passe pendant les essais de flexion, nous avons effectué une observation visuelle sur des éprouvettes rompues. Les faciès de rupture sont présentés par leurs faces latérales (LT) (figures 197a-201a) et leurs faces tendues (LR) (figure 197b-201b). Les faciès de rupture des éprouvettes FD1, FD2, FD3 et FD4 montre un mode de rupture commun. Il s'agit d'un mode de rupture par traction simple (mode a sur la figure 195 page 204). L'éprouvette FD5 montre plutôt le mode de rupture par éclatement en traction (mode c sur la figure 195 page 204) qui a des lignes de rupture en zigzag sur la face (LT).

En outre, les faciès montrent que toutes les ruptures ont eu lieu dans la zone tendue des poutres. En effet, les poutres sont pliées vers le bas sous l'effet du moment fléchissant de telle sorte que les fibres supérieures de la poutre sont sollicitées en compression tandis que les fibres inférieures sont sollicitées en traction. Au début du processus d'endommagement, même si la résistance mesurée pendant les essais de traction dans le sens du fil est beaucoup plus importante que celle mesurée pendant les essais de compression, la rupture des fibres en traction dans la partie tendue est le mécanisme principal d'endommagement. Rappelons que le mécanisme initiateur de micro-flambement est dû à l'existence des rayons. Or, dans cette étude le moment fléchissant dans une section est autour de l'axe R, la couche la plus comprimée est composée de BI et de BF alternés. Il est donc difficile d'avoir juste un rayon proche de cette couche pour que le micro flambement local puisse arriver. Par contre dans la couche la plus tendue de la poutre, même si cette couche est aussi composée de BI et de BF, les fibres dans le bois initial cassent plus facilement que celles dans le bois final.

En visualisant les films réalisés sur les éprouvettes FD1, FD2 et FD4 au cours des essais, on s'aperçoit que lorsque la rupture d'une couche entière de BI d'un cerne de croissance est suivie par une propagation de fissure le long des fibres (figures 197a, 198a, 200a), une chute de charge est observée et un pic de charge est ainsi formé sur les courbes (F-δ) (figure 196). En effet, quand les fibres du BI d'un cerne sont rompues par traction dans la section la plus chargée, la fissure se propage dans le sens vertical en mode I (du type LT) (figure 202a). Lorsqu'elle arrive à un plan de faiblesse, par exemple une interface fibre/rayon, sa propagation bifurque dans cette interface en mode I+II et devient de type TL (figure 202). Ce

processus est accompagné par un arrachage et un pontage des fibres (figure 202a). Certains faciès présentent une languette résultant de la propagation de la fissure (figure 202b).

De plus, le détachement d'une ou plusieurs mèches du bois initial est souvent observé sur les faciès de rupture (figures 197a, 198a, 200a). En effet il témoigne d'une fissuration à l'interface BI/BF, dont sa propagation de type RL est en mode III pur dans la zone tendue et forme un faciès de rupture plutôt lisse (figure 203). Si l'on observe la face la plus tendue de ces éprouvettes, la rupture des fibres se trouve à différents endroits dans la longueur (figures 197b, 198b, 200b). Cependant, les fibres rompues dans la couche la plus tendue chez l'éprouvette FD3 (figure 199b) et chez l'éprouvette FD5 (figure 201b) apparaissent sur la même section ou sur une zone restreinte. Les deux éprouvettes FD3 et FD5 se cassent en une seule fois ce qui explique l'observation d'un seul pic de charge sur leurs courbes force-déplacement (figure 196).

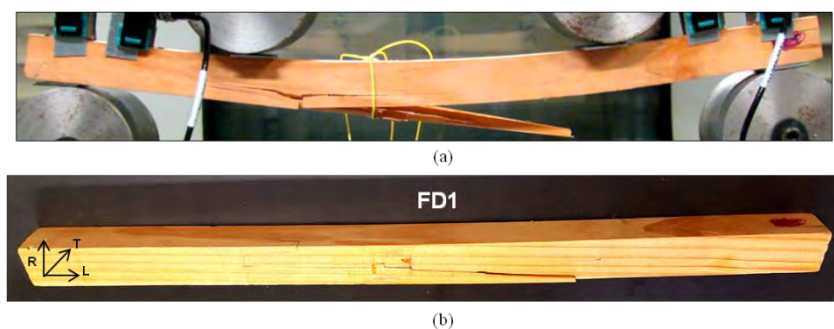


Figure 197 : Faciès de rupture de l'éprouvette FD1 (a) Face latérale LT (b) face LR de la zone tendue

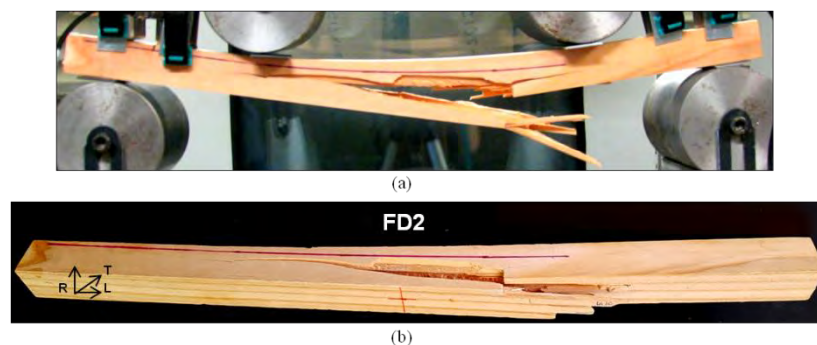


Figure 198 : Faciès de rupture de l'éprouvette FD2 (a) Face latérale LT (b) face LR de la zone tendue

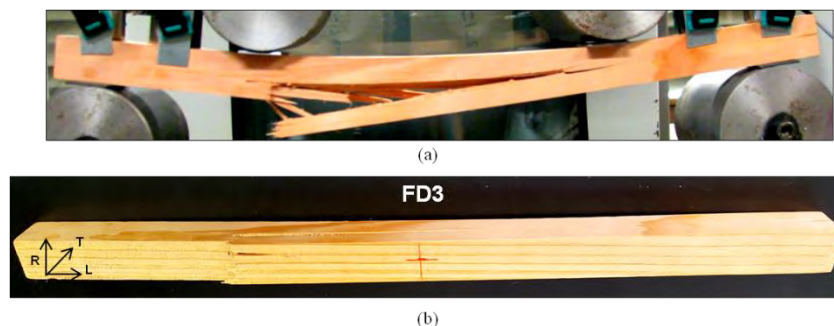


Figure 199 : Faciès de rupture de l'éprouvette FD3 (a) Face latérale LT (b) face LR de la zone tendue

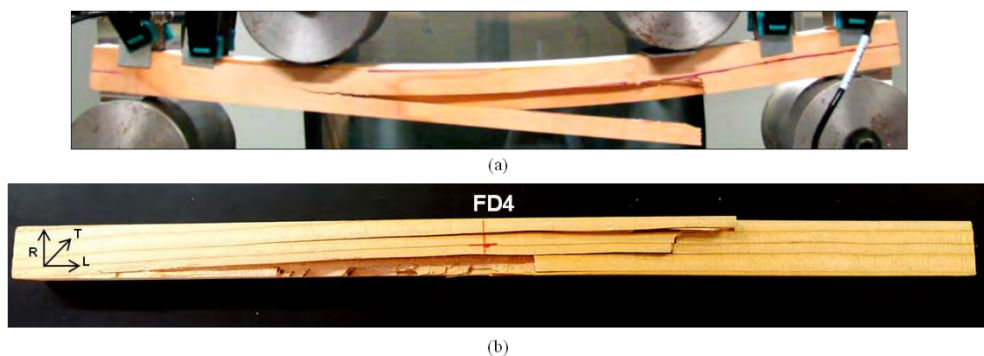


Figure 200 : Faciès de rupture de l'éprouvette FD4 (a) Face latérale LT (b) face LR de la zone tendue

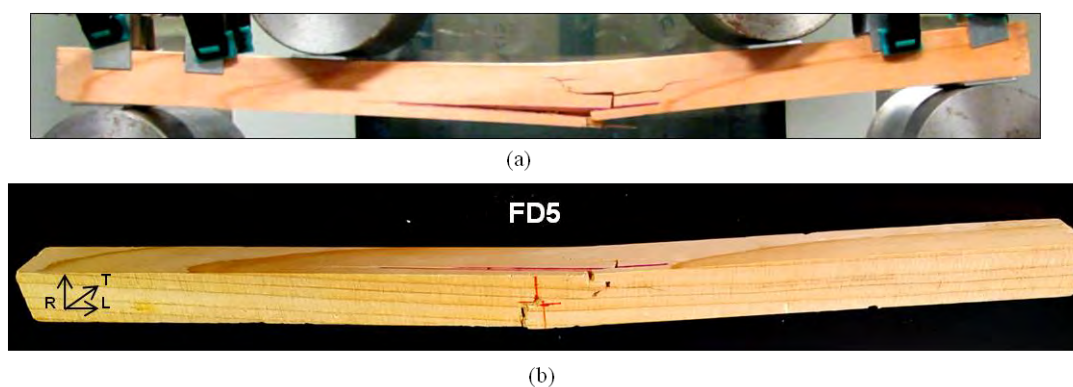


Figure 201 : Faciès de rupture de l'éprouvette FD5 (a) Face latérale LT (b) face LR de la zone tendue

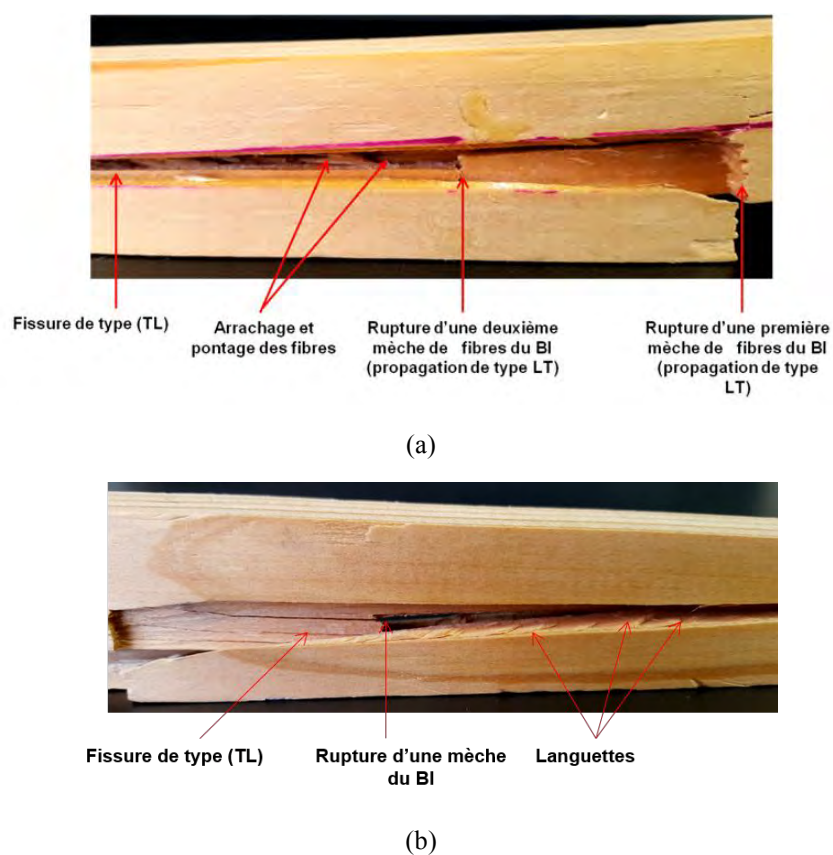


Figure 202 : Rupture des mèches du BI de type (LT) accompagnée d'une fissure de type (TL) (a) observation du phénomène d'arrachage et de pontage des fibres (b) observation des languettes

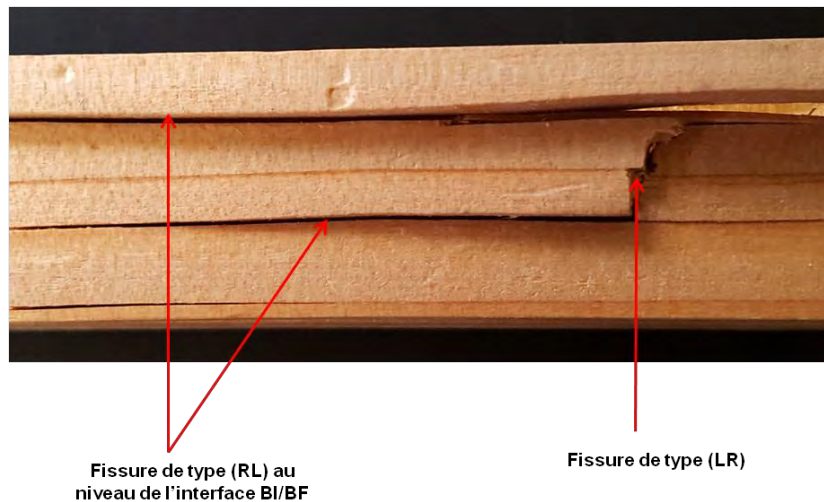


Figure 203 : Propagation de fissure de type (RL) au niveau de l'interface BI/BF et de type (LR)

II.4- Analyse de l'activité acoustique

Afin de définir les différentes phases d'évolution de l'endommagement en terme d'émission acoustique, une analyse temporelle de l'activité acoustique a été réalisée sur l'éprouvette FD4, qui présente un comportement représentatif des éprouvettes en Douglas soumise à une sollicitation de flexion.

La courbe de l'évolution de la force en fonction du temps couplée à l'évolution de l'activité acoustique est montrée sur la figure 204. L'activité acoustique est représentée par le nombre de salves cumulées (figure 204a), l'amplitude (figure 204b) et l'énergie cumulée (figure 204c). Trois phases peuvent être identifiées (figure 204)

Phase I : Phase linéaire

Cette phase correspond à la partie quasi-linéaire de la courbe ($F-\delta$). Elle est caractérisée par la détection de quelques signaux acoustiques à un taux de charge inférieur à 50% de la charge maximale (figure 204a). L'amplitude de ces signaux ne dépasse pas 55 dB (figure 204b), de plus l'énergie cumulée reste très faible durant cette phase (figure 204c).

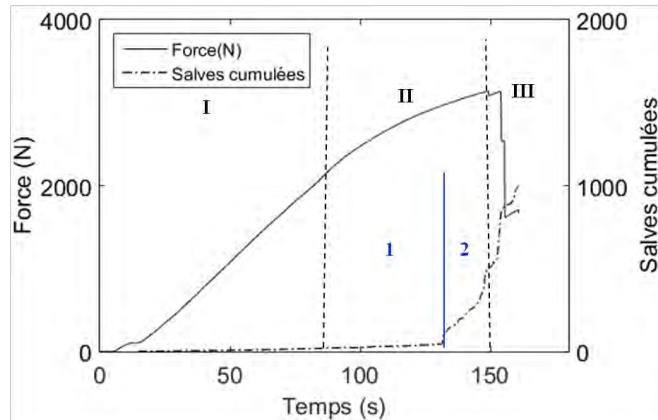
Phase II : Phase d'endommagement

Cette phase débute lorsque la courbe ($F-\delta$) commence à devenir non linéaire, et termine au point où la charge devient maximale. En terme de réponse acoustique, cette phase peut être divisée en deux parties : partie 1 où l'activité acoustique subit une faible augmentation (figure 204a) et l'amplitude ne dépasse pas 65 dB (figure 204a). L'énergie cumulée dans cette partie II-1 reste faible (figure 204c). La partie 2 débute à $t = 131,5$ s et elle est caractérisée par une augmentation du nombre de salves cumulées de façon linéaire (figure 204a) ainsi que par l'enregistrement de signaux de haute amplitude (99dB) (figure 204b). Le début de la phase II-2 est marqué aussi par un pic au niveau de l'énergie cumulée qui continue ensuite à évoluer d'une manière constante jusqu'au début de la phase suivante (figure 204c).

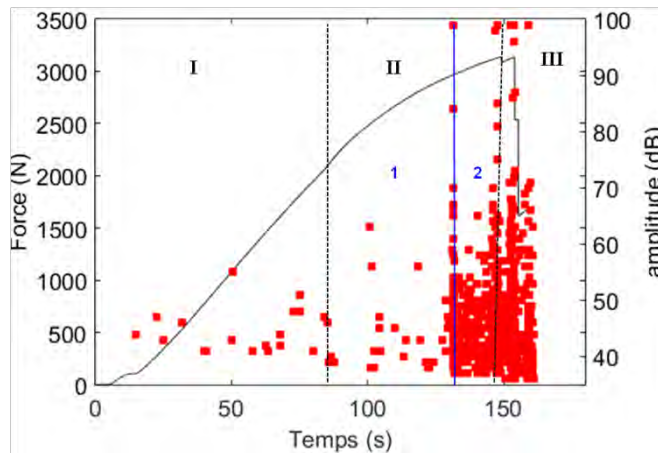
Phase III : Phase de rupture

Cette phase couvre la partie de la charge maximale jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette. Au niveau de la réponse acoustique dans cette phase, le nombre de salves cumulées continue à augmenter d'une façon linéaire (figure 204a) alors que l'énergie cumulée augmente par palier (figure 204c). La multiplicité des sources d'émission acoustique dans cette phase apparaît clairement sur la figure 204b, où l'on observe un spectre d'amplitude très large, allant de 35 dB à 99 dB.

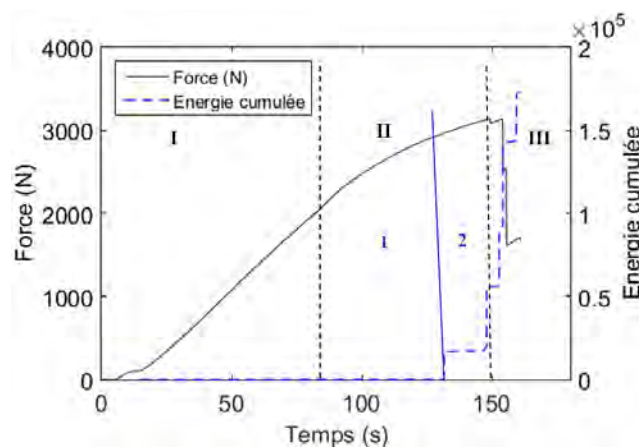
Il est intéressant de noter que l'allure de l'évolution de l'activité acoustique des éprouvettes en Douglas durant un essai de flexion est quasiment identique à celle observée durant l'essai de traction longitudinale (cf. chapitre 3 partie II.4 pages 93-94). Les types d'endommagement observés sur les faciès de rupture des éprouvettes de Douglas en traction se retrouvent tous plus ou moins sur les faciès des éprouvettes sollicitées en flexion 4-points.



(a)



(b)



(c)

Figure 204 : Evolution de la charge en fonction du temps enregistrée sur l'éprouvette FD4 en Douglas soumise à une sollicitation flexion couplée avec l'activité acoustique en terme (a) de salves cumulées, (b) d'amplitudes (c) d'énergie cumulée

II.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique

Pendant la phase I, l'observation réalisée sur le film enregistré au cours de l'essai ne montre aucun endommagement visible. Cependant, une faible activité acoustique est enregistrée pendant cette phase. On en peut déduire que certaines microfissures commencent à naître dans cette phase.

Pour la partie 1 de la phase II, si l'on fait référence à ce que l'on a vu en traction, les signaux enregistrés dans cette partie peuvent correspondre au développement des microfissures aux niveaux des zones de faiblesse telles que les interfaces BI/BF ou/et trachéides/rayons ligneux ou encore au niveau des poches de résines qui sont fréquentes sur les surfaces des éprouvettes de Douglas. Lorsque la partie II.2 débute à $t=131,5s$ et jusqu'à la fin de l'essai on constate une accumulation de salves à 99 dB. On en compte 5 qui peuvent être identifiées temporellement (figure 205) (Tableau 43). En se basant sur le film enregistré pendant l'essai sur une face (LT), ces salves de hautes amplitudes peuvent être corrélées avec des phénomènes spécifiques observés ou entendus. Le tableau 43 résume ces constatations. En effet, la première salve de 99dB correspond à un bruit audible entendu pendant l'essai. La face de l'éprouvette filmée à cet instant n'affiche aucun endommagement particulier et la courbe d'évolution de la charge n'affiche aucun point particulier. La deuxième salve de 99 dB est accompagnée aussi par un bruit audible et la face filmée n'affiche pas d'endommagement visible. Par contre sur la courbe (F- δ), on constate que ce signal est accompagné par une faible chute de charge qui forme un pic (figure 205). De plus, l'intensité du bruit entendu durant l'enregistrement de la salve de 99 dB numéro 1 est plus faible que celle entendue pendant l'enregistrement de la salve numéro 2. Donc, cette dernière pourrait être générée par une rupture de fibres dans le BI sur les autres faces de l'éprouvette autres que la face filmée. Les salves 3 et 5 correspondent à deux ruptures macroscopiques successives. Elles sont extrêmement proches l'une de l'autre puisque la durée entre les deux événements est faible (aux alentours de 1s). Le premier endommagement macroscopique montre une rupture au niveau d'une mèche du BI suivi par une propagation de fissure de type (TL) sous mode I+II et une autre de type (RL) dans la face tendue au niveau de l'interface BI/BF sous mode III (figure 206a). La deuxième rupture est similaire à la première. Elle se déclenche au niveau d'une mèche de BI du cerne suivant (figure 206b). Ce processus s'accompagne d'une chute importante de charge de façon brutale (figure 205). La dernière salve de 99 dB correspond à un bruit audible entendu à la fin de l'essai qui peut être une continuité des ruptures des fibres puisqu'un pic de charge est observé également à cet instant (figure 205).

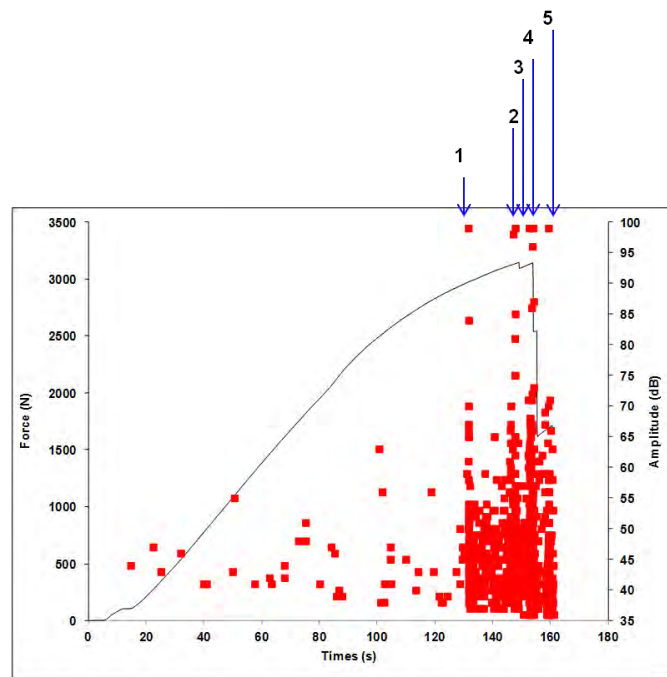


Figure 205 : Identification des salves de 99 dB enregistrées pendant l'essai de l'éprouvette FD4

Tableau 43 : Observations réalisées sur l'éprouvette FP4 lors de l'enregistrement des salves de hautes amplitudes (99dB)

Numéro de la salve	Temps (s)	Observation/écoute
1	131,5	Bruit audible
2	147,8	Bruit audible
3	152,6	Première rupture (figure 206 a)
4	154	Deuxième rupture (figure 206b)
5	159,2	Bruit audible



(a)



(b)

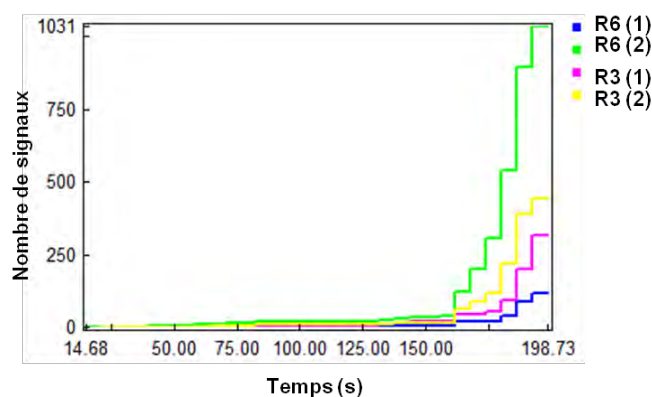
Figure 206 : (a) rupture macroscopique 1 (b) rupture macroscopique 2

II.6- Classement des données acoustiques

Les signaux recueillis par le capteur R6(2) (figure 207a) font l'objet de cette analyse puisqu'il s'agit du capteur qui enregistre le plus de signaux (figure 207b).



(a)



(b)

Figure 207 : (a) Positions des capteurs (2) Nombre de signaux enregistrés par chaque capteur

A- Optimisation du nombre de classes

L'évolution des critères de validation statistique en fonction du nombre de classes montre que le coefficient de Davies et Bouldin est minimisé pour un nombre de classes égal à 3 et le critère Tou est maximisé pour le même nombre de classes (figure 208). Donc, les signaux recueillis pendant l'essai de flexion de l'éprouvette FD4 vont être divisés en trois classes de signaux par la méthode des k-moyennes.

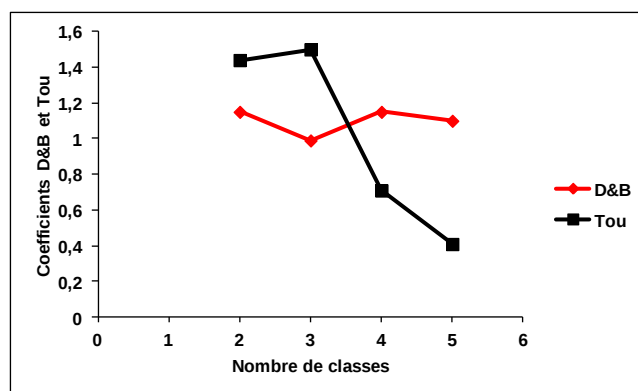


Figure 208 : Coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes (éprouvette FD4)

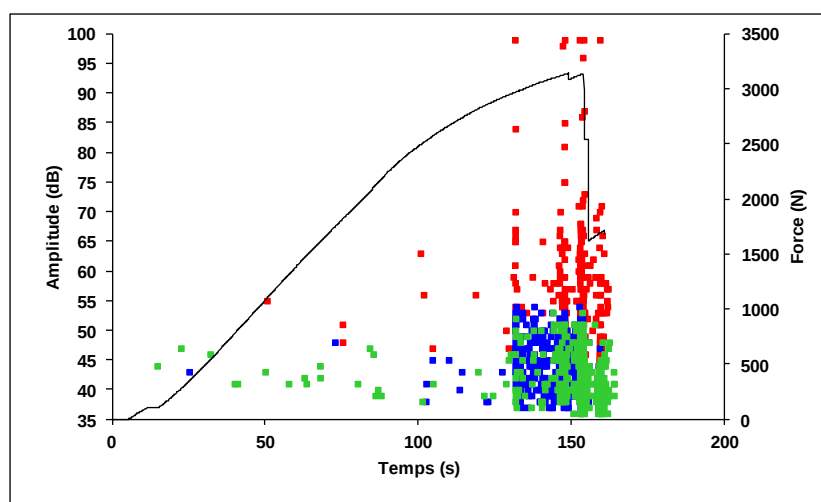
B- Résultats de classification des signaux par la méthode des k-moyennes

Les résultats de la classification des signaux acoustiques par la méthode des k-moyennes sont présentés au regard de l'amplitude des salves (figure 209). La valeur moyenne de chacun de descripteurs discriminants ainsi que l'écart type des trois groupes dissociés sont résumés dans le tableau 44.

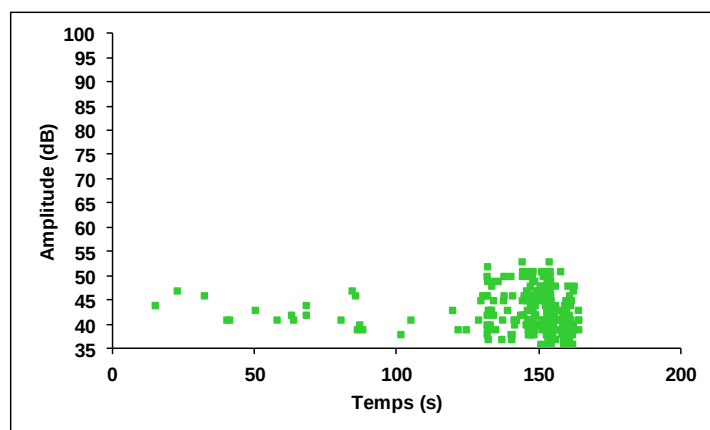
La classe verte contient 44,3% des signaux. La forme d'onde des signaux appartenant à cette classe est caractérisée par une faible durée, un temps de montée moyen, une faible énergie absolue, un faible nombre de coups et une faible amplitude (figure 210a) (Tableau 44). La fréquence d'apparition de cette classe devient plus importante à partir de $t=148,7$ s, le moment où un pic de charge est enregistré. De plus, la classe verte est bien visible aux moments des deux ruptures macroscopiques (figure 209a).

La classe bleue contient 34,8% des signaux. La forme d'onde des signaux appartenant à cette classe est caractérisée par un temps de montée très court, une faible durée, un faible nombre de coups, une faible amplitude ainsi qu'une faible énergie (figure 210b) (tableau 44). La classe bleue se différencie de la classe verte principalement au niveau des paramètres fréquentiels (figure 211) (Tableau 44). La classe bleue contient des fréquences plus hautes que la classe verte. L'apparition importante de la classe bleue accompagne l'enregistrement des deux premières salves de haute amplitude (99dB) à $t= 131,5$ s et $147,8$ s (figure 209a).

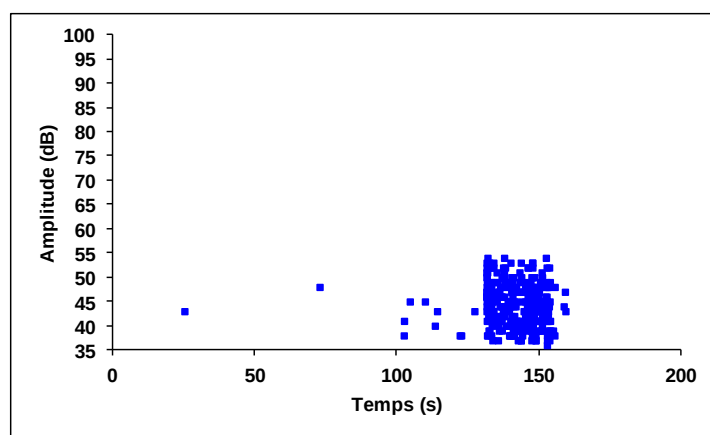
En ce qui concerne la classe rouge, elle contient 20,9% des signaux. La signature acoustique des signaux de cette classe est caractérisée par une forme d'onde de très longue durée, un temps de montée important, une amplitude plus élevée que les deux autres classes, un nombre de coups important et une énergie absolue très importante (figure 210c) (Tableau 44). Cette classe commence à apparaître d'une manière importante à l'instant où des bruits audibles commencent à être émis à partir de $t=131,5$ s (figure 209a et d).



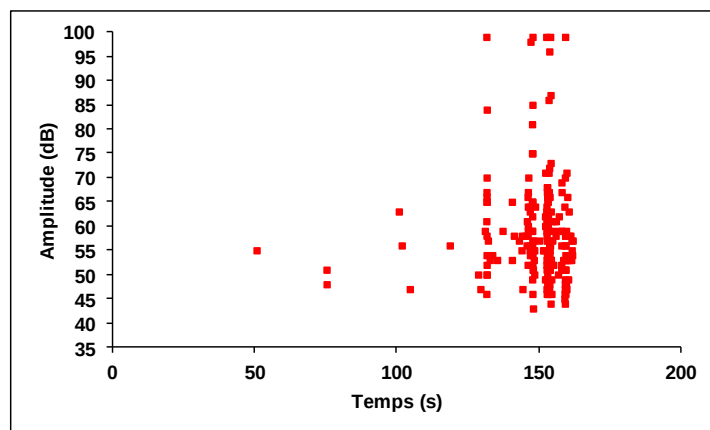
(a)



(b)



(c)

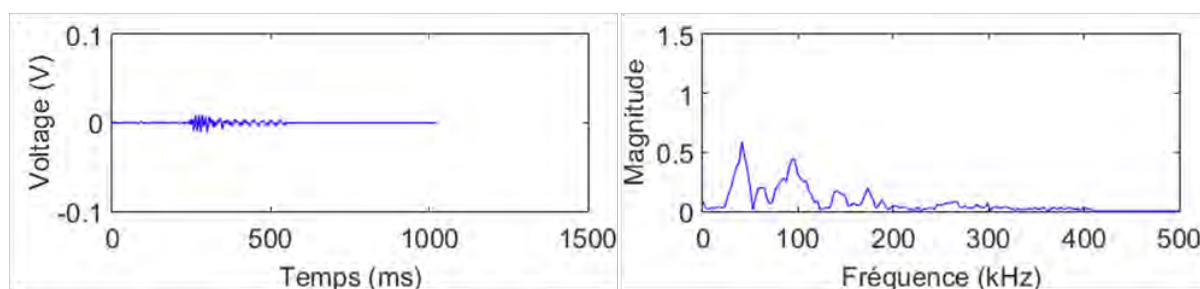


(d)

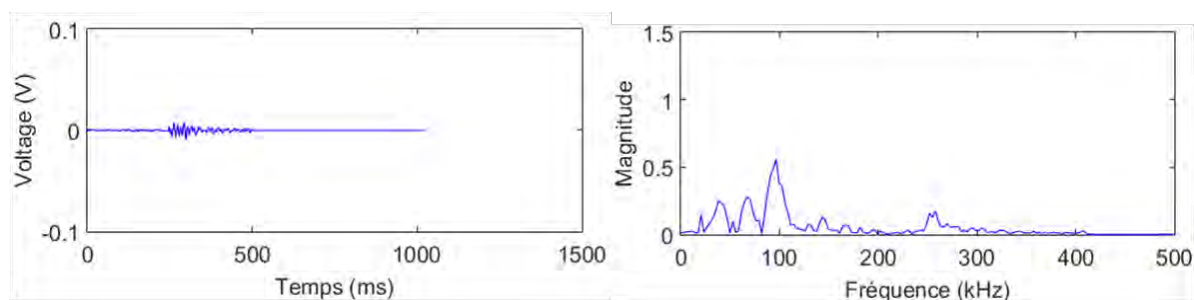
Figure 209 : Résultats de la classification des signaux recueillis sur l'éprouvettes FD4 (a) répartition temporelle des différentes classes de signaux (b) classe verte, (c) classe bleue (d) classe rouge

Tableau 44 : Valeurs moyennes et écarts types dans les parenthèses des descripteurs acoustiques de chaque classe de signaux recueillis sur l'éprouvette FD4

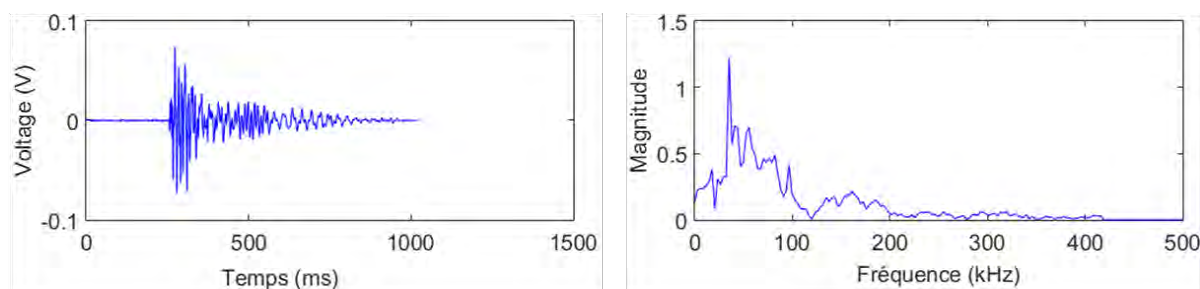
Descripteurs	Classe verte	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	44,3	34,8	20,9
Temps de montée (µs)	72 (59)	33 (41)	232 (391)
Durée (µs)	348 (240)	203 (143)	3289 (12435)
Amplitude (dB)	42 (4)	44 (4)	58 (10)
Nombre de coups	13 (8)	12 (8)	164 (690)
Nombre de coups au pic	4 (3)	4 (2)	14 (19)
Energie absolue (aJ)	94 (99)	107 (109)	$1,8 \cdot 10^7$ ($1,3 \cdot 10^8$)
Fréquence moyenne (kHz)	42 (14)	68 (22)	45 (10)
Fréquence initiale (kHz)	143 (308)	229 (314)	112 (78)
Fréquence de réverbération (kHz)	35 (47)	57 (77)	40 (10)
Pic fréquentiel (kHz)	35 (1)	98 (10)	45 (23)
Barycentre fréquentiel (kHz)	296 (38)	313 (47)	164 (36)



(a)



(b)



(c)

Figure 210 : Forme des signaux types d'EA et Transformées de Fourier associées des différentes classes de signaux recueillis sur l'éprouvette FD4 (a) classe verte, (b) classe bleue (c) classe rouge

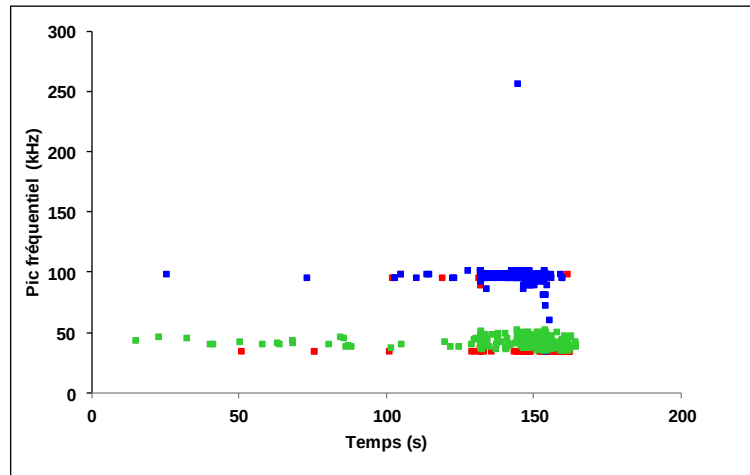


Figure 211 : Résultats de la classification en termes de pic fréquentiel des signaux recueillis sur l'éprouvette FD4

C- Labellisation des classes

Nous nous sommes basés principalement sur une corrélation avec les images filmées pour suggérer une labellisation des trois classes de signaux identifiées lors de l'endommagement d'une éprouvette de Douglas sollicitée en flexion quatre points.

Lorsque des endommagements critiques commencent à se développer à partir de $t=131,5$ (moment d'enregistrement du premier signal de haute amplitude 99 dB), la classe bleue commence à apparaître d'une façon très importante tandis que la classe verte est moins visible. Visuellement, sur le film, on ne voit rien sur la face filmée de l'éprouvette tandis qu'on entend un bruit audible.

Aux moments des deux ruptures macroscopiques, à $t=152,6$ s et $t=154$ s, l'activité acoustique de la classe verte devient importante (figure 209a-b). A ces instants, on observe une rupture de fibres (propagation de type LT) accompagnée par une fissure importante de type (TL) sur la face latérale et une fissure de type (RL) au niveau de l'interface BI/BF dans la partie tendue de l'éprouvette (figures 202, 203 et 206). La classe verte s'intensifie aux moments de ces deux ruptures macroscopiques. En outre, la classe verte démarre très tôt dans l'essai et contient des signaux de faible énergie. Elle pourrait donc être attribuée à la microfissuration de type (RL) au niveau de l'interface BI/BF dans la zone tendue de l'éprouvette sachant que la surface de cette fissuration est lisse (figure 203) donc elle libère moins d'énergie. La classe bleue pourrait être attribuée à la microfissuration de type (TL) dont l'amorce due à la concentration de contrainte à $t=131$ s au bout de la poche de résine observée sur la face (LT) de l'éprouvette (figure 206). En outre, la surface de fissuration de type (TL) présente un pontage de fibres (figure 202), donc ce type de fissuration pourrait être plus énergétique que la fissuration de type LR au niveau de l'interface BI/BF qui présente une surface de fissuration lisse. Les signaux de la classe rouge appartiennent à une gamme d'amplitude très importante. Donc, cette classe peut contenir toutes les microfissurations transversales de type (LR) et (LT) qui conduisent à la rupture de fibres avec l'augmentation de la charge.

II.7- Conclusion

Dans cette partie, l'étude du comportement en flexion quatre-points des éprouvettes en Douglas est réalisée. Les faciès de rupture des différentes éprouvettes ainsi que l'évolution de l'activité acoustique en fonction du temps de l'essai sont analysés.

Trois classes des signaux sont identifiées. La labellisation des classes est basée principalement sur des observations visuelles de l'éprouvette post-mortem et des images extraites de la vidéo à des instants donnés. Les trois classes des signaux acoustiques peuvent être reliées aux mécanismes suivants :

- Classe verte : les signaux acoustiques de la classe verte pourraient être attribués à la microfissuration de type (RL) au niveau de l'interface BI/BF dans la partie tendue de l'éprouvette.
- Classe bleue : Les signaux de la classe bleue pourraient être attribués à la microfissuration de type (TL) sur la face latérale de l'éprouvette.
- Classe rouge: Les signaux de la classe rouge pourraient être attribués aux microfissurations transversales de type (LT) et (LR) liées à la rupture des fibres.

En ce qui concerne le scénario d'endommagement, l'activité acoustique du Douglas sollicité en flexion comporte trois phases :

Phase I : Phase linéaire

Cette phase représente le comportement linéaire de l'éprouvette. Dans cette phase on va retrouver principalement des microfissures aux interfaces BI/BF dans la partie tendue de l'éprouvette.

Phase II : Phase d'endommagement

Cette phase traduit un comportement non-linéaire avant le premier pic de charge. Cette phase se divise en deux parties compte tenu de la vitesse d'augmentation des salves cumulées. Au début, dans la phase II-1, on constate l'enregistrement de signaux majoritairement de la classe bleue. Ceci peut être expliqué par l'initiation des microfissurations de type (TL). Les microfissurations de type (RL) au niveau de l'interface BI/BF continuent aussi à naître et à croître dans cette phase. Ceci est expliqué par les signaux de la classe verte enregistrés dans cette phase. Les signaux de la classe rouge observés dans cette phase peuvent traduire l'amorce des microfissurations transversales de type (LT) et (LR).

La phase II-2 correspond donc à la coalescence et à la propagation des ces microfissures transversales accompagnées de la rupture des fibres surtout dans le BI, où le rapport de résistance R est plus élevé que celui dans le BF. En même temps, les microfissures longitudinales de type (RL) et (TL) se développent également aux interfaces BI/BF et fibre/rayon.

Phase III : Phase de rupture

Cette phase commence par une chute de charge. Ce qui traduit la première rupture d'une bande de fibres du BI d'un cerne de croissance qui s'accompagne par une propagation macroscopique des fissures de type (TL) en mode I+II et d'une propagation macroscopique de fissure de type (RL) au niveau de l'interface BI/BF en mode III. La rupture finale peut se produire après plusieurs pics de charge si les fibres de bois initial se rompent cerne par cerne.

III- Endommagement du sapin pectiné sous sollicitation de flexion

III.1- Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à l'endommagement du bois de sapin pectiné sous sollicitation de flexion quatre-points. La démarche suivie pour étudier le bois de Douglas sera utilisée pour l'étude du sapin pectiné.

III.2- Comportement en flexion et propriétés mécaniques associées

La figure 212 représente les courbes force-déplacement (F- δ) de cinq éprouvettes de sapin pectiné de dimensions identiques sollicitées en flexion quatre-points. On constate une dispersion au niveau de la rigidité et de la contrainte maximale en flexion. La courbe de l'éprouvette FS4 présente une contrainte maximale très élevée par rapport aux autres éprouvettes. Donc, cette valeur sera exclue du calcul de la moyenne. Les quatre autres éprouvettes ont une résistance maximale proche. Au niveau de la rigidité, les courbes des éprouvettes FS4 et FS5 montrent une rigidité supérieure à celle du reste des éprouvettes.

L'allure de ces courbes sont relativement proches les une des autres. En général, une partie linéaire au début de la sollicitation est observée ; elle est suivie par une partie non-linéaire jusqu'à ce que l'effort atteigne sa valeur maximale. La durée de cette partie est très différente d'une éprouvette à l'autre. Ensuite la charge maximale subit une chute brutale qui indique la rupture finale des éprouvettes.

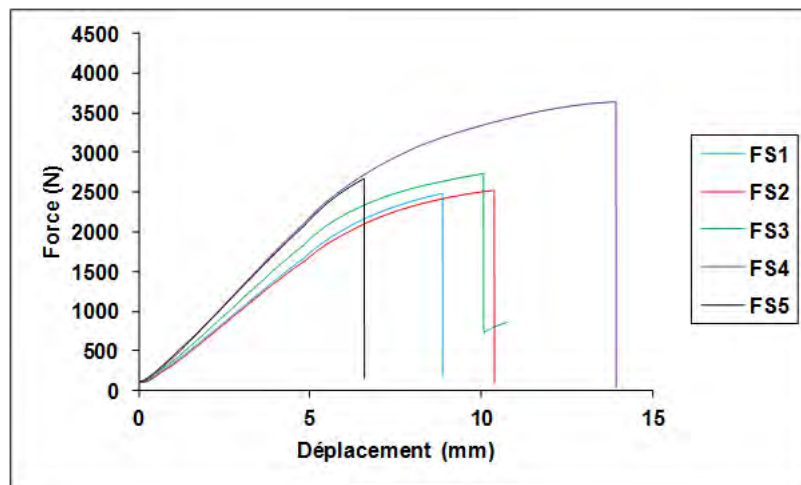


Figure 212 : Courbes force-déplacement des cinq éprouvettes de sapin pectiné sollicitées en flexion 4-points

A partir de ces courbes expérimentales, la contrainte maximale en flexion est mesurée selon l'équation (11) (cf. chapitre 2 partie III.4.2 page 67) et le module d'élasticité est mesurée selon les deux méthodes évoquées auparavant et selon les équations (10) et (11) (cf. chapitre 2 partie III.4.2 page 67). Toutes les propriétés mécaniques mesurées sont résumées dans le Tableau 45. On constate une faible dispersion (inférieur à 5%) au niveau de la contrainte maximale en flexion en écartant la valeur de FS4. En ce qui concerne le module d'élasticité en flexion obtenu à l'aide de la flèche mesurée par le LVDT, la dispersion est autour de 10%. En outre, une faible différence est constatée entre le module mesuré par la méthode de LVDT et celui par les jauges de déformation. En comparant avec la littérature, les contraintes maximales en flexion mesurées dans cette étude semblent un peu élevées tandis que le module d'élasticité mesuré est en bonne concordance.

Tableau 45 : Propriétés mécaniques mesurées sur le lot d'éprouvettes de sapin pectiné sollicitées en flexion

Eprouvettes	Contraintes maximales en flexion (MPa)	Contrainte maximale en flexion (littérature) (MPa)	Modules d'élasticité en flexion (LVDT) (GPa)	Module d'élasticité en flexion (jauges) (GPa)	Module d'élasticité en flexion (littérature) (GPa)
FS1	74,6	62,0-74,0**	9,6	10,6	10,0-14,5*
FS2	76,0		9,5		
FS3	82,1		10,8		
FS4	109,4*		11,9		
FS5	79,8		11,7		
Moyenne	78,1		9,7		
Coefficient de variation	± 4,4%		± 10%		

* Valeur éliminée du calcul de la moyenne

** Sell et Kropf (1990). Propriétés et caractéristiques des essences de bois

III.3- Observation des faciès de rupture

Il faut noter que les fibres des éprouvettes de sapin pectiné ne sont pas tout à fait alignées aux bords de l'éprouvette et les cernes ne sont pas non plus tout à fait parallèles entre eux (figure 213). Pour cette raison, on voit les deux types de bois BI et BF sur la face LT dont l'orientation du fil est plus ou moins inclinée par rapport à l'axe de la poutre.



Figure 213 : Cernes des éprouvettes de sapin pectiné non-parallèle

Les faciès de rupture des éprouvettes de sapin pectiné sollicitées en flexion sont présentés sur les figures 214-218. Les figures 214a-218a présentent les photos d'une face (LT) des éprouvettes alors que les figures 214b-218b représentent les photos de la face (LR) tendue des éprouvettes.

Pour les trois premières éprouvettes (FS1, FS2, et FS3) (figures 214-216), on peut constater que la fissure s'amorce souvent dans la partie la plus tendue par la rupture des fibres. Elle couvre soit une grande partie (figure 214b) soit la totalité (figures 215b-216b) de la largeur. Ici, la propagation des microfissures à l'interface BI/BF est peu observée. En effet, la ligne de rupture sur la face (LR) est plutôt perpendiculaire au fil. Ceci s'explique par la rigidité plus homogène entre le BI et le BF chez le sapin pectiné. Cette fissure située dans le plan (LR) se propage d'abord dans la direction T en mode I, puis elle bifurque pour longer le fil du bois incliné en mode I+II. A la fin, elle peut finir ou bien par la rupture des fibres sous l'appui supérieur (figures 214a, 215a) ou bien par une propagation jusqu'au bord de

l'éprouvette (figures 216a). La ligne de fissure montre un mode de rupture plus proche du mode de rupture en traction simple (mode a dans la figure 195 page 204), combiné plus ou moins avec le mode en biseau (mode b dans la figure 195 page 204) à cause de l'orientation du fil incliné dans la face (LT).

En ce qui concerne l'éprouvette FS4, ses faciès de rupture ont montré le même processus que les éprouvettes FS1, FS2 et FS3, sauf que la ligne de rupture sur la face la plus tendue est inclinée par rapport au fil et est donc plus longue (figure 217b). De plus la rupture finale est survenue non seulement par la rupture des fibres sous l'appui supérieur, mais la fissure a également débouché sur le bord de l'éprouvette. La surface rompue étant visiblement plus importante, ceci se traduit par une résistance apparente en flexion beaucoup plus élevée que celles du reste du lot.

Concernant l'éprouvette FS5 (figure 218), la ligne de rupture montre un mode de rupture par traction simple (mode a dans la figure 195 page 204). La fissure initiée par la rupture des fibres dans la partie la plus tendue située au plan (LR) se propage d'abord dans la direction T en mode I (fissure de type LT) (figure 218a), puis elle bifurque pour longer le fil du bois incliné en mode I+II (fissure de type TL). La propagation de type LT dans la première étape traverse quasiment la moitié de la hauteur de l'éprouvette (figure 218a) tandis que celle de type TL dans la deuxième étape crée moins de surface fissurée (figure 218a). L'importance de la propagation de la fissure du type LT rend le comportement de l'éprouvette plus fragile, ceci se traduit par un déplacement à la rupture final beaucoup plus faible que pour les autres éprouvettes en sapin pectiné.

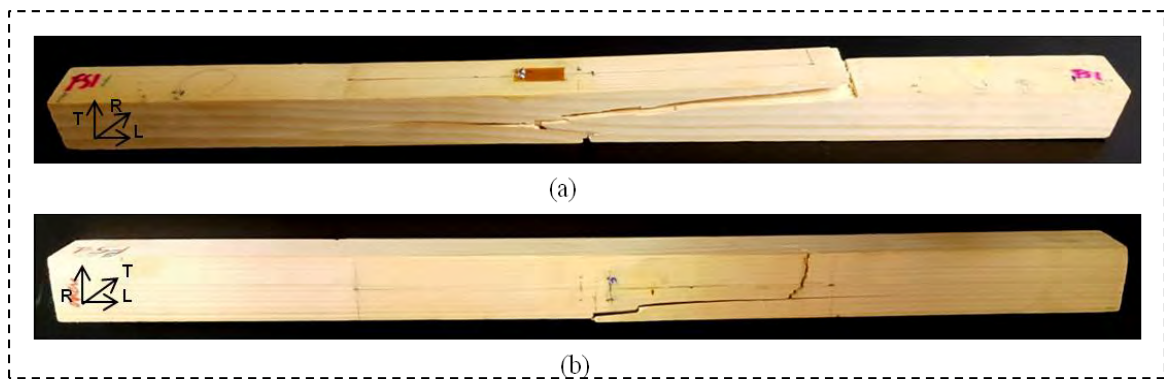


Figure 214 : Faciès de rupture de l'éprouvette FS1 (a) face avant LT (b) face tendue LR

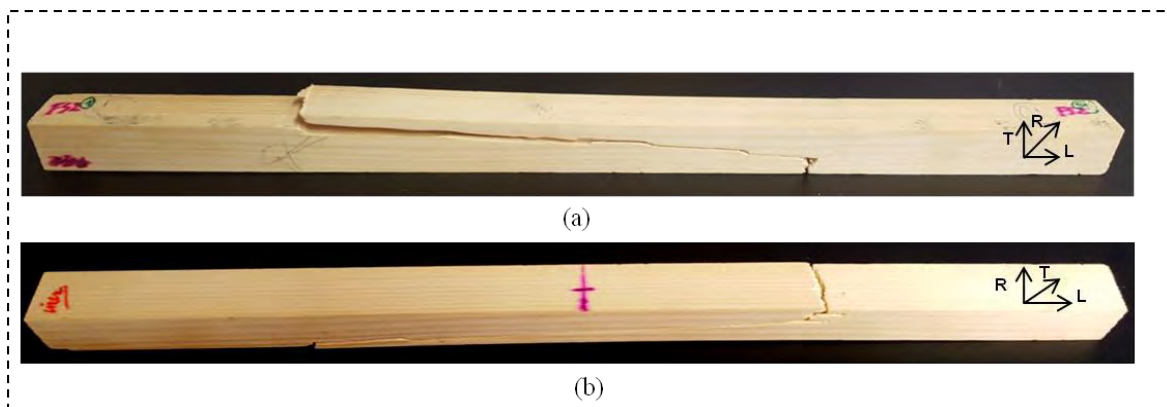


Figure 215 : Faciès de rupture de l'éprouvette FS2 (a) face avant LT (b) face tendue LR

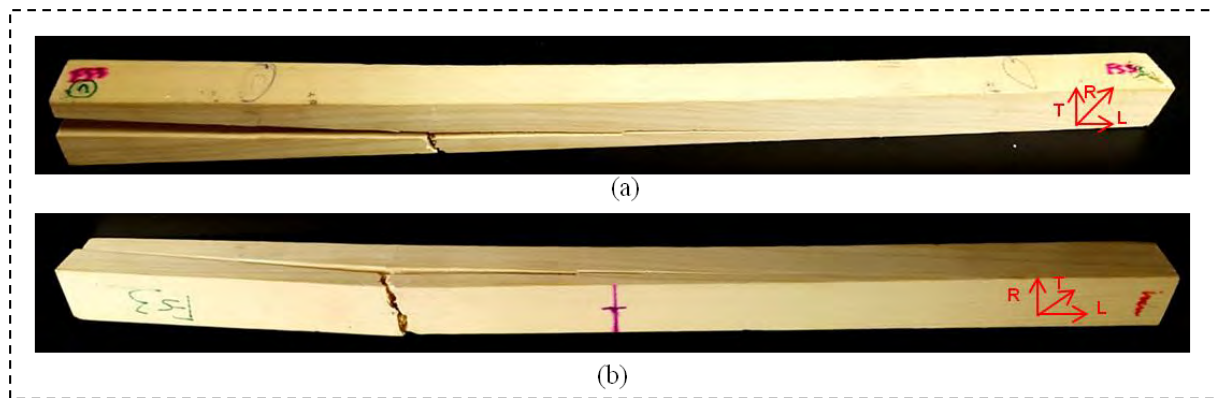


Figure 216 : Faciès de rupture de l'éprouvette FS3 (a) face avant LT (b) face tendue LR

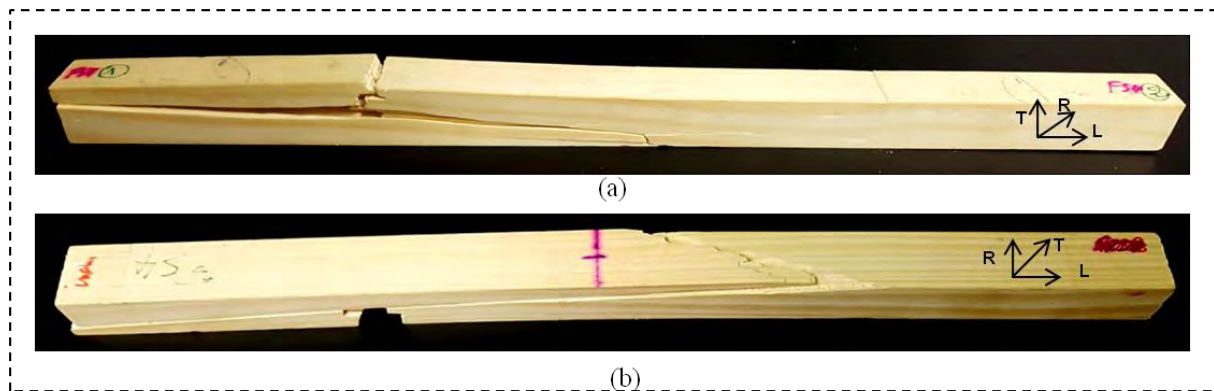


Figure 217 : Faciès de rupture de l'éprouvette FS4 (a) face avant LT (b) face tendue LR

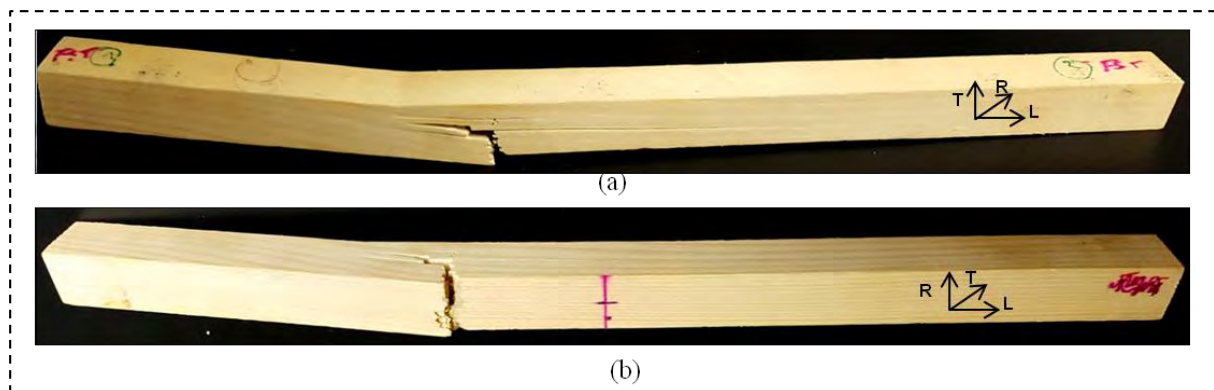


Figure 218 : Faciès de rupture de l'éprouvette FS5(a) face avant LT (b) face tendue LR

III.4- Analyse de l'activité acoustique

Afin de définir les différentes phases d'évolution de l'endommagement en terme d'émission acoustique, une analyse temporelle de l'activité acoustique a été réalisée sur l'éprouvette FS3, qui présente un comportement représentatif des éprouvettes en sapin pectiné soumises à une flexion 4 points.

La courbe de l'évolution de la force en fonction du temps couplée à l'évolution de l'activité acoustique est montrée sur la figure 219. L'activité acoustique est représentée par le nombre de salves cumulées (figure 219a), l'amplitude (figure 219b) et l'énergie cumulée (figure 219c). Trois phases peuvent être identifiées (figure 219) :

Phase I : Phase linéaire

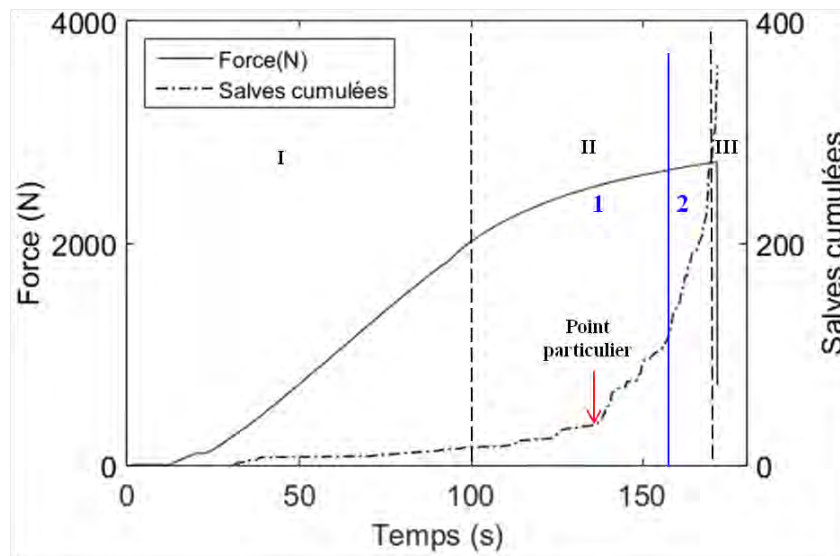
Cette phase correspond à la partie quasi-linéaire de la courbe force-déplacement ($F-\delta$). Le nombre de salves cumulées évolue d'une manière stable durant cette phase (figure 219a). L'amplitude des signaux enregistrés ne dépasse pas 50dB (figure 219b) tandis que l'énergie cumulée reste faible tout au long de cette phase (figure 219c).

Phase II : Phase d'endommagement

Cette phase débute lorsque la courbe force-déplacement ($F-\delta$) commence à devenir non linéaire, et se termine au point de charge maximale. En terme de réponse acoustique cette phase peut se diviser en deux parties : partie 1 où le nombre de salves cumulées continue à évoluer de manière relativement stable jusqu'à un point particulier $t=136,4s$ (figure 219a) après lequel la pente de la courbe des salves cumulées devient plus importante. L'amplitude dans la phase II-1 ne dépasse pas 65dB (figure 219b) et l'énergie cumulée reste toujours faible (figure 219c). La phase II-2 commence avec l'enregistrement d'un signal de haute amplitude (99dB) à $t= 158,6s$ accompagné par une augmentation brutale de l'énergie cumulée (figure 219c). La pente de la courbe du nombre de salves cumulées change de nouveau, avec un coefficient directeur qui devient de plus en plus important (figure 219a).

Phase III : Phase de rupture

Cette phase n'existe pas en réalité, car la rupture est instable et instantanée. Au niveau de la réponse acoustique à cet instant, l'amplitude des salves (figure 219b) couvre l'ensemble de la plage de la plus faible à la plus haute amplitude (de 35 dB à 99 dB). Le coefficient directeur de la courbe des salves cumulées (figure 219a) et celui de l'énergie cumulée (figure 219c) tendent tous les deux vers l'infini dans cette phase.



(a)

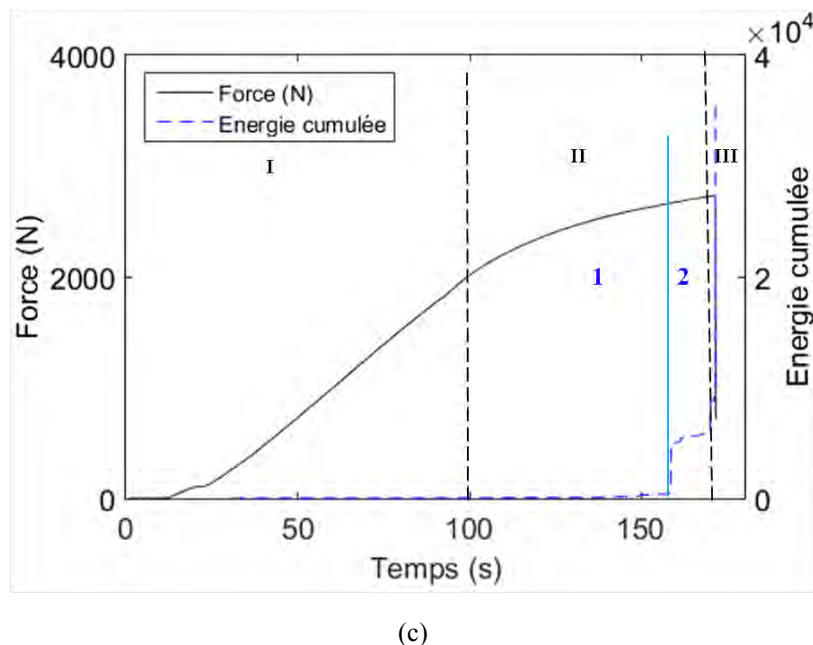
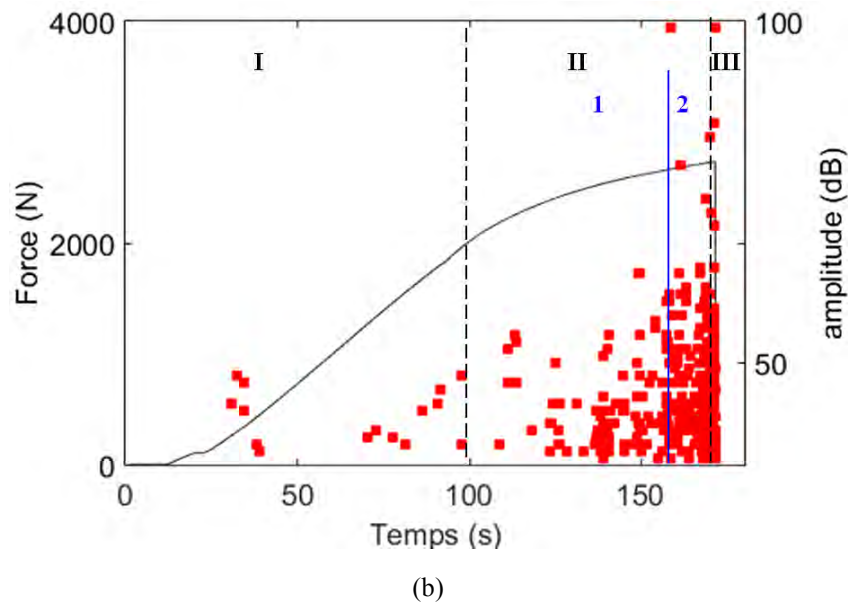


Figure 219 : Evolution de la charge en fonction du temps enregistrée sur l'éprouvette FS3 en sapin pectiné soumise à une sollicitation de flexion 4-points couplée avec l'activité acoustique en terme (a) de salves cumulées, (b) d'amplitudes (c) d'énergie cumulée

III.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique

Pendant la phase I, l'observation réalisée sur le film enregistré sur la face (LT) au cours de l'essai sur l'éprouvette FS3 ne montre aucun endommagement particulier. Cependant une activité acoustique est enregistrée pendant cette phase, on en peut déduire que certaines microfissures commencent à s'initier. Ensuite, la coalescence et la propagation de ces microfissures accompagnées par l'augmentation de l'intensité des microfissures prennent place dans la phase II-1. Le début de la phase II-2 coïncide avec un bruit audible tandis que l'éprouvette filmée sur la face LT n'affiche aucun endommagement à cet instant. Donc, les signaux enregistrés ici peuvent être générés par la propagation sub-critique des microfissures transversales qui va mener par la suite à la rupture des fibres dans la partie tendue. La phase III correspond à la rupture finale de l'éprouvette. La rupture finale commence brutalement

dans la partie tendue par la propagation de la fissure du type LT en mode I, suivie par une propagation longitudinale du type TL en mode I+II jusqu'à la rupture finale (figure 220).



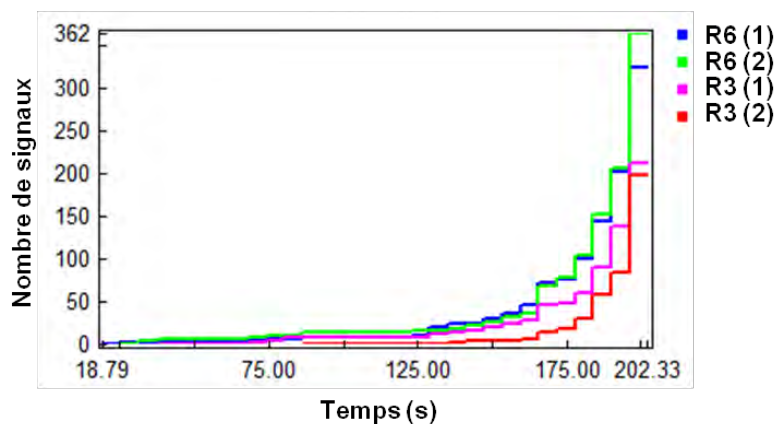
Figure 220 : Rupture finale de l'éprouvette FS3

III.6- Classement des données acoustiques

Les signaux recueillis par le capteur R6(2) (figure 221a) font l'objet de cette analyse puisque c'est le capteur qui enregistre le plus de signaux (figure 221b).



(a)



(b)

Figure 221 : (a) Positions des capteurs (b) nombre de signaux enregistrés par chaque capteur

A- Optimisation du nombre de classes

L'évolution des critères statistiques en fonction du nombre de classes valide un nombre de classes égal à 2 (figure 222). Donc, les signaux enregistrés lors de l'essai de flexion de l'éprouvette FS3 vont être regroupés en deux classes de signaux par la méthode des k-moyennes.

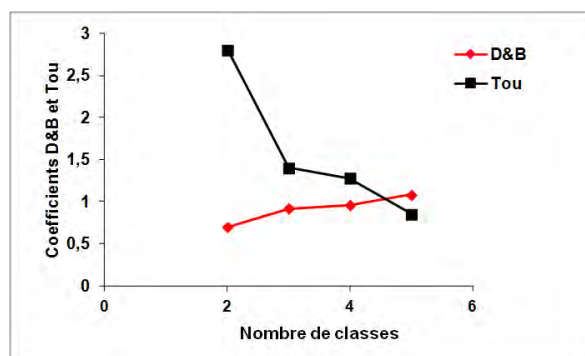


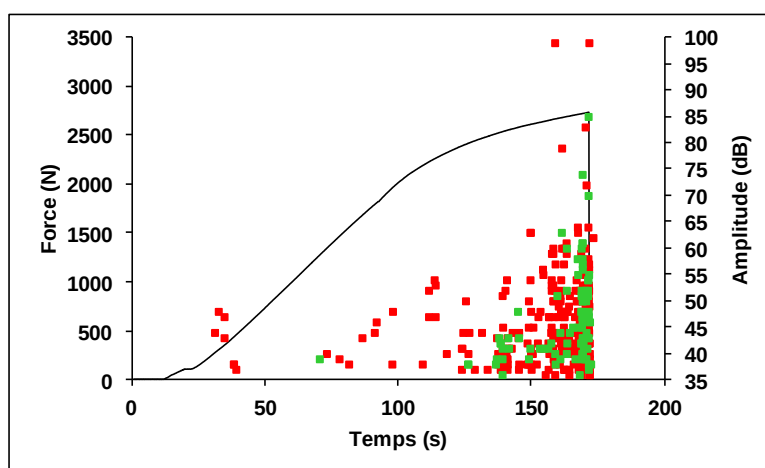
Figure 222 : Coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes pour les signaux recueillis sur l'éprouvettes FS3 par le capteur R6(2)

B- Résultats de la classification des signaux par la méthode des k-moyennes

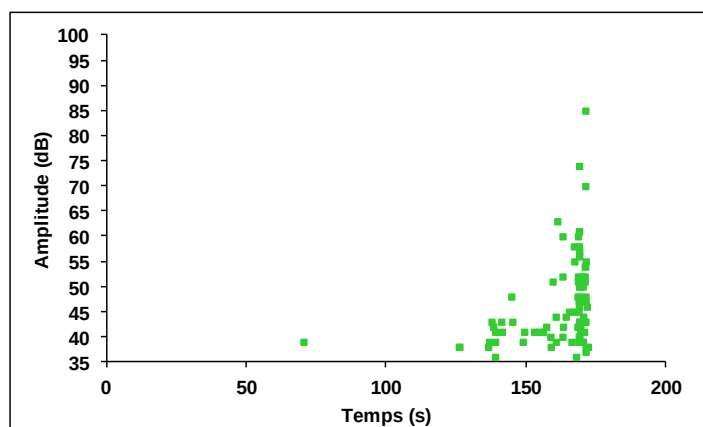
Les résultats de la classification des signaux acoustiques par la méthode des k-moyennes sont présentés au regard de l'amplitude des salves (figure 223). La valeur moyenne de chacun des descripteurs discriminants ainsi que leurs écarts types sont regroupés dans le tableau 46.

La classe verte contient 24 % des signaux. La signature acoustique des signaux de cette classe est caractérisée par une forme d'onde d'une durée moyenne, un temps de montée court, une faible amplitude, une haute fréquence et une énergie importante (Tableau 46) (figure 224a). La classe verte commence à apparaître un peu tard dans l'essai (figure 223a-b). Son apparition devient très importante au moment de la rupture finale de l'éprouvette (figure 223a).

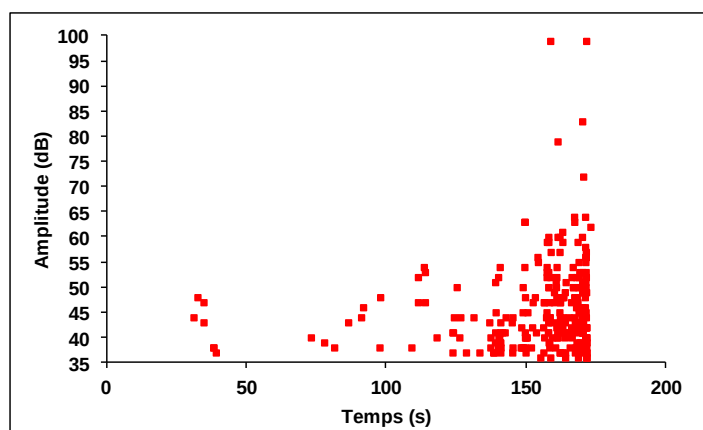
La classe rouge contient 76% des signaux. La forme d'onde de ces signaux est caractérisée par un temps de montée important, une longue durée, une faible amplitude (bien que cette classe contienne des signaux de haute amplitude), une faible fréquence et une énergie absolue très importante (Tableau 46) (figure 223b).



(a)



(b)



(c)

Figure 223 : Résultats de la classification des signaux recueillis sur l'éprouvettes FS3 (a) répartition temporelle des différentes classes de signaux (b) classe verte, (c) classe rouge

Tableau 46 : Valeurs moyennes et écarts types dans les parenthèses des descripteurs acoustiques de chaque classe de signaux recueillis sur l'éprouvettes FS3

Descripteurs	Classe verte	Classe rouge
% des signaux	24	76
Temps de montée (μ s)	72 (138)	161 (598)
Durée (μ s)	494 (770)	918 (3764)
Amplitude (dB)	46 (9)	45 (9)
Nombre de coups	24 (33)	42 (225)
Nombre de coups au pic	6 (9)	9 (25)
Energie absolue (aJ)	$15 \cdot 10^3$ ($12 \cdot 10^4$)	$3 \cdot 10^6$ ($4 \cdot 10^7$)
Fréquence moyenne (kHz)	54 (16)	40 (11)
Fréquence initiale (kHz)	169 (173)	132 (206)
Fréquence de réverbération (kHz)	42 (15)	34 (21)
Pic fréquentiel (kHz)	98 (2)	37 (6)
Barycentre fréquentiel (kHz)	276 (75)	258 (67)

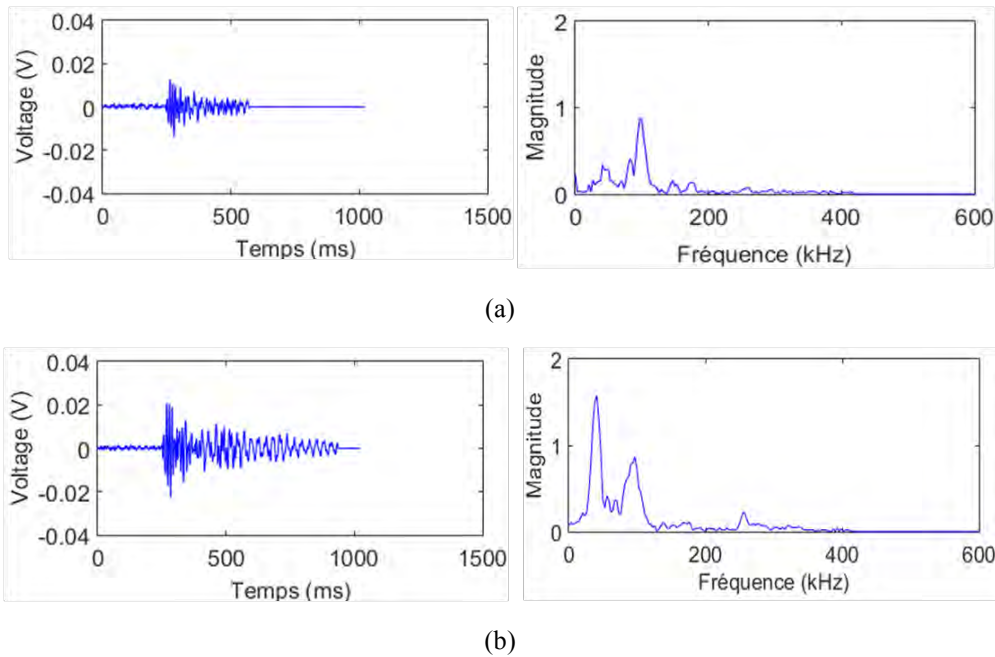


Figure 224 : Formes des signaux types d'EA et Transformées de Fourier associées des différentes classes de signaux recueillis sur l'éprouvettes FS3 (a) classe verte, (b) classe rouge

Les résultats de la classification montrent que les deux classes de signaux peuvent être différenciées par le pic fréquentiel. En effet, la classe verte est située autour d'un pic fréquentiel de 100 kHz tandis que la classe rouge est située sur les faibles fréquences (≈ 35 kHz) (figure 225).

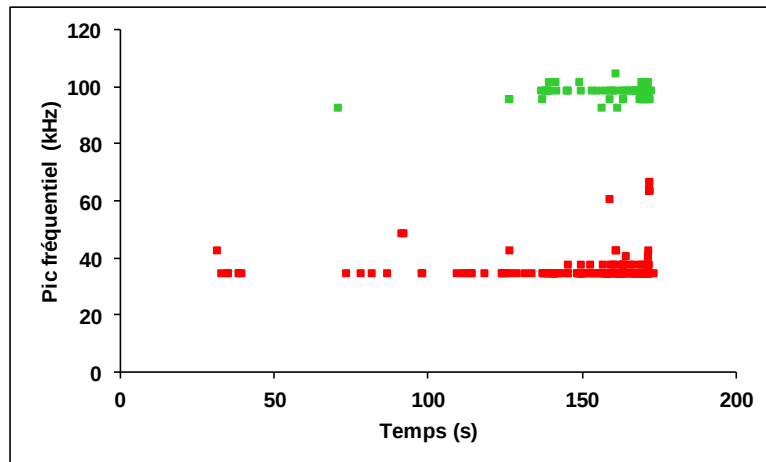


Figure 225 : Résultats de la classification en terme de pic fréquentiel des signaux recueillis sur l'éprouvettes FS3

C- Labellisation des classes

Pour labéliser les deux classes de signaux dissociées par l'analyse statistique multi-variables, nous nous sommes basés principalement sur la corrélation entre l'émission acoustique et le film enregistré. L'endommagement macroscopique du sapin pectiné n'est observé qu'à la fin de l'essai. Il commence par une rupture transversale sur la pleine largeur de la partie tendue de l'éprouvette (figure 226) puis une fissure de type (TL) se propage sur les faces latérales de l'éprouvette. Au moment de la rupture les deux classes rouge et verte apparaissent d'une manière importante (figure 223). Or, la classe rouge contient des signaux de très haute amplitude en plus elle est beaucoup plus énergétique que la classe verte. De plus, la classe rouge représente un phénomène progressif qui démarre très tôt pendant l'essai, qui

pourrait être les microfissurations transversales de type (LT). La propagation et la coalescence de ces microfissures transversales mènent à la rupture des fibres sur la pleine largeur de la partie la plus tendue de l'éprouvette. La classe verte pourrait donc être attribuée à la microfissuration longitudinale de type (TL).

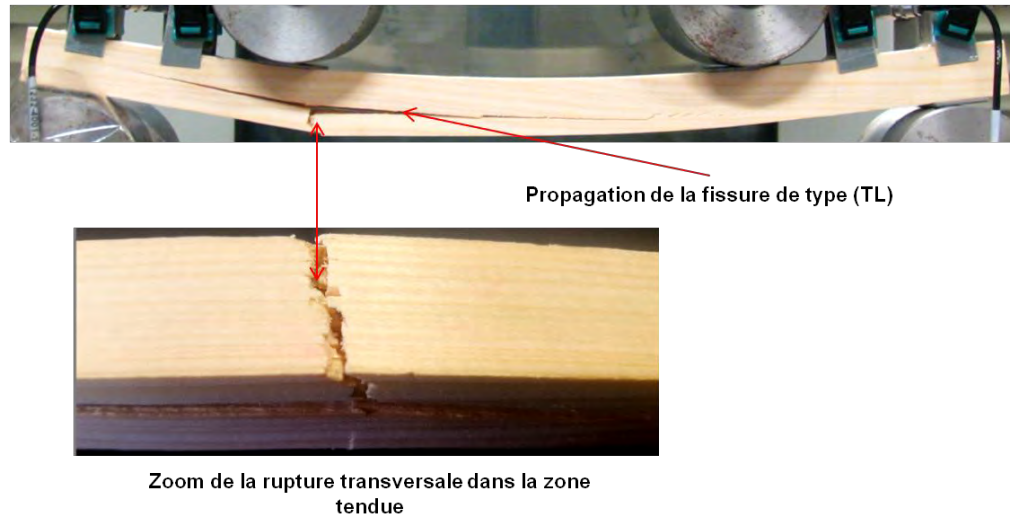


Figure 226 : Image extraite du film au moment de la rupture finale de l'éprouvette

III.7- Conclusion

Cette partie est consacrée à l'étude du comportement en flexion quatre-points des éprouvettes en sapin pectiné. Le comportement global ainsi que les faciès de rupture sont analysés dans un premier lieu, l'évolution de l'activité acoustique en fonction du temps de l'essai est ensuite étudiée. L'analyse statistique multi-variables a permis d'identifier deux groupes de signaux. L'attribution de ces deux groupes à des mécanismes spécifiques est basée sur des observations visuelles de l'éprouvette post-mortem et sur une corrélation avec le film enregistré pendant l'essai. Les deux classes identifiées sont attribuées comme suit :

- Classe verte : les signaux acoustiques de la classe pourraient être attribués à la microfissuration longitudinale de type (TL).
- Classe rouge : Les signaux de la classe rouge pourraient être attribués à la microfissuration transversale et à la rupture des fibres.

Concernant le scénario de l'endommagement, l'évolution de l'activité acoustique du sapin pectiné sollicité en flexion peut être divisée en trois phases :

Phase I: Phase linéaire

Cette phase représente le comportement linéaire de l'éprouvette, dans laquelle certains signaux d'EA sont enregistrés. Ils appartiennent principalement à la classe rouge. Donc on peut dire que l'endommagement commence par le développement de quelques microfissures transversales.

Phase II : Phase d'endommagement

Cette phase traduit un comportement non-linéaire jusqu'à la chute brutale de charge. Cette phase se divise en deux parties compte tenu de la vitesse d'augmentation des salves cumulées. Au début de la phase II-1, les microfissures transversales se rejoignent par coalescence. De plus, l'intensité des microfissures transversales augmente. L'initiation des microfissures longitudinales commence dans le plan (TL) à la fin de la phase II-1. La phase II-2 correspond

à la propagation et à la coalescence des microfissures longitudinales et l'intensification des fissures transversales accompagnée par la rupture des fibres.

Phase III: phase de rupture

Cette phase est caractérisée par la rupture instable et instantanée. Les signaux de la classe verte et rouge sont intensifiés dans cette phase. Ceci traduit la propagation transversale du type (LT) en mode I par la rupture des fibres observée sur la pleine largeur de la partie tendue de l'éprouvette, accompagnée par la propagation de la fissure de type TL en mode I+II sur la face latérale de l'éprouvette.

IV- Endommagement du peuplier sous sollicitation de flexion

IV.1- Introduction

Dans cette partie, l'étude de l'endommagement du bois de peuplier sous sollicitation de flexion quatre-points sera exposée. La même démarche, suivie pour l'étude des deux autres bois et décrite dans les parties précédentes, est utilisée pour le bois de peuplier, qui appartient aux bois des feuillus et possède une structure considérée comme homogène.

IV.2- Comportement en flexion et propriétés mécaniques associées

Les courbes expérimentales force-déplacement ($F-\delta$) de cinq éprouvettes en bois de peuplier de dimensions identiques sollicitées en flexion sont présentées sur la figure 227. La répétitivité au niveau de la rigidité et de la résistance est très bonne si l'on prend 4 éprouvettes sur cinq en éliminant l'éprouvette FP5, qui a une résistance et une rigidité plus faibles. L'allure de ces courbes est relativement proche d'une éprouvette à l'autre. En général, l'allure de ces courbes se décompose en trois parties : une partie linéaire au début de la sollicitation suivie par une partie non-linéaire jusqu'à ce que la charge atteigne sa valeur maximale. Il est intéressant de noter que la durée de cette partie est très différente d'une éprouvette à l'autre. Le déplacement à la rupture et donc le temps de l'essai présente une dispersion très importante. Il va du simple au double. En plus, le comportement du bois de peuplier semble plus ductile, car la durée de la partie non linéaire est plus importante par rapport aux deux bois résineux. La rupture finale survient de façon brutale.

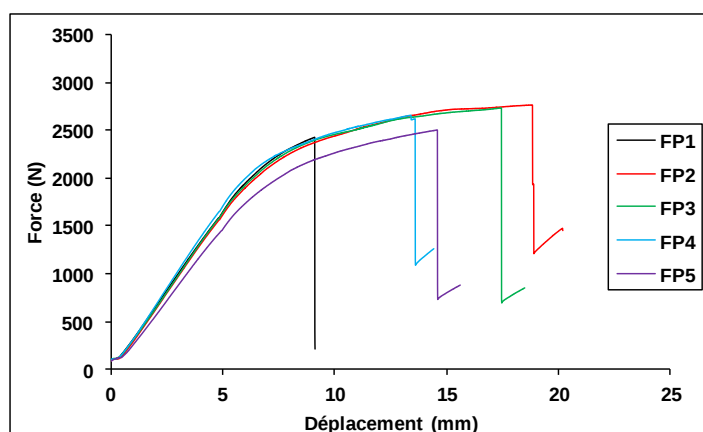


Figure 227 : Courbes force-déplacement des cinq éprouvettes en sapin pectiné sollicitées en flexion 4-points

La contrainte maximale apparente en flexion est mesurée à partir de la charge maximale identifiée sur les courbes expérimentales selon l'équation (11) (cf. chapitre 2 partie III.4.2 page 67). Le module d'élasticité est mesuré, comme décrit précédemment pour les deux bois

résineux, à l'aide du capteur LVDT et à l'aide des jauges de déformation. Toutes les propriétés mécaniques mesurées sont résumées dans le Tableau 47. On constate une faible dispersion (inférieure à 6%) aussi bien pour la mesure de la contrainte maximale et que pour celle du module d'élasticité en flexion. Comme dans le cas du Douglas, le module d'élasticité en flexion mesuré par les jauges de déformation est 6,7% plus élevé que celui obtenu à l'aide du déplacement mesuré par le capteur LVDT. Cette différence pourrait être expliquée de la même manière que dans le cas du Douglas. En effet, les jauges de déformation fournissent les déformations locales à l'endroit où les jauges sont collées tandis que le capteur LVDT mesure la flèche qui est un paramètre global influencé par l'ensemble de la géométrie de la poutre.

En comparant avec les valeurs publiées dans la littérature, la contrainte maximale moyenne en flexion mesurée dans cette étude dépasse de 5% la borne supérieure, tandis que le module d'élasticité mesuré par les deux méthodes se situe bien dans la fourchette des valeurs trouvées dans la littérature.

Tableau 47 : Propriétés mécaniques mesurées sur les éprouvettes de peuplier sollicitées en flexion quatre-points

Eprouvettes	Contraintes maximales en flexion (MPa)	Contrainte maximale en flexion (littérature) (MPa)	Modules d'élasticité en flexion (LVDT) (GPa)	Module d'élasticité en flexion (jauges) (GPa)	Module d'élasticité en flexion (littérature) (GPa)
FP1	72,9	54-76*	9,2	9,5	8,1-9,6*
FP2	83,1		9,2		
FP3	81,9		8,7		
FP4	79,8		9,5		
FP5	75,2		8,2		
Moyenne	80,0		8,9		
Coefficient de variation	± 4,5 (%)		± 5,7 (%)		

* Sell et Kropf (1990). Propriétés et caractéristiques des essences de bois

IV.3- Observations des faciès de rupture

Les faciès de rupture des éprouvettes de peuplier sollicitées en flexion sont présentés sur les figures 228-232. Les figures 228a-232a présentent des photos de la face avant des éprouvettes (face LT) alors que les figures 228b-232b présentent des photos de la face tendue des éprouvettes (face LR). Ces faciès de rupture permettent de classer les éprouvettes en deux groupes : le groupe 1 comprend les éprouvettes FP2, FP3 et FP4 et le groupe 2 se compose des éprouvettes FP1 et FP5.

Pour les essais de flexion sur les éprouvettes du groupe 1 (figures 229, 230 et 231), la ligne de fissure montre un mode de rupture combiné par traction simple et en biseau (mode a et b sur la figure 195 page 204). L'amorce de fissure s'initie dans la zone de rigidité minimale qui se situe sous les appuis supérieurs. En effet, sous les appuis on observe une zone de matage qui affaiblit le matériau. Puisque la charge est symétrique par rapport à la section centrale de la poutre, si l'une des mèches de fibres cassées à la position d'un appui supérieur se détache de la face (LT) avant, l'autre à la position de l'autre appui supérieur opposé se détache sur la face (LT) arrière de façon symétrique. Sous l'effet de flexion les deux fissures se propagent en mode mixte I+II de façon croisée vers le centre de l'éprouvette dans une direction inclinée par rapport à la direction des fibres. Les faciès de rupture sur les éprouvettes rompues forment une croix en (X).

Les faciès de rupture observés sur les éprouvettes du groupe 2 sont moins symétriques. La rupture des fibres dans la partie la plus tendue, sous la position d'un appui supérieur, commence par un détachement de fibres située sur une face (LT), puis sous l'effet de pelage/cisaillement la fissure se propage en mode mixte I+II dans une direction inclinée par rapport à la direction des fibres. De plus, on aperçoit plusieurs zones de rupture de fibres sur la partie la plus tendue de l'éprouvette. Ceci forme sur la face (LR) la plus tendue une ligne de rupture traversant la largeur, soit en escalier (figure 228b), soit en biseau (figure 232b).

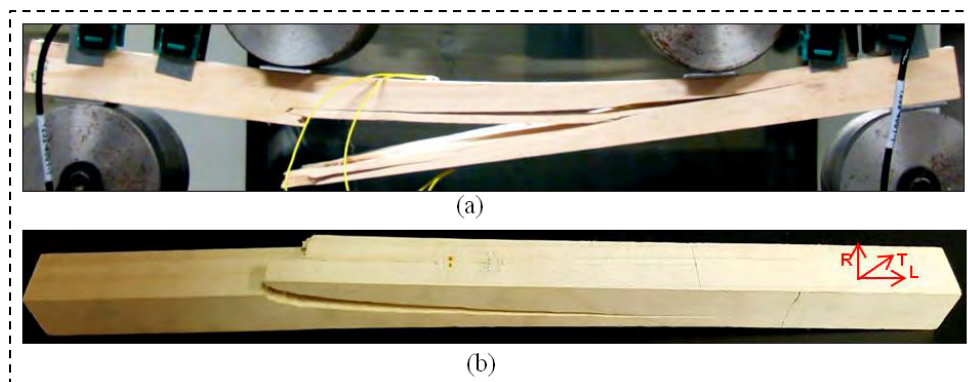


Figure 228 : Faciès de rupture de l'éprouvette FP1 (a) une face LT (b) partie tendue à la face LR

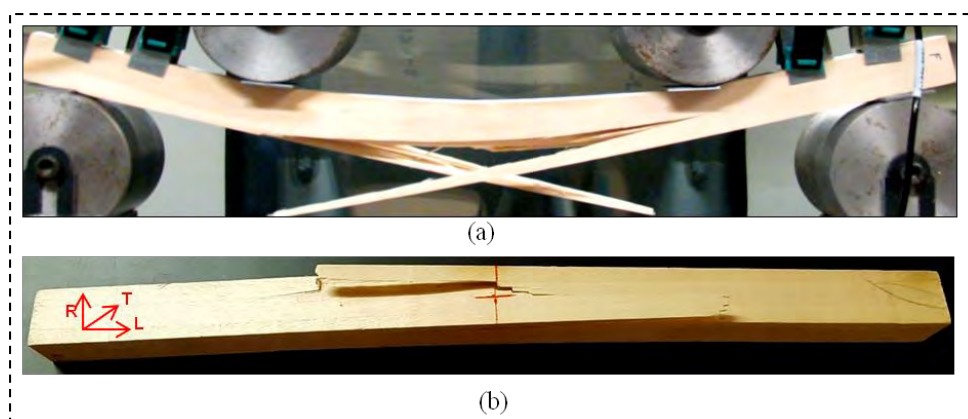


Figure 229 : Faciès de rupture de l'éprouvette FP2 (a) une face LT (b) partie tendue à la face LR

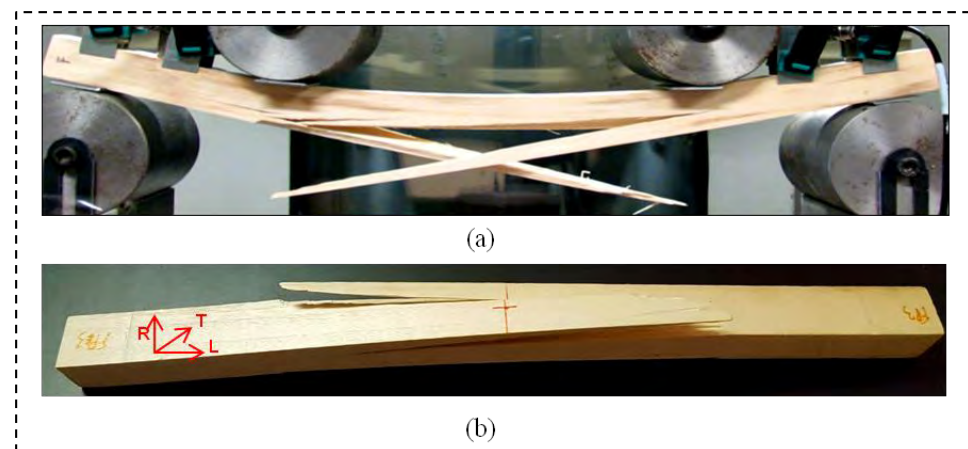


Figure 230 : Faciès de rupture de l'éprouvette FP3 (a) une face LT (b) partie tendue à la face LR

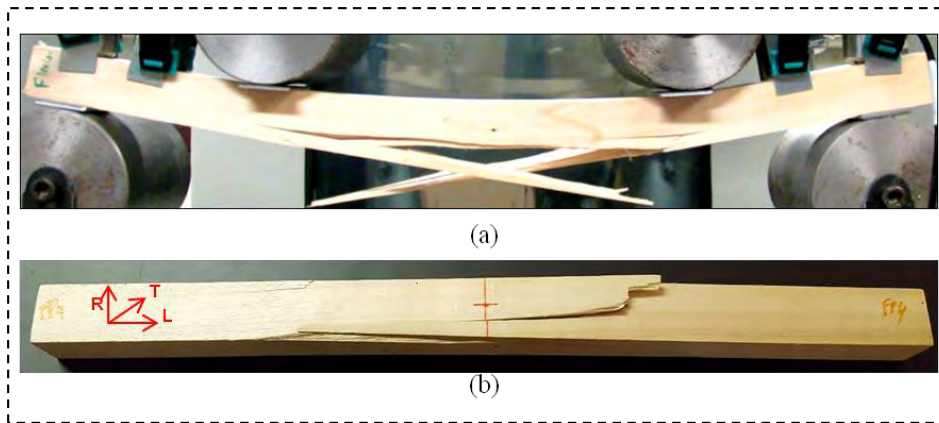


Figure 231 : Faciès de rupture de l'éprouvette FP4 (a) une face LT (b) partie tendue à la face LR

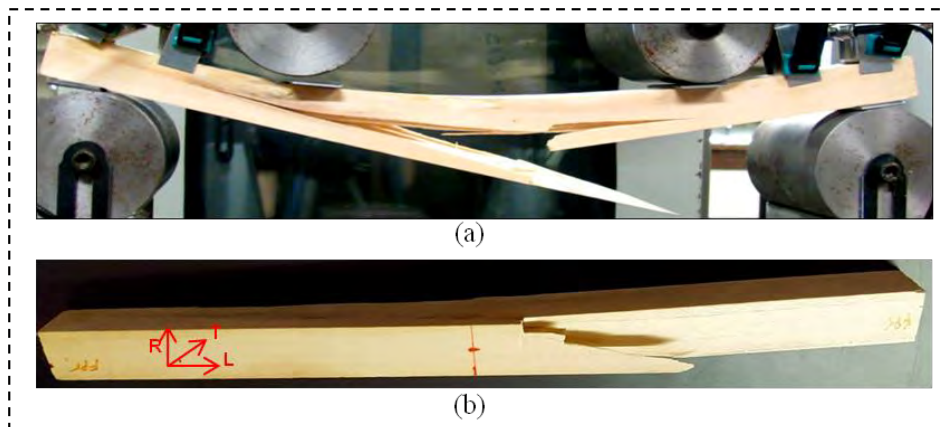


Figure 232 : Faciès de rupture de l'éprouvette FP5 (a) une face LT (b) partie tendue à la face LR

IV.4- Analyse de l'activité acoustique

Une analyse temporelle de l'activité acoustique a été réalisée sur l'éprouvette FP4, qui présente un comportement représentatif des éprouvettes de peuplier sollicitées en flexion. Cette analyse est réalisée dans le but de définir les différentes phases d'évolution de l'endommagement en terme d'émission acoustique.

La courbe de l'évolution de la force en fonction du temps couplée à l'évolution de l'activité acoustique est montrée sur la figure 233. L'activité acoustique est représentée par le nombre de salves cumulées (figure 233a), l'amplitude (figure 233b) et l'énergie cumulée (figure 233c). Trois phases peuvent être identifiées (figure 233)

Phase I: Phase linéaire

Cette phase correspond à la partie quasi-linéaire de la courbe ($F-\delta$). L'enregistrement des salves acoustiques commence à partir de $t=50s$. Le nombre de salves cumulées (figure 233a) et l'énergie cumulée (figure 233c) restent faibles dans cette phase. L'amplitude des signaux enregistrés varie entre 35dB et 55dB (figure 233b).

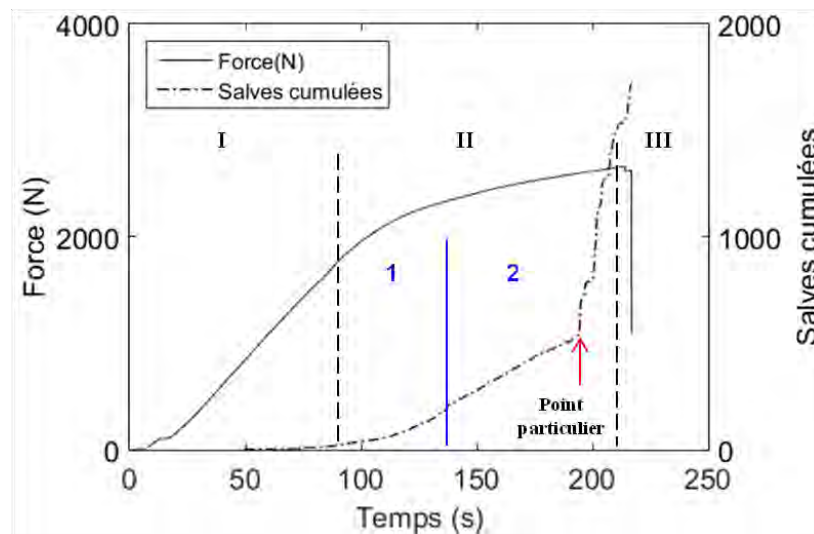
Phase II: Phase d'endommagement

Cette phase débute lorsque la courbe ($F-\delta$) commence à devenir non linéaire, et se termine au point de la charge maximale. En terme de réponse acoustique, cette phase peut être divisée en deux parties : partie 1 où le nombre de salves cumulées commence à augmenter tandis que l'énergie cumulée reste faible. L'amplitude dans la phase II-1 peut atteindre 60dB. La phase II-2 commence à partir d'un signal de haute amplitude (91dB) enregistré à $t= 137,5s$ (figure

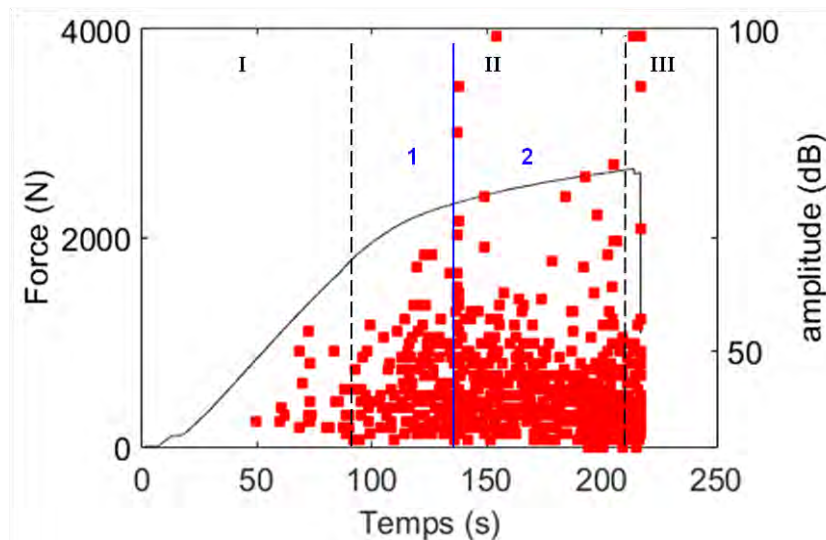
233b). On observe à cet instant une augmentation de l'énergie cumulée (figure 233c). Dans cette partie II-2, on constate aussi des points particuliers. Le premier point particulier correspond à une autre augmentation de l'énergie cumulée à $t = 153,8s$ (figure 233c). Cette dernière provient d'un événement de très haute amplitude (99dB) (figure 233b). Un autre point particulier est distingué aussi au niveau de la courbe de l'évolution du nombre de salves cumulées (figure 233a) où la vitesse de l'évolution devient très importante.

Phase III: Phase de rupture

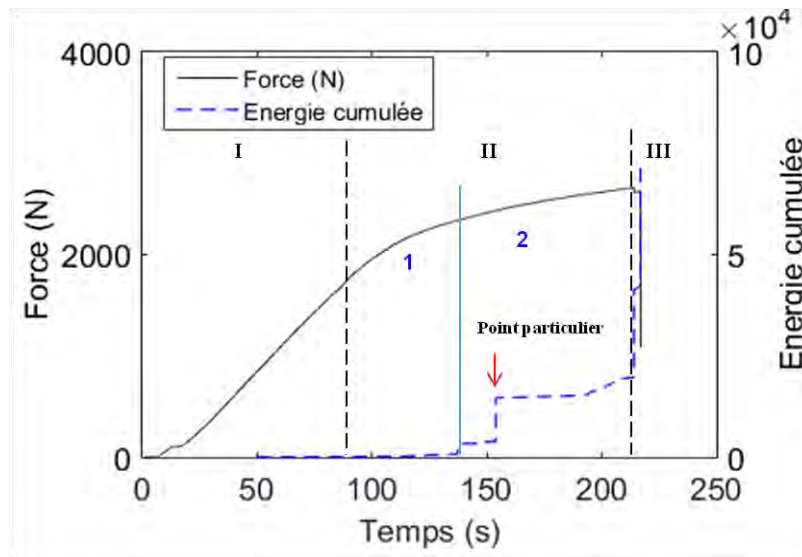
Cette phase est quasi-instantanée, il n'y a que l'éprouvette FP4 qui présente un petit pic de charge avant la chute de charge finale. Au niveau de la réponse acoustique dans cette phase, le nombre de salves cumulées et l'énergie cumulée augmentent d'une manière très importante. L'amplitude des signaux enregistrés varie entre 35dB et 99dB.



(a)



(b)



(c)

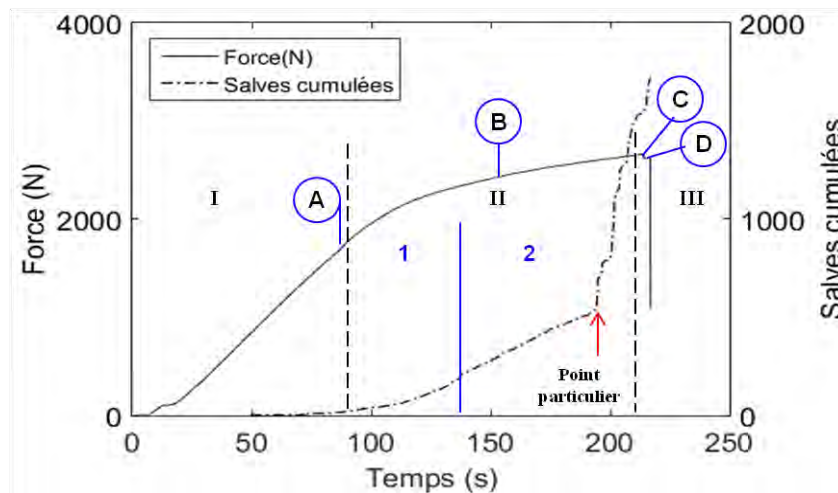
Figure 233 : Evolution de la charge en fonction du temps enregistrée sur l'éprouvette FP4 en peuplier soumise à une sollicitation de flexion couplée avec l'activité acoustique en terme (a) de salves cumulées, (b) d'amplitudes (c) d'énergie cumulée

IV.5- Corrélation entre l'activité acoustique et la réponse mécanique

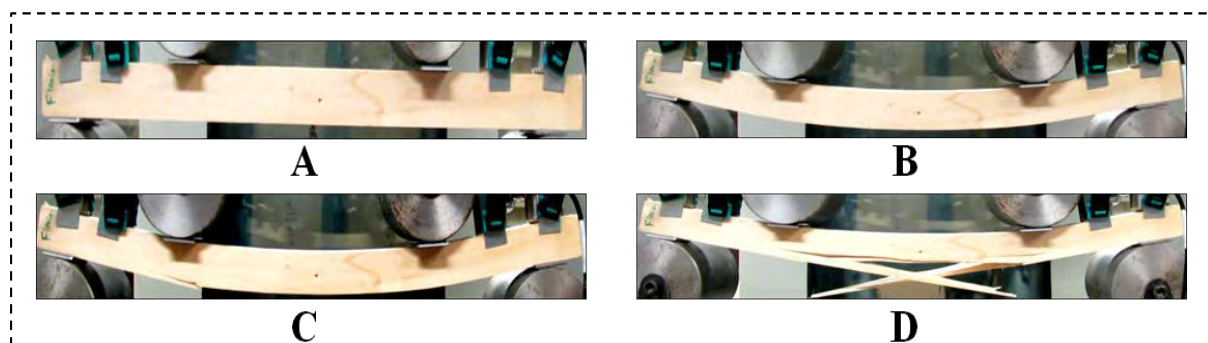
L'essai de flexion effectué sur l'éprouvette FP4 a été filmé. Quatre images à différents stades ont été extraites du film (figure 234). En effet, pendant la phase I, aucun endommagement particulier n'est observé sur la face (LT) de l'éprouvette filmée (figure 234b-Point A). Les signaux d'EA détectés à ce stade peuvent être générés lors d'initiation de certaines microfissures.

La coalescence et la propagation de ces microfissures ainsi que l'augmentation de la densité des microfissures ont lieu dans la phase II. Le signal de haute amplitude (99dB) enregistré dans la phase II-2 correspond à un bruit audible entendu pendant l'essai. En revanche, l'image extraite du film à cet instant ne montre aucun endommagement visible (figure 234b-Point B). On suppose que le matériau a subi une dégradation importante par la rupture de certaines fibres dans la partie la plus tendue. Par la suite l'activité acoustique devient de plus en plus importante, donc la vitesse d'augmentation du nombre de salves cumulées devient très élevée.

La phase III commence par une petite chute de charge au point C (figure 234a-Point C), à partir duquel les signaux acoustiques de haute amplitude sont aussi présents que ceux de faible amplitude. Ceci témoigne de la présence de divers mécanismes d'endommagement dans la phase de rupture finale. Le point C marque également la présence d'un endommagement macroscopique. Il s'agit d'un détachement de fibres observé à la position de l'appui supérieur gauche dans la zone tendue suivi par une propagation d'une fissure de type (TL) sur une courte distance (figure 234b-Point C). Cette première rupture est suivie par deux autres ruptures qui commencent simultanément dans les deux faces (LT) opposées de l'éprouvette, l'une en dessous de la position de l'appui supérieur gauche et l'autre en dessous de la position de l'appui supérieur droite (figure 234b-Point D). Ensuite, les deux fissures se propagent dans les deux sens opposés de manière symétrique, ceci pour conséquence forme une croix en (X) (figure 234b-Point D).



(a)

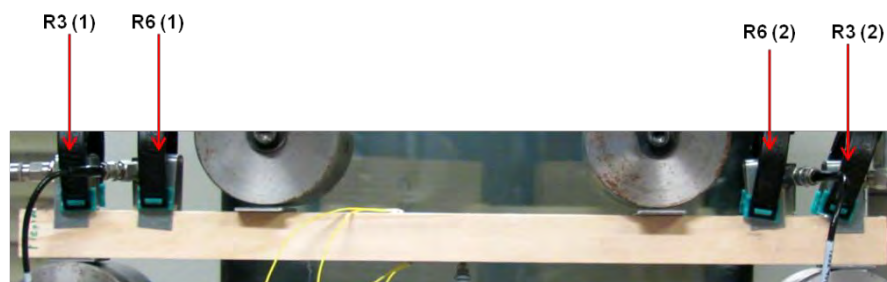


(b)

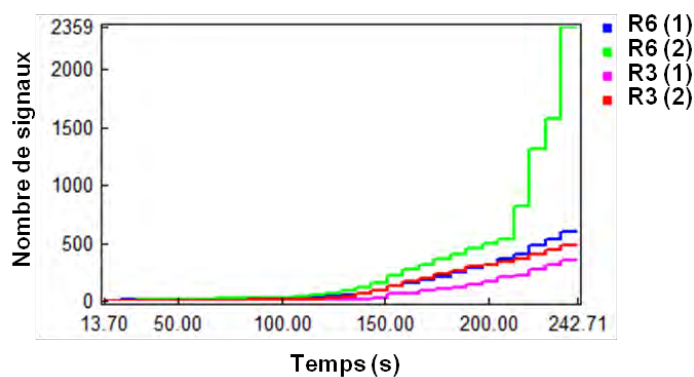
Figure 234 : Différents stades d'endommagement de l'éprouvette FP4 (a) Courbe de l'évolution de la charge et de l'activité acoustique en fonction du temps (b) Photos de la surface de l'échantillon extraites du film à des points particuliers

IV.6- Classement des données acoustiques

Les signaux recueillis par le capteur R6(2) (figure 235a) font l'objet de cette analyse puisqu'il s'agit du capteur qui enregistre la majorité des signaux (figure 235b).



(a)



(b)

Figure 235 : (a) Positions des capteurs (b) Nombre de signaux enregistrés par chaque capteur

A- Optimisation du nombre de classes

L'évolution des critères statistiques en fonction du nombre de classes valide un nombre de classe égale à 2 (figure 236). Donc, les signaux enregistrés lors de l'essai de flexion de l'éprouvette FP4 vont être regroupés en deux classes de signaux par la méthode des k-moyennes.

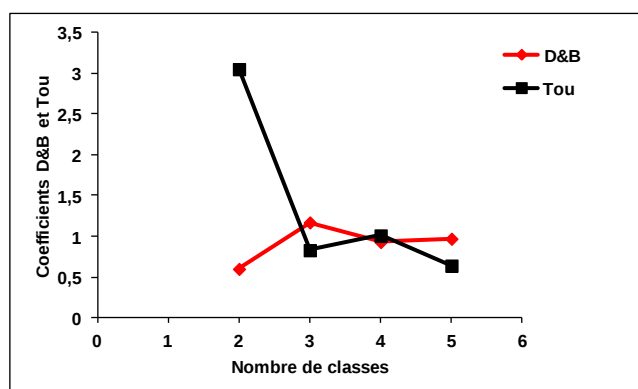


Figure 236 : Coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes des signaux recueillis sur l'éprouvette FP4

B- Résultats de classification des signaux par la méthode des k-moyennes

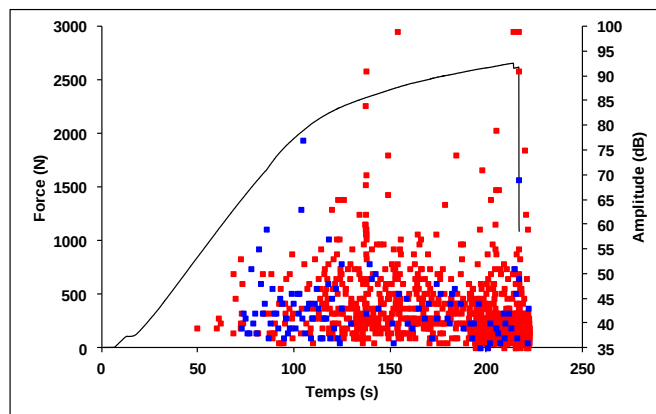
Les résultats de la classification des signaux acoustiques par la méthode des k-moyennes sont présentés au regard de l'amplitude des salves (figure 237). La valeur moyenne de chacun des descripteurs discriminants ainsi que leurs écarts types sont regroupés dans le tableau 48.

La classe rouge contient 95% des signaux. La signature acoustique de ces signaux est caractérisée par un temps de montée important, une longue durée, une faible amplitude (bien qu'elle comporte des signaux de très haute amplitude) et une énergie absolue très importante (Tableau 48) (figure 238a). Cette classe apparaît tout au long de l'essai.

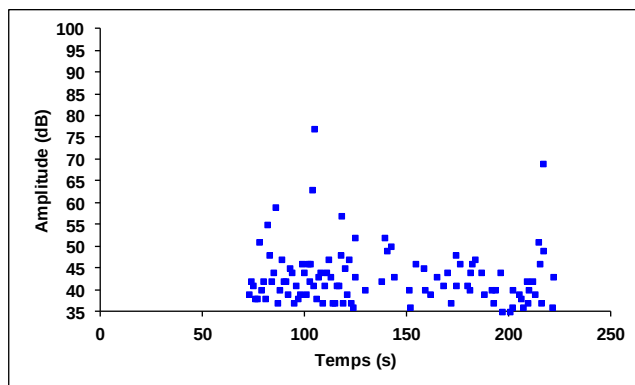
La classe bleue ne représente que 5% des signaux enregistrés pendant l'endommagement de l'éprouvette FP4. Ces signaux ont une forme d'onde caractérisée par une faible amplitude, un temps de montée court, une durée moyenne et une énergie faible en comparant avec celle de la classe rouge (Tableau 48) (figure 238b). Cette classe apparaît un peu plus tard dans l'essai (figure 237b).

En regardant les résultats de la classification en terme de pic fréquentiel, on peut constater qu'il est possible de distinguer les deux classes de signaux. En effet la classe rouge se situe à

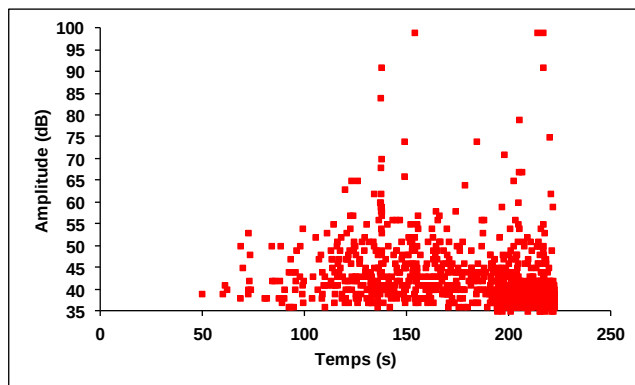
des fréquences plus faibles (inférieures à 30 kHz) tandis que la classe bleue se situe à des fréquences plus élevées (supérieures 90 kHz) (figure 239).



(a)



(b)

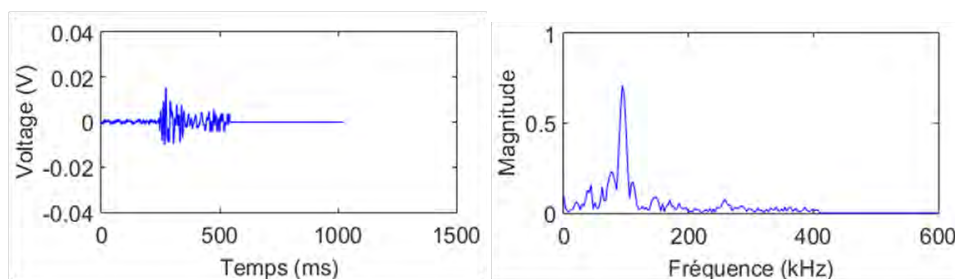


(c)

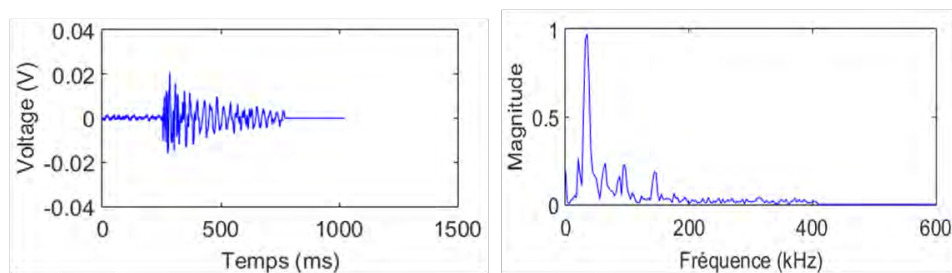
Figure 237 : Résultats de la classification des signaux recueillis sur l'éprouvettes FP4 (a) répartition temporelle des différentes classes de signaux (b) classe bleue (c) classe rouge

Tableau 48 : Valeurs moyennes et écarts types dans les parenthèses des descripteurs acoustiques de chaque classe de signaux recueillis sur l'éprouvettes FP4

Descripteurs	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	5	95
Temps de montée (μ s)	53 (114)	360 (444)
Durée (μ s)	311 (557)	934 (1635)
Amplitude (dB)	43 (6)	40 (5)
Nombre de coups	14 (21)	18 (68)
Nombre de coups au pic	4 (7)	7 (7)
Energie absolue (aJ)	75 (210)	$8 \cdot 10^5$ ($2 \cdot 10^7$)
Fréquence moyenne (kHz)	59 (23)	22 (14)
Fréquence initiale (kHz)	140 (139)	111 (506)
Fréquence de réverbération (kHz)	47 (24)	20 (36)
Pic fréquentiel (kHz)	95 (8)	25 (7)
Barycentre fréquentiel (kHz)	310 (61)	301 (42)



(a)



(b)

Figure 238 : Formes des signaux types d'EA et Transformée de Fourier associée des différentes classes des signaux recueillis sur l'éprouvettes FP4 (a) classe bleue (b) classe rouge

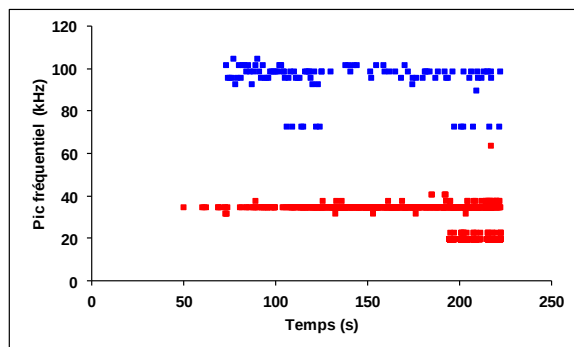


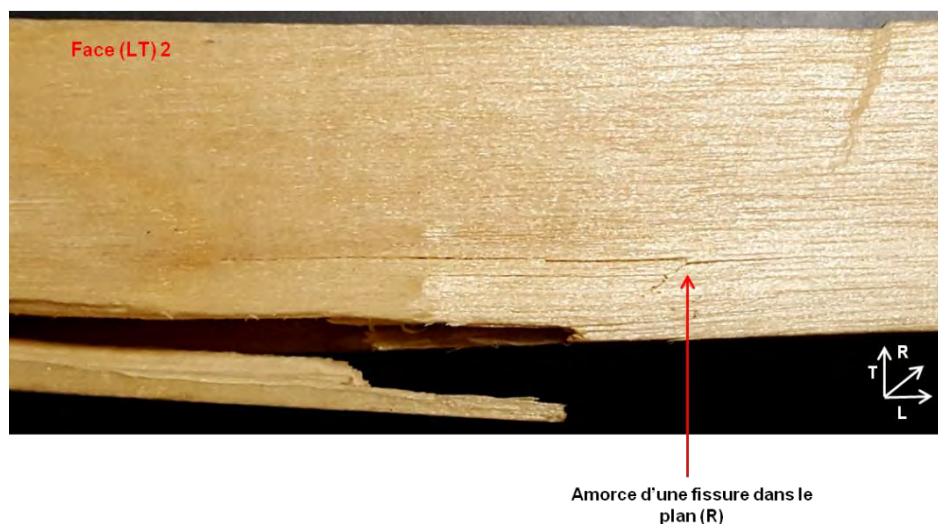
Figure 239 : Résultats de la classification en terme de pic fréquentiel des signaux recueillis sur l'éprouvettes FP4

C- Labellisation des classes

L'analyse de faciès de rupture de l'éprouvette (FP4) montre que sur la face latérale avant (face LT1 figure 240a) la fissure s'amorce au niveau d'un défaut d'usinage où les fibres sont déjà coupées sur la face (LR) la plus tendue de l'éprouvette (figure 240a). Ensuite cette fissure se propage rapidement sur la face (LT) dans une direction inclinée par rapport au fil. L'amorce de la fissure sur la face latérale arrière (face LT2 figure 240b) pourrait être due à la fissure observée dans le plan (LT) (figure 240b). Donc, on observe un seul mécanisme majoritaire sur le faciès de rupture de l'éprouvette qui est la fissuration. De plus, comme le peuplier est un bois très homogène, il semblait que les signaux issus des différents types de microfissuration et de la rupture des fibres sont semblables et donc difficiles à dissocier. On peut dire donc que la classe rouge qui représente 95% de la totalité des signaux pourrait contenir les différents types de microfissuration qu'elle soit longitudinale ou transversale ainsi que la rupture des fibres. En outre, un reclassement des signaux a été fait dans la classe rouge mais il n'a pas donné de classement intéressant.



(a)



(b)

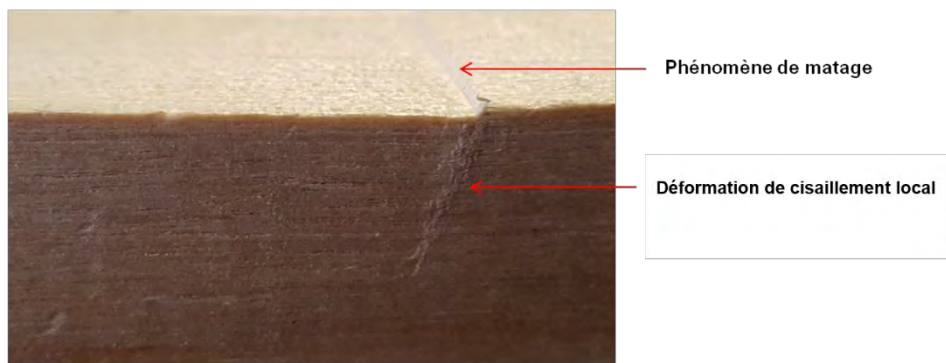
Figure 240 : (a) Initiation de la fissure au niveau d'un défaut d'usinage sur la face LT1 (b) amorce de la fissure sur la face LT2

Quant à la classe bleue qui contient 5% des signaux et qui arrive un peu plus tard dans l'essai, elle pourrait être attribuée à la déformation permanente en compression obtenue par l'effet de matage (figure 241 a). C'est une déformation de cisaillement local des fibres observée dans le plan (LT) sur toutes les éprouvettes de peuplier (figure 241 b). Cette déformation ne présente pas un endommagement très important c'est pourquoi elle ne génère que 5% des signaux mais on arrive à l'enregistrer puisqu'elle est située très proche des capteurs R6.



Phénomène de matage

(a)



(b)

Figure 241 : (a) Phénomène de matage observé sur les éprouvettes de peuplier (b) la déformation de cisaillement local des fibres dans le plan (LT)

Afin de vérifier la reproductibilité de ce résultat, on a réalisé une analyse statistique multi-variables sur une autre éprouvette (FP3) qui a le même type de faciès de rupture que celui de l'éprouvette FP4 (figure 230). Les critères statistiques de Davies et Bouldin (D&B) et Tou valident un nombre de classes égal à 2 (figure 242) comme pour l'éprouvette FP4 (figure 236).

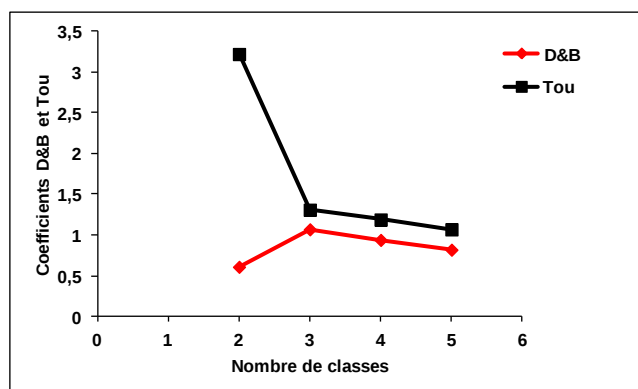
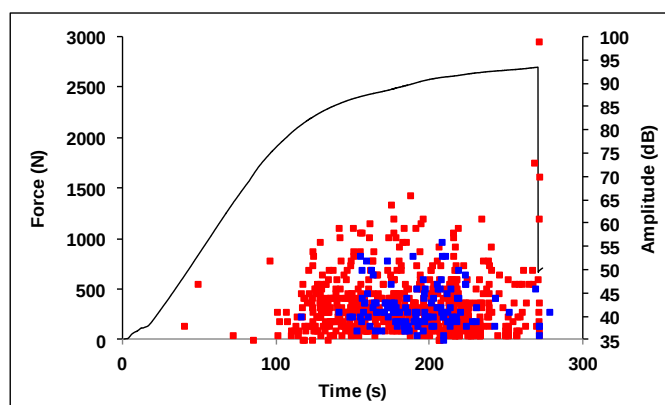
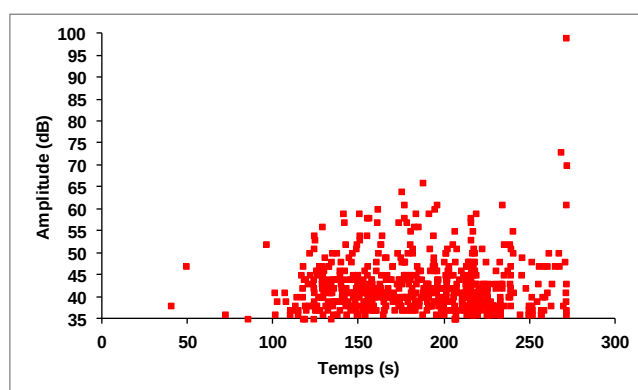


Figure 242 : Coefficients D&B et Tou en fonction du nombre de classes pour l'éprouvette FP3

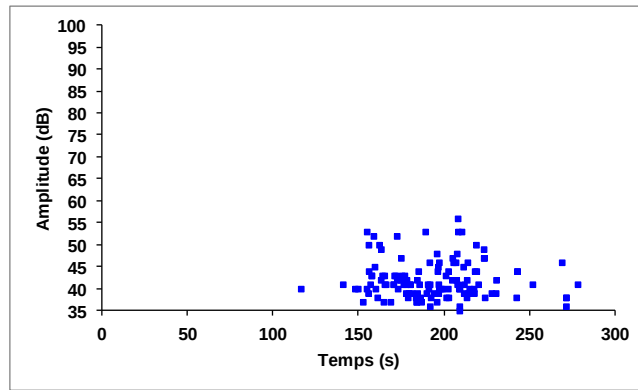
Les résultats de la classification sont donnés au regard de l'évolution de l'amplitude en fonction du temps sur la figure 243. On retrouve la même répartition des classes comme pour l'éprouvette FP4 avec une classe rouge majoritaire contenant 87,4% des signaux et une classe bleue qui apparaît plus tard dans l'essai contenant 12,6% des signaux. Cette dernière est attribuée comme précédemment au phénomène de rétrécissement dans le plan transversal due au matage. Elle contient plus de signaux que la classe bleue dans l'analyse précédente car le matage dans l'éprouvette FP3 est plus important que celui dans l'éprouvette FP4. Les valeurs moyennes de descripteurs des signaux de ces deux classes sont regroupées dans le tableau 49. Elles semblent proches que celles des descripteurs des classes identifiées dans l'analyse de l'éprouvette FP4 (Tableau 48).



(a)



(b)



(c)

Figure 243 : Résultats de la classification des signaux recueillis sur l'éprouvette FP3 (a) répartition temporelle de différentes classes de signaux (b) classe bleue (c) classe rouge

Tableau 49 : Valeurs moyennes et écarts types dans les parenthèses des descripteurs acoustiques de chaque classe de signaux recueillis sur l'éprouvette FP3

Descripteurs	Classe bleue	Classe rouge
% des signaux	12,6	87,4
Temps de montée (μs)	39 (45)	160 (281)
Durée (μs)	219 (183)	613 (26145)
Amplitude (dB)	42 (4)	41 (6)
Nombre de coups	11 (9)	19 (146)
Nombre de coups au pic	4 (3)	5 (5)
Energie absolue (aJ)	80 (137)	10^6 ($3 \cdot 10^7$)
Fréquence moyenne (kHz)	61 (23)	32 (15)
Fréquence initiale (kHz)	197 (545)	137 (467)
Fréquence de réverbération (kHz)	55 (89)	39 (51)
Pic fréquentiel (kHz)	98 (4)	31 (7)
Barycentre fréquentiel (kHz)	322 (50)	298 (50)

IV.7- Conclusion

Cette partie est consacrée à l'étude du comportement en flexion quatre-points des éprouvettes en peuplier. Le comportement en flexion ainsi que les faciès de rupture ont été analysés dans un premier lieu. Ensuite l'évolution de l'activité acoustique en fonction du temps de l'essai a été étudiée. L'analyse statistique multi-variables a permis d'identifier deux groupes de signaux. Un groupe qui contient les différents mécanismes d'endommagement, tels que la fissuration longitudinale, la fissuration transversale et la rupture des fibres et un deuxième groupe de signaux attribué au phénomène de matage. On peut conclure donc que le bois de peuplier est tellement homogène que l'on ne peut difficilement dissocier les signaux les uns des autres par rapport aux différents mécanismes d'endommagement.

Concernant le scénario d'endommagement, l'évolution de l'activité acoustique du peuplier sollicité en flexion peut être divisée en trois phases :

Phase I: Phase linéaire

Cette phase correspond à la partie quasi-linéaire de la courbe (F-δ). L'endommagement commence par le développement de quelques microfissures.

Phase II: Phase d'endommagement

Cette phase débute lorsque la courbe (F- δ) commence à devenir non linéaire, et se termine au point où la charge est maximale. La coalescence et la propagation des microfissures ainsi que l'augmentation de la densité des microfissures ont lieu dans la phase II. Cette phase se divise en deux parties compte tenu de la vitesse d'augmentation des salves cumulées. Au début de la phase II-1, on constate une apparition importante des signaux de la classe bleue (figure 237a-b). On peut dire que le phénomène de matage commence à devenir important à partir de ce stade de chargement. La phase II-2, correspond à la propagation et à la coalescence des microfissures accompagnées par la rupture de quelques fibres.

Phase III : Phase de rupture

Cette phase est quasiment instantanée. L'amorce de fissure s'initie dans la zone de rigidité minimale qui se situe sous les appuis supérieurs. En effet, sous les appuis on observe une zone de matage qui affaiblit le matériau. Puisque la charge est symétrique par rapport à la section centrale de la poutre, si l'une des mèches de fibres cassées à la position d'un appui supérieur se détache de la face (LT) avant, l'autre à la position de l'autre appui supérieur opposé se détache sur la face (LT) arrière de façon symétrique. Sous l'effet de flexion les deux fissures se propagent en mode mixte I+II de façon croisée vers le centre de l'éprouvette dans une direction inclinée par rapport à la direction des fibres. Les faciès de rupture sur les éprouvettes rompues forment une croix en (X).

V- Comparaison de la réponse acoustique recueillie durant les essais en flexion 4-points pour les trois essences

En flexion 4-points, le comportement des trois essences étudiées dans ce travail (Douglas, sapin pectiné et peuplier) peut toujours être divisé en trois phases. L'intensité de l'activité acoustique varie d'une phase à l'autre en fonction de l'essence.

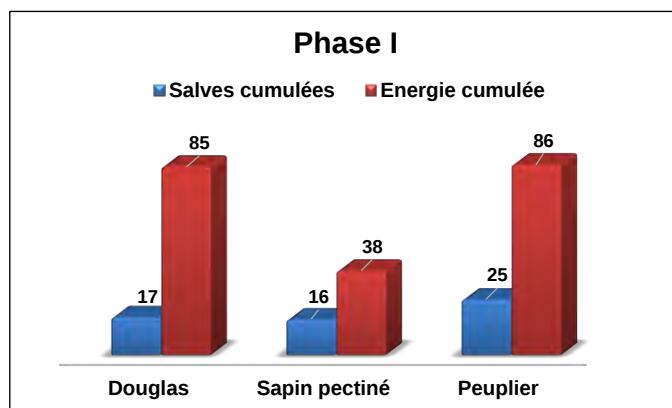
Dans la phase I qui correspond à la partie linéaire de la courbe force-déplacement, on constate que les deux résineux (Douglas et sapin pectiné) génèrent un nombre équivalent de signaux mais les signaux générés par le Douglas sont deux fois plus énergétiques que ceux générés par le sapin pectiné (figure 244a). Le peuplier génère un peu plus de signaux que les deux résineux mais à une énergie équivalente de celle du Douglas (figure 244a).

La phase II, pour toutes les trois essences, commence lorsque la courbe force-déplacement devient non-linéaire et se termine lorsque la charge atteint sa valeur maximale. Ici, le peuplier émet beaucoup plus de signaux que les deux résineux (figure 244b). Par contre, bien que le nombre de signaux générés par le peuplier soit trois fois plus élevé que celui généré par le Douglas, les deux bois libèrent une énergie quasi-équivalente. Ceci est dû au fait que le phénomène de microfissuration dans le bois de Douglas est beaucoup plus énergétique que celui dans le peuplier (figure 244b).

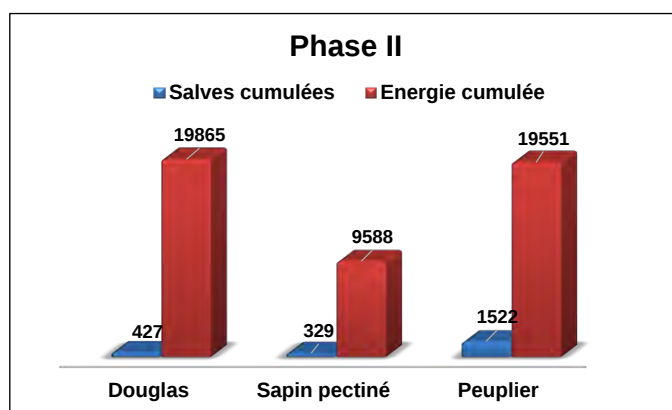
Dans la phase III, phase de rupture, le Douglas génère plus de signaux que le peuplier et que le sapin pectiné respectivement (figure 244c). Le faible nombre de salves cumulées générées par le sapin pectiné pendant son endommagement traduit la rupture instantanée de ce dernier. En revanche, le Douglas génère plus de signaux puisque son endommagement montre une rupture par étapes avant la rupture finale. Pendant sa rupture, le Douglas libère plus d'énergie que le peuplier et le sapin pectiné respectivement (figure 244c).

On constate donc que le peuplier est plus émissif que dans les autres essais (traction et compression). Ceci peut être lié à l'importance de la surface de fissure (notion de la nouvelle surface créée). Cette activité importante de peuplier est particulièrement notable dans les

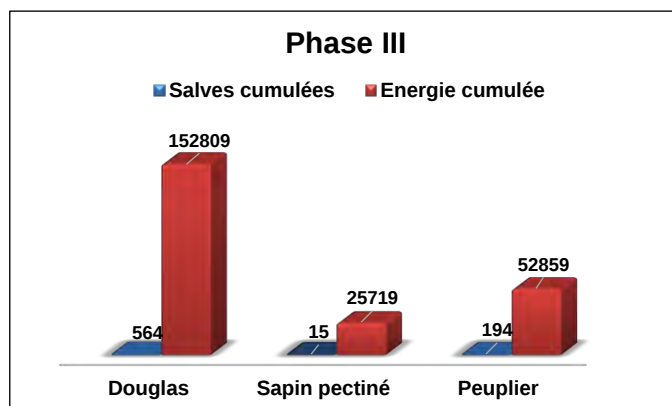
phases I et II alors qu'en phase III le Douglas reste l'essence la plus émissive ce qui s'explique par l'importance de son endommagement macroscopique.



(a)



(b)



(c)

Figure 244 : Comparaison entre les réponses acoustiques des trois essences étudiées pendant les trois phases de chargement (a) phase I, (b) phase II et (c) phase III

Concernant la classification, la logique suivie dans cette étude basée sur les critères de validation statistiques, n'a pas donné le même nombre de classes pour les trois essences. De plus, les indices utilisés dans cette étude (observations post-mortem, vidéos) pour proposer une labellisation aux différentes classes identifiées pour les trois essences ne permet de comparer que la classe rouge qui contient généralement les signaux générés par la rupture des fibres pour les deux résineux (Douglas et sapin pectiné). Cette classe est caractérisée pour les

deux essences résineuses par un temps de montée important, une longue durée, une énergie absolue très élevée et un pic fréquentiel faible (inférieur à 50 kHz).

VI- Comparaison de la réponse acoustique recueillie en flexion, traction et compression

En comparant l'évolution de l'activité acoustique en fonction du temps des trois essences étudiées sous les trois types de sollicitation, on peut constater que pour une essence de bois donnée sollicitée en traction ou en flexion, l'activité acoustique évolue de la même manière. En effet, que ce soit en traction ou en flexion, la partie linéaire de la courbe force-déplacement est caractérisée par une faible activité acoustique pour les trois bois. Ensuite, dans la phase II comprise entre la fin du comportement linéaire et la rupture finale de l'éprouvette, l'activité acoustique subit une augmentation et des bruits audibles peuvent être entendus au cours de cette phase pour les trois essences que ce soit en traction ou en flexion. La rupture finale est caractérisée par une intensification de l'activité acoustique pour les trois essences en traction et en flexion. Une multiplicité des sources énergétiques ainsi qu'un spectre large d'amplitudes variant entre 35dB et 99 dB sont observés dans la phase de rupture pour les trois bois que ce soit en traction ou en flexion. Quant à la compression, l'activité acoustique montre une évolution différente qui dépend fortement du type d'essence étudiée. Donc, on pourrait dire que l'endommagement du bois en flexion est piloté généralement par les mécanismes identifiés en traction.

En outre, le nombre de salves cumulées dépend du type de bois et du type de sollicitation (figure 245). En traction longitudinale, le bois de Douglas émet plus de signaux que le bois de sapin pectiné et que le bois de peuplier respectivement (figure 245). Cette différence est liée à la structure et à la différence de proportion entre le BI et le BF selon les travaux d'Ansell (1982) qui a montré que plus les cernes de croissance sont marqués plus le bois émet des signaux d'EA en traction longitudinale. Par contre, dans notre étude, cette constatation n'est pas validée pour le cas de la compression parallèle et de la flexion. En effet, en compression le Douglas génère plus de signaux que le peuplier et le sapin pectiné respectivement tandis qu'en flexion c'est le peuplier qui génère la majorité de signaux suivi par le Douglas et ensuite le sapin pectiné (figure 245). Cette comparaison doit être considérée avec précaution puisque les géométries des éprouvettes dans les trois essais ne sont pas les mêmes ainsi que les capteurs sont situés à des distances différentes par rapport à l'endommagement.

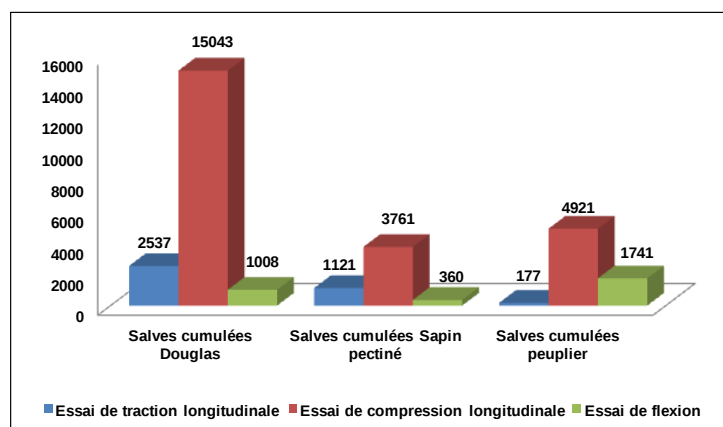


Figure 245 : Comparaison entre le nombre de salves cumulées pendant les trois essais pour les trois essences de bois étudiées

En ce qui concerne la classification des signaux, la classe attribuée à la rupture des fibres pour les trois types de bois sous les trois types de sollicitation possède une signature acoustique caractérisée par un temps de montée important, une longue durée, une énergie très importante, une amplitude moyenne ainsi qu'un pic fréquentiel faible (généralement inférieur à 50 kHz). Par contre les valeurs moyennes de chaque descripteur appartenant à cette classe dépendent de l'essence et du type de sollicitation. Par exemple, la rupture des fibres en compression est beaucoup moins énergétique que la rupture des fibres en traction et en flexion. Pour les deux résineux, la classe de rupture de fibres en traction et en flexion possèdent une signature acoustique quasi-identique. Pour le peuplier, les valeurs des descripteurs de la classe de rupture de fibres sont un peu plus élevées en traction que les deux résineux. Il est intéressant de rappeler que cette comparaison doit être considérée avec précaution puisque les géométries des éprouvettes dans les trois essais ne sont pas les mêmes ainsi que les capteurs sont situés à des distances différentes par rapport à l'endommagement.

Pour les classes attribuées aux mécanismes de microfissurations, que ce soit longitudinales ou transversales, il est plus facile de les différencier pour un bois hétérogène que pour un bois à structure homogène sous les différentes sollicitations. En général, ces deux groupes peuvent être différenciés au niveau du pic fréquentiel. Dans la majorité des cas la microfissuration longitudinale se situe à des fréquences plus faibles (<50 kHz) tandis que la microfissuration transversale se situe à des fréquences plus hautes (> 80 kHz).

VII- Conclusion

Ce dernier chapitre avait comme objectif d'étudier la réponse acoustique de trois essences de bois sollicitées en flexion quatre points et de l'associer à des mécanismes d'endommagement. Les résultats ont montré que cette réponse dépend fortement de l'essence étudiée.

L'analyse par la méthode de reconnaissance de forme a permis de distinguer trois classes de signaux pour le bois de Douglas et deux classes de signaux pour le sapin pectiné et pour le peuplier. Une attribution de ces différentes classes a été proposée en se basant principalement sur des observations visuelles réalisées pendant les essais (les films enregistrés) et post-mortem (faciès de rupture). La classe attribuée à la rupture des fibres contient des signaux dont la signature acoustique est proche pour les deux essences résineuses. La dissociation de la microfissuration longitudinale et de la microfissuration transversale est en effet possible dans un bois hétérogène qui présente des cernes de croissance marqués. Dans un bois homogène comme le peuplier, les mécanismes d'endommagement tels que la microfissuration longitudinale et transversale, ainsi que la rupture des fibres sont mélangés dans la même classe de signaux acoustiques.

De plus, il est à noter que la réponse acoustique des trois essences en flexion est proche de celle recueillie en traction même si le niveau d'endommagement causé par le même mécanisme est différent pendant l'essai de traction et celui de flexion. Bien que pour une essence de bois donnée, la résistance apparente mesurée par les essais de traction soit très supérieure à celle mesurée en compression, l'endommagement s'amorce toujours dans la partie la plus tendue de la poutre en flexion. Les mécanismes d'endommagement particuliers en compression, tels que le micro-flambement au niveau de l'interface fibre/rayon et la formation de la bande de cisaillement ne sont pas possibles dans un essai de flexion autour de l'axe R. Il devrait être prudent d'utiliser la résistance mesurée par un essai de compression dans le sens du fil dans un calcul de structures en bois, surtout dans le cas où l'état de contrainte en compression longitudinale présente un gradient de contrainte.

Il est toujours intéressant de rappeler que toutes ces conclusions restent à vérifier par des études complémentaires et plus approfondies puisqu'elles sont proposées sur les premières observations et les premières exploitations des résultats obtenues dans cette étude.

Conclusion générale

Ce travail de thèse s'inscrit dans l'optique d'assurer la fiabilité des structures en bois par l'utilisation de la technique d'émission acoustique. Le choix de cette méthode pour le suivi et la détection des mécanismes d'endommagement des structures en bois s'est imposé grâce à sa capacité à détecter des défauts évolutifs de manière précoce. Si l'objectif affiché est l'utilisation de l'émission acoustique pour la surveillance des structures, un passage par des manipulations en laboratoire a été indispensable pour valider les protocoles de mise en place.

Ce travail de recherche s'est focalisé donc sur le suivi par EA de l'endommagement du matériau bois. Trois essences, Douglas, sapin pectiné et peuplier, dont la structure anatomique est différente, sont étudiées sous trois types de sollicitation, telles que la traction longitudinale, la compression longitudinale et la flexion quatre-points. Comme la technique de l'EA est peu utilisée dans le matériau bois, sa mise en place a nécessité une étude préliminaire. Les résultats ont montré que les capteurs de faibles fréquences (fréquence inférieure à 100 kHz) sont les plus appropriés pour le suivi de l'endommagement du matériau bois.

En outre, il est montré que l'activité acoustique dépend de l'essence de bois et du type de sollicitation. En effet, en traction et en compression longitudinale, il est montré que le bois de Douglas qui présente une structure hétérogène avec des cernes de croissance bien marqués, génère beaucoup plus de signaux que le bois qui présente une structure intermédiaire (sapin pectiné) ou le bois ayant une structure homogène (peuplier). Si l'on compare les deux derniers bois, le sapin pectiné a émis plus de signaux que le peuplier en traction, mais le peuplier a émis plus de signaux que le sapin pectiné en compression. En revanche, cette constatation n'est pas valable pour les essais de flexion. En effet, le peuplier génère plus de signaux que le Douglas et celui-ci génère plus de signaux que le sapin pectiné en flexion. On peut classer les trois essences selon leur nombre de salves cumulées ainsi :

En traction : Douglas > sapin pectiné > peuplier

En compression : Douglas > peuplier > sapin pectiné

En flexion : peuplier > Douglas > sapin pectiné

Nous avons aussi constaté que le bois feuillu homogène comme celui du peuplier reste silencieux au début du chargement dans les trois types d'essais contrairement aux deux résineux qui commencent à émettre des signaux à faibles taux de charge.

Les résultats ont aussi montré le potentiel de l'EA pour la détection précoce des endommagements dans le matériau bois avant même les autres méthodes de contrôle non-destructif telle que la thermographie infrarouge. En outre, la technique d'EA est capable de détecter une dégradation importante au sein du bois caractérisée par des événements de très haute amplitude et de très haute énergie, même si cet endommagement n'est pas visible sur la surface du matériau. Donc son application à moyen terme sur les structures en bois permettra de préparer des actions de maintenance et d'éviter les situations catastrophiques.

L'analyse statistique multi-variables utilisant la méthode des k-moyennes a permis de regrouper les signaux d'EA recueillis pendant l'endommagement du matériau bois dans différentes classes. Le nombre optimal de classes est validé par deux critères statistiques couramment utilisés dans la littérature principalement pour les matériaux composites. Trois classes de signaux sont identifiées pour les trois essences sollicitées en traction parallèle au fil. Ces classes sont attribuées à la microfissuration longitudinale, la microfissuration transversale et à la rupture des fibres. Dans le cas de la compression parallèle au fil, pour les trois essences, outre les mécanismes évoqués en traction, une classe supplémentaire a été

identifiée, qui traduit le phénomène de frottement entre les appuis et les extrémités de l'éprouvette. Il est intéressant de noter que les mêmes mécanismes d'endommagement n'émettent pas le même type de signaux malgré leur classement dans la même classe de signaux. Par exemple la microfissuration longitudinale générée par le cisaillement ne donne pas forcément le même signal que la microfissuration longitudinale provoquée par le micro-flambement. En ce qui concerne la flexion autour de l'axe R, on retrouve chez le Douglas et le sapin pectiné, les mêmes mécanismes observés en traction avec également une signature acoustique proche des signatures enregistrées en traction, tandis que pour le peuplier les différents mécanismes sont mélangés dans la même classe de signaux. Il est donc difficile pour un bois homogène de différencier les mécanismes d'endommagement par un classement statistique multi-variables.

Finalement lorsque l'on corrèle les observations visuelles au cours des essais avec les observations post-mortem, l'attribution des différentes classes de signaux identifiées à des mécanismes d'endommagement particuliers permet d'établir les scénarios d'endommagement ainsi que la chronologie des différents mécanismes dans les trois essences sous différents types de sollicitation.

Perspectives

Les premières conclusions présentées ci-dessus sont basées sur des analyses de résultats relativement limités, elles restent donc à vérifier. Les informations obtenues dans cette étude sont de volume très important, dont l'exploitation vient de commencer et est loin d'être terminée. Par ailleurs, le fait de travailler avec trois types de sollicitation sur trois essences de bois de structure différente ouvre un champ large, qui nous permet non seulement de comparer leur comportement mécanique de façon à comprendre l'influence de divers facteurs, mais également de proposer les pistes les plus intéressantes pour de futurs travaux.

En effet, à travers cette étude, les résultats obtenus montrent le potentiel de l'EA pour la détection de l'endommagement dans le matériau bois. Néanmoins la validation des différents résultats, surtout l'attribution des classes à des mécanismes d'endommagement spécifiques, nécessite une analyse approfondie des signaux recueillis au cours des essais. Il serait donc intéressant de réaliser des essais permettant d'isoler un mécanisme d'endommagement afin d'identifier le signal acoustique associé et faciliter l'attribution des classes. De plus, on peut aussi provoquer le même mécanisme d'endommagement dans un matériau sous différentes sortes de contraintes dans le but de voir la différence sur la signature acoustique. Les essais arrêtés spéciaux sont une autre piste pour identifier un type d'endommagement dans la microstructure du matériau bois par une observation tomographique à une échelle fine. Le microscope électronique à balayage (MEB) est aussi un outil d'observation intéressant, qui permet de rentrer dans le détail de la structure anatomique du bois. Le type d'analyse est indispensable si l'on vise à expliquer le comportement mécanique du bois.

En outre, au niveau de l'analyse statistique multi-variables des signaux acoustiques utilisée dans cette étude, la méthode des k-moyennes ainsi que les critères statistiques pour valider le nombre de classes ont donné des résultats intéressants principalement pour les matériaux composites. L'efficacité de l'application de ces méthodes aux matériaux bois reste à discuter. Étant donné que pour un bois homogène comme le peuplier il est difficile d'isoler les différents mécanismes dans des classes séparées, il sera intéressant donc de travailler sur le développement d'algorithmes de classification spécifiques pour le matériau bois.

Au niveau de l'instrumentation des essais, les techniques devraient être encore développées. Comme remarques générales sur les essais réalisés, il serait plus intéressant de mettre des caméras sur les différentes faces de l'éprouvette afin de tirer plus d'informations.

Finalement, les essais mécaniques de traction, compression et de flexion peuvent aussi être réalisés dans des directions différentes. Les essais de fissuration sont également intéressants à effectuer puisqu'ils permettent de générer un seul mécanisme d'endommagement dominant.

Références

- AFNOR : NF EN 1194: Structures en bois- Bois lamellé collé- Classes de résistance et détermination des valeurs caractéristiques, 1999
- AFNOR : NF B51-002 : Bois-Caractéristiques physiques et mécaniques des bois, 1942
- AFNOR : NF B51-007 : Bois-Essais de compression axiale, 1985
- AFNOR : NF B51-008 : Bois-Essais de flexion statique-Détermination de la résistance à la flexion statique de petites éprouvettes sans défaut, 1987
- AFNOR : NF B51-016 : Bois-Flexion statique-Détermination du module d'élasticité en flexion statique de petites éprouvettes sans défaut, 1987
- AFNOR : NF B51-017 : Bois-Traction parallèle aux fibres-Détermination de la résistance à la rupture en traction parallèle au fil du bois de petites éprouvettes sans défaut, 1988
- AFNOR : NF EN 335-1 : Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Définition des classes d'emploi - Partie 1 : généralités, 2007
- Aicher. S, Hofflin. L, Dill-Langer. G: Damage evolution and acoustic emission of wood at tension perpendicular to fiber, *Holz als Roh und Werkstoff*, 59:104–116, 2001
- Akande. J, Hyanka, GH: Evaluation of tensile fracture in aspen using fractographic and theoretical methods, *Wood and Fiber Science*, 22(3):283-297, 1990
- Ansell. MP: Acoustic emission from softwoods in tension, *Wood Sci Technol*, 16:35–58, 1982
- Ashby. A, Gibson. LJ: Cellular solids: Structure and properties, Pergamon Press, New York, 582 pages, 1988
- Aubagnac. C, Barbier. V, Corfdir. P, Doignon. G, Joineau. JY, Le Roy. R, Wendling. JC: Recommendations pour l'inspection détaillée des ouvrages en bois, Guide technique de LCPC, 2008
- Baensch. F: Damage evolution in wood and layered wood composites monitored in situ by acoustic emission, digital image correlation and synchrotron bases tomographic microscopy, These de doctorat, ETH Zürich, 2015
- Baensch. F, Zauner. M, Sanabria. SJ, Sause MGR, Pinzer. BR, Brunner. AJ, Stampanoni. M, Niemz. P: Damage evolution in wood: synchrotron radiation micro-computed tomography (SR μ CT) as complementary tool for interpreting acoustic emission (AE) behavior, *Holzforshung*, 69(8):1015-1025, 2015
- Bailly. A, de Champs. J: Le Douglas, un choix naturel pour la construction, rapport technique, France Douglas
- Barbier. V, Joineau. JY : Panorama de 15 ouvrages d'art en bois français, Centre d'Etudes techniques de l'équipement, 2007
- Barbier.V, Berthelley. J, Calvi. D, Chazelas. JL, Corfdir. P, Jelden. S, Laplane. J, Le Roy. R: Les ponts en bois: comment assurer leur durabilité?, Guide technique de Sétra, 2006

- Bariska. M, Kucera. LJ: On the fracture morphology in wood, Part 2: Macroscopical deformations upon ultimate axial compression in wood, *Wood Science and Technology*, 19:19-34, 1985
- Barre. S, Benzeggagh. ML: On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene, *Composites Science and Technology*, 52:369-376, 1994
- Ben Mekki. O, Toutlemonde. F, Caron. JF: Testing innovative aspects of a 10m span - Composite UHPFRC carbone fibers timber bridge, *New Road Construction Concepts - Work Package 3 - Innovation in civil Engineering*, 2007
- Benabou. L: Approche pour l'étude de l'endommagement et de la rupture de matériaux dans divers domaines d'application, *Habilitation à diriger des recherches*, Université de Versailles ST-QUENTIN-EN-YVELINES, 2016
- Benabou. L: Kink band formation in wood species under compressive loading, *Experimental Mechanics*, 48:647-656, 2008
- Benmokrane. B, El-Salakawy. E, Kassem. C, Masmoudi. M: Tablier de pont en béton armé à l'aide de matériaux composites- Phase3 : application à un pont dans la municipalité Wotton Québec, *Rapport de projet*, Université de Sherbrooke Québec, 2002
- Benzeggagh. ML, Barre. S, Echalié. B, Jacquemet R : Etude de l'endommagement de matériaux composites à fibres courtes et à matrice thermoplastique, *AMAC Journées Nationales Composites*, Paris, 8 :703-714, 1992
- Berbaoui. R : Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires à base polymère, *Thèse de Doctorat*, Université du Maine, 2010
- Berthelémy. J : Les ponts en bois objets d'un nouveau guide du sétra intitulé : Comment assurer leur durabilité, 2007
- Berthelot. JM: Matériaux composites-Comportement mécanique et analyse des structures, 3^{ème} édition. Paris Editions Tech. & Doc, 1999
- Biger. J.P : Pathologie des structures en bois, techniques de l'ingénieur, 1997
- Björngrim. N: Monitoring of a timber foot bridge , thèse de doctorat, Lulea University of Technology, Skelleftea, Suède, 2015
- Blassiau. S: Modélisation de des phénomènes microstructuraux au sein d'un composite unidirectionnel carbone/époxy et prédiction de durée de vie: contrôle et qualification de réservoirs bobines, *Thèse de doctorat*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005
- Bodig. J, Jayne.B: Mechanics of wood and wood composites, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 712 pages, 1982
- Boinet. M: Anodisation plasma de métaux (Al 150, AM 60) : suivi par émission acoustique- Structure, composition et propriétés électrochimiques des revêtements obtenus, *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004
- Bordner. J, Schlag. MG, Grull. G: Fracture initiation and progress in wood specimens stressed in tension: Part I: clear wood specimens stressed parallel to the grain, *Holzforshung* 51: 479-484, 1997
- Borri. A: a method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials, *Composites: PartB*, 36: 143-153, 2005

- Boulanger. P: Nouvelles méthodes de détection et de localisations de fuites par émission acoustique, Thèse de doctorat, Université de Paris XI Orsay, 1993
- Brancheriau. L, Lanvin. JD: Recherche de moyens de contrôle non destructif permettant la découverte de criques dans les structures bois, CIRAD et FCBA, 2008
- Broniewski. T, Hola. J, Sliwinski. J: Application de la méthode d'émission acoustique aux essais du comportement du béton imprégné de polymère soumis à la compression, *Materials and structures*, 27:331-337, 1994
- Bucur, V: Acoustics of wood, Springer Series in Wood Science, Germany, 394 pages, 2006
- Burget. I, Bernasconi, A. Eckstein, D: The influence of rays in the transverse elastic anisotropy in green wood of deciduous trees, *Holzforshung*, 55: 449-454, 2001
- Canadian Wood Council: The lumber used for the manufacture of glulam, <http://cwc.ca/wood-products/glulam>, 25 Mai 2017
- Caniou. J : L'observation et le mesurage par thermographie, AFNOR, 376 pages, 1991
- Carmona. V: Etude de l'endommagement de matériaux composites par tomographie X et émission acoustique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2009
- Ceausescu-Ersen. EA : Application de la technique d'émission acoustique à la caractérisation de matériaux céramiques évolutifs, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2004
- Ceysson. O, Salvia. M, Vincent. L: Damage mechanisms characterization of carbon fiber/epoxy composite laminates by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis, *Scripta Materialia*, 34(8):1273-1280, 1996
- Chen. O, Karandikar. P, Takeda. N, Kishi. T: Acoustic emission characterization of a glass-matrix composite, *Non destructive Testing and Evaluation*, 8:869-878, 1992
- Chen. Z, Gabbitas. B, Hunt. D: Monitoring the fracture of wood in torsion using acoustic emission, *Journal of Materials Science*, 41(12):3645–3655, 2006
- Cloutier. A: Anatomie et structure du bois, Notes de cours, Chapitre 1, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, 2005
- Collardet. J, Besset. J: Les bois commerciaux et leurs utilisations, H.Vial, 276 pages, 1988
- Conde. MJM, Rodríguez. C, Rubio. P, Pérez. F: Infrared Thermography Applied to Wood, *Research in Nondestructive Evaluation*, 1(23):32-45, 2012
- Côté. WA, Hanna, RB: Ultrastructural characteristics of wood fracture surfaces, *Wood Fiber Science*, 15(2):135-163, 1983
- Coutellier. D: Contribution à l'amélioration des lois de comportement pour la simulation numérique du choc sur les structures composites du domaine des transports, *Recherche Transports Sécurité*, 90:29-40, 2006
- CTBA: Etude nationale du Centre Technique du Bois et d'Ameublement sur le Chêne Sessile et le chêne Pédonculé, 2007
- Da Silva. A, Kyriakides. S: Compressive response and failure of balsa wood, *Int. J. Solids Struct.*, 44: 8685-8717, 2007
- Dagher. HJ, Kimball. TE, Shaler. SM, Beckry. AM: Effect of FRP reinforcement on low grade astern hemlock glulams. National Conference on wood transportation structures, Madison, USA, 1996

- De Groot. PJ, Wijnen. P, Janssen. R: Real time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 55:405–412, 1995
- Debaise. GR, Porter. AW, Pentoney, RE: Morphology and mechanics of wood fracture, *Mater. Res. Standard*, 6:493-499, 1966
- Dérobert. X : Techniques radars appliquées au génie civil, *Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, SI9, 2003
- Diakhate. M, Bastidas. E, Moutou-Pitti.R, Schoefs. F: Probabilistic improvement of crack propagation monitoring by using acoustic emission. *Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution*, 8: 111-118, 2017
- Didier. N, Tanis. JM : Quelques réflexions sur le bois dans les tabliers des ouvrages d'art, document technique, 2011
- Dill-Langer. G, Cruz Hildago. R, Kun. F, Moreno. Y, Aicher. S, Herrmann. HJ: Size dependency of tension strength in natural fiber composites, *Physica A*, 325: 547-560, 2003
- Dinh. AT: Comportement élastique linéaire et non linéaire du bois en relation avec sa structure, thèse de doctorat, AgroParisTech, France, 2011
- El Guerjouma. R, Baboux. JC, Ducret. D, Godin. N, Guy. P, Huguet. S, Jayet. Y, Monnier. T: Nondestructive evaluation of damage and failure of fiber reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission, *Advanced engineering materials*, 3:601-608, 2001
- Fengel. D, Wegener. G: *Wood- Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. De Gruyter, Berlin, 613 pages, 1989
- Fiorelle. J, Dias. A: Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber, *Material research*, 6: 193-202, 2003
- Foulon. A: Détermination de la signature acoustique de la corrosion des composites SVR (stratifiés verre résine), Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne, 2015
- François. P: Plasticité du bois en compression multiaxiale, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 1992
- Fruhmann. BK, Burget. I, Stanzl-Tschegg. SE: Detection of the fracture path under tensile loads through in situ tests in ESEM chamber, *Holzforschung*, 57:326-332, 2003
- Futo. L: Qualitative and quantitative determination of micro-properties of wood, *Holz Roh-Werkst*, 27(5):192-201, 1996
- Gagliardini. O : Construction bois selon l'eurocode 5, cours de L3 Génie Civil et Infrastructures, UJF-Grenoble, 2014
- Gambetta. A, Macchioni. N, martena. F et Brunetti. M: Biodegradation in wooden cultural heritages: diagnosis and new control methodologies, proceeding of An International Conference on Microbiology and Conservation, Ferenze, June 16th-19th, 1999
- Gentile. C, Svecova. D, Rizkalla. SH: Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications, *Journal of Composites for Construction*, 6(1): 11-20, 2002

- Gérard. J, Guibal. D, Paradis. S, Vernay. M, Beauchêne. J, Brancheriau. L, Thibaut. A : Tropix 7 (Version 7.5.1), CIRAD, <https://doi.org/10.18167/74726f706978>, 2011
- Ghossein. E : Le bois dans la construction. Mémoire de fin d'études, Université de Marne-La-Vallée, 2004
- Giordano. M, Calabro. A, Esposito. C, D'Amore. A, Nicolais. L: An Acoustic Emission Characterization of the Failure Modes in Polymer-Composite Materials, *Composites Science and Technology*, 58:1923–1928, 1998
- Girardon. S : Amélioration des performances mécaniques des assemblages bois sur bois vissés par préparation des interfaces, thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2014
- Godin.N, R'mili.M, Reynaud.P, Lamon.J and Fantozzi.G: Emission acoustique et endommagement des composites: Intérêts et limites des techniques de reconnaissance de forme, *Comptes-rendus des 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17)*, 2011
- Gong. M, Smith. J: Failure of softwood under static compression parallel to grain, *Journal of the institute of wood science*, 15(4): 204-210, 2000
- Grazide. C, Cointe. A, Coureau. JL, Morel. S : Résistance à la rupture en flexion du bois de structure-Influence de la position et des caractéristiques géométriques des nœuds, 21^{ème} Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, 26 au 30 aout 2013
- Grekin.M, Surini. T: Shear strength and perpendicular-to-grain tensile strength of defect-free Scots pine wood from mature stands in Finland and Sweden, *Wood Science and Technology*, 42: 75-91, 2008
- Guinez. R: SCORPION bilan de dix ans d'utilisation, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 207:79-90, 1997
- Guitard. D : Mécanique du matériau bois et composites, Editions C.E.P.A.D.U.E.S, 220 pages, 1987
- Gustafsson. A, Pousette. A, Björngrim. N: Health monitoring of timber bridges. In: *ICTB*, 2010
- Hadjab. H, Thimus .JF, Chabaat. M: Fracture process zone in notched concrete beams treated by using acoustic emission, *the online Journal of Non destructive Testing*, 12(12), 2004
- Hamdi. SE: Contribution au traitement du signal pour le contrôle de santé in-situ de structures composites-Applications au suivi de température et à l'analyse des signaux d'émission acoustique, Thèse de doctorat, Université du Maine, 2012
- Hamstad. MA, McColskey. JD: Wideband and narrowband acoustic emission waveforms from extraneous sources during fatigue of steel, *Journal of acoustic emission*, 15:1–18, 1997
- Hernandez. R, Davalos. J, Sonti. S, Kim. Y, Moody. RC: Strength and stiffness of reinforced yellow-poplar glued-laminated beams. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Product Laboratory, 1997
- Huguet. S: Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2002

- Ito. K, Enoki. M : Acquisition and analysis of continuous acoustic emission waveform for classification of damages sources in ceramic fiber mat, *Materials Transactions*, 6(48):1221-1226, 2007
- Johansson. M, Kliger. R: Variability in strength and stiffness of structural Norway spruce timber–influence of raw material parameters, Document 9.5.2 in World Conference on Timber Engineering, British Columbia, 2002
- Keith, CT: Longitudinal compressive creep and failure development in white spruce compression wood, *Wood Science*, 7: 1-12, 1974
- Keith. CT, Côté. WA: Microscopic characterization of slip lines and compression failures in wood cell walls, *Forest Prod. J.* 18(3):67-74, 1968
- Kek. T, Grum. J: Laser cutting and acoustic emission signals, in 28th European Conference on Acoustic Emission Testing, 2008
- Keller. R: La constitution du bois-Le bois, matériau d'ingénierie, Textes rassemblés par Philippe Jodin, A.R.BO.LOR., ENGREF, Nancy, 1994
- Kempf. M, Skrabala. O, Altstadt. V: Acoustic emission analysis for characterization of damage mechanisms in fiber reinforced thermosetting polyurethane and epoxy, *Composites Part B: Engineering*, 56:477-483, 2014
- Koch. J, Simon. A, Arndt. RW: Monitoring of moisture content of protected timber bridges. In: World Conference on Timber Engineering. 22-25 August, Vienna, Austria, 2016
- Kollmann. F, Krech. H: Dynamic Measurement of Damping Capacity and Elastic Properties of Wood, *Holz Roh Werkst*, 18(2):41-54, 1960
- Kolmann. FP, Côté. WA: Principles of Wood Sciences and Technology, Part I: solid wood, Springer-Verlag, New York, 1968
- Kostopoulos. V, Loutas. T; Dassios. K.G: Fracture behavior and damage mechanisms identification of SiC/glass ceramic composites using AE monitoring. *Composites Science and Technology*, 67(7–8):1740–1746, 2007
- Kotsikos. G, Evans. JT, Gibson. AG, Hale. J: Use of acoustic emission to characterize corrosion fatigue damage accumulation in glass fiber reinforced polyester laminates, *Polymer Composites*, 20:689–696, 1996.
- Kucera. LJ, Bariska. M: On the fracture morphology in wood, Part 1: A SEM-study of deformations in wood of spruce and aspen upon ultimate axial compression load, *Wood Science and Technology*, 16:241-259, 1982
- Lackner. G, Dusek. R: Semi-automatic testing of gas cylinders, in 28th European Conference on Acoustic Emission Testing, 2008
- Lacroix. S: Etude de renforcement de poutres en bois scié avec des matériaux composites, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 2000
- Lamy. F, Takarli. M, Angellier. N, Dubois. F: Acoustic emission technique for fracture analysis in wood materials. *Int J Fract* 192(1):57-70, 2015
- Lamy. F: Analyse de processus de fissuration dans le bois sous sollicitations mécanique et climatique-apports de l'émission acoustique, thèse de doctorat, Université de Limoges, 2016
- Landis, EN, Baillon. L: Experiments to relate acoustic emission energy to fracture energy of concrete, *Journal of engineering mechanics*, 128(6):698–702, 2002

- Landis. EN: Acoustic Emission in Woods, In: Grosse C., Ohtsu M. (eds) Acoustic Emission Testing. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 311-322, 2008
- Lartigau. J: Caractérisation du comportement des assemblages par goujons collés dans les structures bois, thèse de doctorat, université Bordeaux 1, 2013
- Lavisci. P: Pathologies des structures en bois –Analyse des caractéristiques physiques et mécaniques des collages structuraux pour la restauration des charpentes, thèse de doctorat, ENSTIB, 2001
- Le Gall. T: Simulation de l'émission acoustique : Aide à l'identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2016
- Le Roy. R: Ouvrages d'art en bois : Perspectives et développements en France, Présentation oral 2^{ème} journées scientifiques du GDR, Champs sur Marne, 2013
- Lopez. G, Basterra. LA, Acuna. A, Casado. M: Determination of the emissivity of wood for inspection by infrared thermography, J. Nondestruct. Eval. , 2(32): 172-176, 2013
- Loutas. TH, Kostopoulos. V: Health monitoring of carbon/carbon, woven reinforced composites. Damage assessment by using advanced signal processing techniques. Part I: Acoustic emission monitoring and damage mechanisms evolution. Composites Science and Technology, 69(2):265–272, 2009
- Lu. C, Ding. C, Chen. Zhenhua: Time-frequency analysis of acoustic emission signals generated by tension damage in CFRP, Procedia Engineering, 23:210-215, 2011
- Marec. A: Contrôle de santé des matériaux hétérogènes par émission acoustique et acoustique non linéaire-discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante, Thèse de doctorat, Université du Maine, 2008
- Martínez-Sala. R, Rodríguez-Abad. I, Diez Barra. R, Capuz-Lladró. R: Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique, Construct Build Mater, 38:903-911, 2013
- Masmoudi. S: Comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite, Thèse de Doctorat, Université du Maine et de Sfax, 2013
- Mattheck. C, Kubler. H: Wood-the internal optimization of trees, Springer-Verlag, Berlin, 129 pages, 1995
- Mbarga. M : Redimensionnement de planchers mixtes bois-béton, Projet de fin d'études, INSA de Strasbourg, 2009
- Meinlschmidt. P: Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials, 14th international Symposium of nondestructive testing of wood, Hannover , Germany, May 2nd -4th, 2005
- Miller. RB, Wiednhoeft. AC: Hand Book of Wood chemistry and Wood Composites, CRC Press, New York, 2005
- Moevus. M, Godin N, R'milli M, Rouby. D, Reynaud. P, Fantozzi. G, Farizy. G: Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiCf/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile behaviours: PartII: Unsupervised acoustic emission data clustering. Composites Science and Technology, 68(6):1258-1265, 2008

- Moran. PM, Liu. XH, Shih. CF: Kink band formation and band broadening in fiber composites under compressive loading. *Acta Metall Mater* 43(8):2943–2958, 1995
- Muller, W: Timber girder inspection using ground penetrating radar, in INDTC international conference, 2003
- Munoz. VA: Identification de mécanismes d'endommagement de stratifiés carbone-époxyde par couplage de l'émission acoustique et de la thermographie infrarouge, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2015
- Navi. P, Heger. F : Comportement thermo-hydromécanique du bois-Applications technologiques et dans les structures, Presses polytechniques et universitaires romandes, 298 pages, 2005
- Nguyen Trung. V.A : Multi-renforcement du bois lamellé collé-étude théorique et expérimentale, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2010
- Nielsen. A: Acoustic emission source based on pencil lead breaking, volume 80, *Svejecentralen*, 1980
- Ogawa. H: Architectural application of carbon fibers, development of new carbon fiber reinforced glulam. *Carbon*, 38:211-226, 2000
- Oskouei. AR, Ahmadi. M, Hajikhani. M: Wavelet-based acoustic emission characterization of damage mechanism in composites material under mode I delamination at different interfaces, *Express polymer letters*, 12(3):804-813, 2009
- Ostrowski. C: Auscultation des ouvrages en béton par thermographie infrarouge active et passive, Thèse de doctorat, Université d'Artois et université de Sherbrooke, 2005
- Otsuka. K, Date. H: Fracture process zone in concrete tension specimen, *Engineering Fracture Mechanics*, 65:111-131, 2000
- Outahyon. A : Influences de paramètres d'usinage et de stockage sur les propriétés fonctionnelles des surfaces de bois de Douglas, thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2008
- Ozden. S, Ennos. AR, Cattaneo. MEGV: Transverse fracture properties of green wood and the anatomy of six temperate tree species, *Forestry (Lond)*, 90 (1): 58-69, 2016
- Papas.YZ, Kostopoulos.V: Toughness characterization and acoustic emission monitoring of 2D carbon/carbon, *Engineering fracture mechanics*, 68:1557-1573, 2001
- Passas. R: Caractérisation de la morphologie des fibres de bois, cours en ligne, INP Grenoble, 2008
- Peix. G, Duvauchelle. P, Freud. N "General principle," in *X-Ray Tomography in Material Science*, H. S. Publication, Ed., pp. 15-26, 2000
- Perrin. M: Étude et caractérisation par émission acoustique et mesures électrochimiques de la fragilisation par l'hydrogène des câbles de précontrainte. Application aux ouvrages d'art, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2009
- Pignolet. O : Optimisation de la durabilité de bois d'œuvre (classe d'emploi 4) à l'aide d'anhydrides alkényles succiniques d'origine végétale, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008
- Pluvillage.G : La rupture du bois et ses composites, Cépaduès-Editions ISBN 2.85428.292.2.CA-46, Melbourne, 1992

- Poulsen. JS: Compression in clear wood, Thèse de doctorat, Technical university of Denmark, 1997
- Ramirez-Jimenez. CR, Papadakis. N, Reynolds. N, Gan. TH, Purnell, Pharaoh. M: Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event, *Compos. Sci. Tech*, 64:1819–1827, 2004
- Reiterer. A, Stanzl-Tschegg. SE, Tschegg. EK: Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood. *Wood Science and Technology* 34:417-430, 2000
- Reiterer. A, Sinn. G, Stanzl-Tschegg. SE: Fracture characteristics of different wood species under mode I loading perpendicular to the grain, *Mater Sci Eng*, 332(1):29–36, 2002a
- Reiterer. A, Burgert. I, Sinn. G, Tschegg. SE: The radial reinforcement of the wood structure and its implication on mechanical and fracture mechanical properties-a comparison between two tree species, *J Mater Sci*, 37:935–940, 2002b
- Renaudin. F, Jandin, P: Design of wood-concrete composite beams under deck bridge-Theoretical developments and constructions examples, International conference of Timber Bridges, Skelleftea, Suède, 2017
- Ritschel, F, Brunner, JA, Niemz, P: Nondestructive evolution of damage accumulation in tensile test specimens made from solid wood and layered wood materials, *Composite structures*, 95:44-52, 2013
- Roget. J: Emission acoustique, *Techniques de l'ingénieur*, 1990
- Roget. J: Essais non destructifs, l'émission acoustique-Mise en œuvre et applications, AFNOR, CETIM, 1988
- Romani. M, Blaß. HJ: Design model for FRP reinforced glulam beams, International council for research and innovation in building and construction, Venice, Italy: CIB-W18, 2001
- Sakagami.H, Matsumura.J, Oda.K: In situ visualization of hardwood microcracks occurring during drying, *J. Wood. Sci.*, 55:323-328, 2009
- Saliba. J: Apport de l'émission acoustique dans la compréhension et la modélisation du couplage fluage-endommagement du béton, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2012
- Sbartai, M: Ground penetrating radar, In *Situ Assessment of Structural Timber*, Netherlands: Springer, 25-37, 2011
- Scida. D, Assarar. M, Rezek. A, Poilâne. C: Effet de l'humidité sur le comportement mécanique des composites à fibres de lin, *Comptes rendus des JNC 17*, Poitiers, 2011
- Sell. J, Kropf.F : Propriétés et caractéristiques des essences de bois, *Lignum*, 93 pages, 1990
- Shigeishi. M, S.Colombo, Broughton. KJ, Rutledge. H, Batchlor. AJ, Forde. MC: Acoustic emission to assess and monitor the integrity of bridges. *Construction and Building Materials*, 15:35–49, 2001
- Sibil. A: Comportement thermomécanique et endommagement de nouveaux réfractaires verriers à très haute teneur en zircone : investigation des mécanismes de fissuration par EBSD et émission acoustique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2012

- Sipolla, M, Fruhmann, K: In situ longitudinal tensile tests of pine wood in ESEM. *Holzforshung*, 56:669-675, 2001
- Sison. M, Duke Jr. JC, Lozev. MG, Clemena. GG: Analysis of acoustic emissions from a steel bridge hanger, *Research in non-destructive evaluation*, 10: 123–145, 1998
- Skawinski. O, P. Hulot, C.Binétruy et C. Rasche: Structural integrity evaluation of CNG composite cylinders by acoustic emission monitoring, In 28th European Conference on Acoustic Emission Testing, 2008
- Subba Rao. SV, Subramanyam. B: Analysis of acoustic emission signals using wavelet transformation technique, *Defence Science Journal*, 4(58):559-564, 2011
- Surini. T: Le plan ligneux vu au microscope, *Infoforets*, cours en ligne, <http://infoforets.free.fr>, 2007
- Thiery. C : Tomographie à rayons X, *Techniques d'ingénieur*, 2013
- Tissier. C, Gaillet. L, Bruhat. D, Michel. R, Noblet. S, Barbier. V : Les moyens d'auscultation et de surveillance : Application au viaduc de Merlebach, *Journée "CABLES2005"*, 2005
- Triboulot. P, Reitz. B : Le bois dans le contexte des matériaux de construction, manifestation « le bois : essence de l'Art », Nancy, 2000
- Trouy, MC, Triboulot, P : Matériau bois-Structure et caractéristiques, *Techniques de l'ingénieur*, 2012
- Trouy. MC: Anatomie du bois-Formation, fonctions et identifications, Quae, France, 2015
- Uenoya. T: Acoustic emission analysis on interfacial fracture of laminated fabric polymer matrix composites, *Journal of Acoustic Emission*, 13:95–102, 1995
- Varner. D, Cerny. M, Varner. M, Fajman. M: Possible sources of acoustic emission during static bending test of wood specimen, *Acta Universitatis Agriculturae Mendelianae Brunensis*, LX :199–206, 2012
- Vautrin. A, Harris. B: Acoustic emission characterization of flexural loading damage in wood, *J Mat Sci*, 22:3707–3711, 1987
- Venet. J : Identification et classement des bois français, 2e édition revue par R. Keller, ENGREF, Nancy, 1986
- Vogel. T, Köppel, S: Possibilities and limitations of acoustic emission analysis for reinforced concrete, *International Symposium, NDTE-CE Berlin*, 2003
- Vural. M, Ravichandran G: Microstructural aspects and modeling of failure in naturally occurring porous composites, *Mechanics of materials*, 35:3-6, 2003
- Wardrop. AB, Addo Ashong, FW: The anatomy and fine structure of wood in relation to its mechanical failure, *Wood Science and Technology*, 20:1-31, 1982
- Wu. K, Chen. B, Yao. W: Study of the influence of aggregate size distribution on mechanical properties of concrete by acoustic emission technique, *Cement & Concrete Research*, 31:919-923, 2001
- Wu. Y, Shao. ZP, Wang, F: Acoustic emission characteristics and felicity effect of wood fracture perpendicular to the grain, *Journal of tropical forest science*, 26 (4): 522-531, 2014

- Wyckhuyse. A, Maldague. X: A Study of Wood Inspection by Infrared Thermography, Part I: Wood Pole Inspection by Infrared Thermography, Research in Nondestructive Evaluation, 1(13):1-12, 2001
- Zauner. M: In-situ synchrotron based tomographic microscopy of uniaxially loaded wood In-situ testing device, procedures and experimental investigations, Thèse de doctorat, Université ETH Zurich, 2014
- Zhang. T: Imagerie multi-résolution par tomographie aux rayons X : application à la tomographie locale en sciences des matériaux, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2012
- Zheng. C, Gabbitas. B, Hunt. D: A thermal imaging technique for studying crack development in wood under torsional loading, Journal of Materials Science, 40:1929-1935, 2005

Annexe 1

Les paramètres d'une salve acoustique sont :

- **Le nombre de coups:** représente le nombre de fois où le seuil est dépassé par le signal pendant la durée d'une salve.
- **La durée d'une salve:** c'est le temps écoulé entre le premier et le dernier dépassement du seuil. Elle est exprimée généralement en microsecondes.
- **L'amplitude du signal:** représente la plus grande amplitude atteinte pendant la durée de la salve. Elle est exprimée en dB.
- **Le temps de montée:** c'est le temps écoulé entre le premier franchissement du seuil l'amplitude maximale. Il est exprimé en microsecondes.
- **Le nombre de coups au pic:** c'est le nombre de franchissement de seuil entre le déclenchement de la salve et l'amplitude maximale.
- **L'énergie de la salve:** représente l'énergie générée par un événement au sein du matériau testé. Elle est exprimée en $\mu\text{J} = 10^{-6} \text{ J}$.
- **La fréquence moyenne du signal:** représente le nombre de coups de la salve divisé par sa durée (cette fréquence est donnée par la majorité des systèmes d'acquisition et elle ne correspond pas à la transformée de Fourier du signal).
- **La fréquence initiale:** c'est la fréquence d'initiation. Elle représente le rapport entre le nombre de coups de la phase d'initiation et sa durée.
- **La fréquence de réverbération :** c'est la fréquence de décroissance de la salve. Elle représente le rapport entre le nombre de coups et la décroissance de sa durée
- **La fréquence centroïde :** c'est le barycentre fréquentiel de la salve
- **Le pic fréquentiel :** c'est la fréquence au maximum du pic de la transformée de Fourier
- **ASL:** c'est la tension efficace en dB
- **RMS:** c'est la tension efficace en Volt

Annexe 2

Caractéristiques des échantillons testés

Eprouvettes de traction :

Douglas	Longueur de la partie calibrée (mm)	Largeur de la partie calibrée (mm)	Epaisseur de la partie calibrée (mm)
TD1	90,00	20,01	4,05
TD2	90,00	20,00	4,02
TD3	90,00	20,03	4,03
TD4	90,00	20,07	4,03
TD5	90,00	2,05	4,05

Sapin pectiné	Longueur de la partie calibrée (mm)	Largeur de la partie calibrée (mm)	Epaisseur de la partie calibrée (mm)
TS1	90,01	19,99	4,00
TS2	90,01	19,99	4,01
TS3	90,05	20,00	4,01
TS4	90,03	20,05	4,03
TS5	90,03	20,03	4,01

Peuplier	Longueur de la partie calibrée (mm)	Largeur de la partie calibrée (mm)	Epaisseur de la partie calibrée (mm)
TP1	90,00	20,03	4,01
TP2	90,02	20,03	4,01
TP3	90,02	20,05	4,00
TP4	90,05	20,03	4,05
TP5	90,05	20,07	4,01

Eprouvettes de compression :

Douglas	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
CD1	60,05	20,02	20,00
CD2	60,49	20,06	20,00
CD3	60,55	20,07	20,05
CD4	60,55	20,07	20,05
CD5	60,51	20,06	20,05

Sapin pectiné	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
CS1	60,21	20,05	19,99
CS2	60,20	20,09	19,99
CS3	60,30	20,06	20,03
CS4	60,35	20,07	19,94
CS5	60,24	20,06	19,92

Peuplier	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
CP1	60,60	20,06	19,95
CP2	60,55	20,08	19,97
CP3	60,60	20,09	19,99
CP4	60,68	20,12	20,00
CP5	60,60	20,13	20,04

Eprouvettes de flexion :

Douglas	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Masse volumique (kg/m³)
FD1	360	20,27	20,14	530,30
FD2	360	20,07	20,03	479,35
FD3	360	20,15	20,05	507,19
FD4	360	20,16	20,06	489,18
FD5	360	20,14	20,04	487,12

Sapin pectiné	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Masse volumique (kg/m³)
FS1	360	20,00	19,88	447,70
FS2	360	19,96	19,96	400,25
FS3	360	20,00	19,84	407,93
FS4	360	20,03	19,84	406,55
FS5	360	20,00	19,87	459,24

Peuplier	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Masse volumique (kg/m³)
FP1	360	20,10	20,10	405,65
FP2	360	20,20	20,35	414,80
FP3	360	20,21	20,32	419,06
FP4	360	20,19	20,18	400,60
FP5	360	20,19	20,25	400,44

Annexe 3

Courbes de sensibilité des capteurs d'émission acoustique

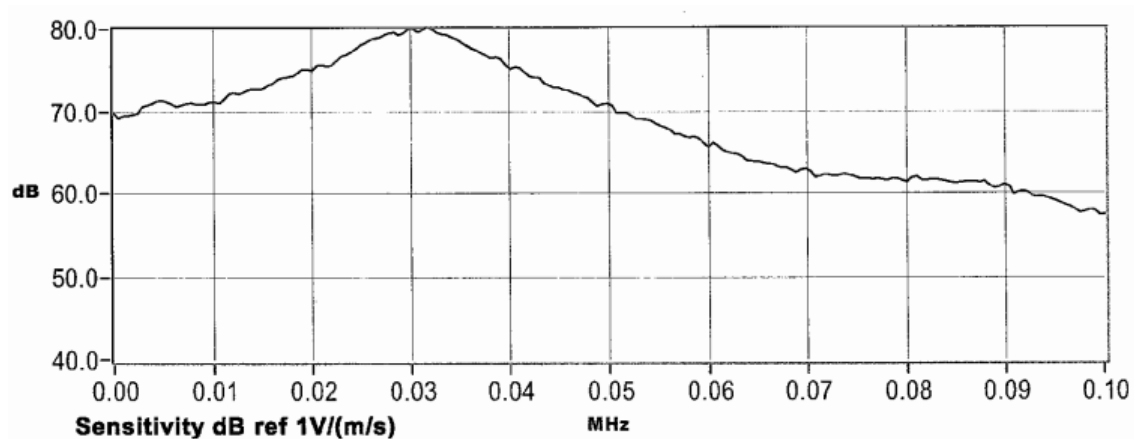


Figure A : Sensibilité du capteur R3 α

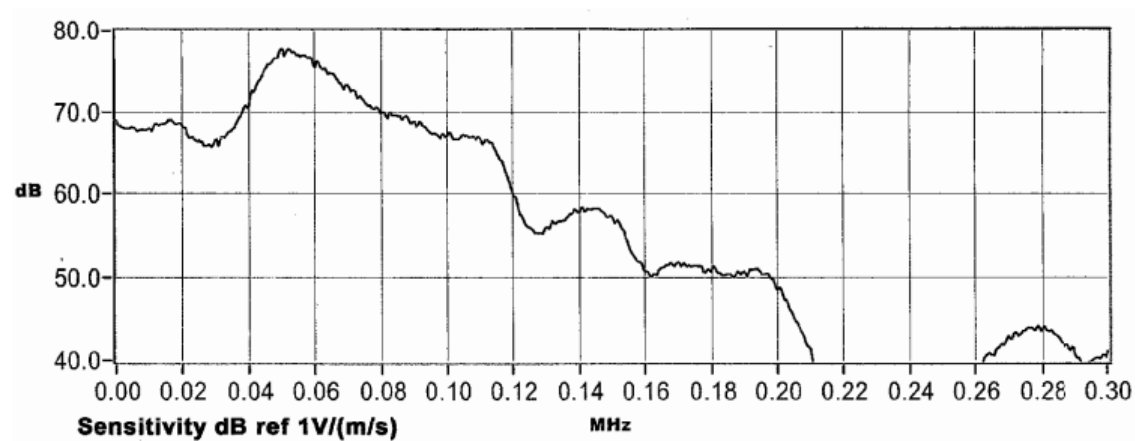


Figure B : Sensibilité du capteur R6 α

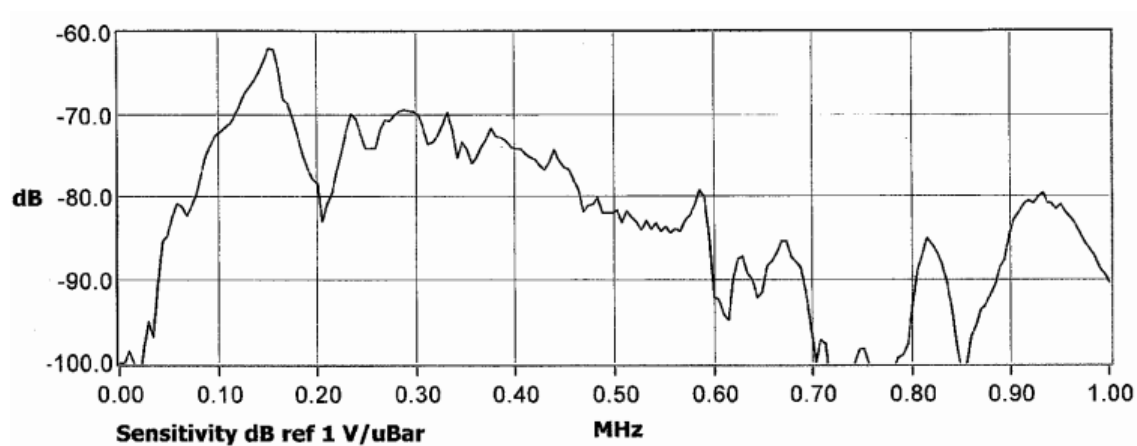


Figure C : Sensibilité du capteur R15 α

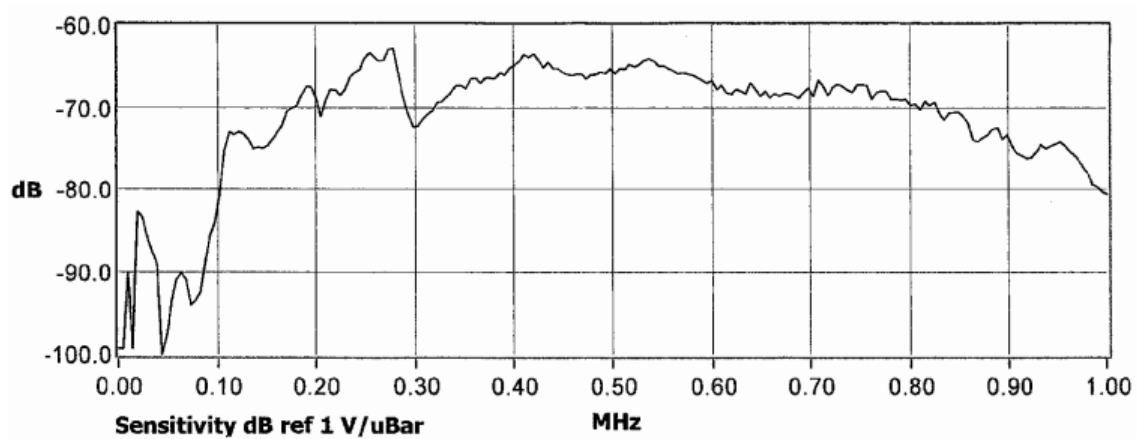


Figure D : Sensibilité du capteur WD

Annexe 4

Etapes de la classification

La classification des données d'émission acoustique enregistrées lors des essais de traction, compression et flexion est réalisée à l'aide du logiciel Noesis (développé par Enviroacoustics SA, 2011). Le logiciel Noesis propose plusieurs algorithmes pour la reconnaissance de forme (k-means, max-min distance, forgy, cluster seeking, isodata). La performance de ces algorithmes a été étudiée et le meilleur résultat est obtenu avec la méthode des k-moyennes (k-means).

Avant de réaliser la classification à l'aide de l'algorithme choisi, plusieurs étapes ont été suivies :

1- Sélection des descripteurs (paramètres de salves)

Chaque signal acoustique est caractérisé par plusieurs paramètres appelés aussi descripteurs qui peuvent être extraits par analyse temporelle ou fréquentielle. Une étude de corrélation peut permettre de limiter le nombre de ces descripteurs. Dans la littérature, pour le cas des matériaux composites, plusieurs auteurs (Huguet 2002, Marec 2008, Godin et al. 2011) ont travaillé sur la sélection d'un nombre minimal de descripteurs afin de ne pas alourdir les calculs des algorithmes utilisés. Cependant, l'optimisation du nombre de paramètres n'est pas l'objectif de cette étude. Le traitement statistique multi-variables a donc été réalisé avec les onze paramètres temporels et fréquentiels mentionnés dans le Tableau A.

Tableau A : Descripteurs utilisés pour la classification des signaux

Paramètres temporels	Paramètres fréquentiels
Temps de montée (μ s)	Barycentre fréquentiel (kHz)
Nombre de coups	Fréquence initiale (kHz)
Nombre de coups au pic	Fréquence de réverbération (kHz)
Energie absolue (aJ)	Pic fréquentiel (kHz)
Durée (μ s)	
Amplitude (dB)	
Fréquence moyenne (kHz)*	

* La fréquence moyenne est le rapport entre le nombre d'alternances et la durée, donc elle est plutôt considérée comme un paramètre temporel. Les autres paramètres fréquentiels sont calculés à partir de la Transformée de Fourier.

2- Normalisation des descripteurs

Afin de limiter le poids de certains paramètres (exemple les amplitudes vont de 0 à 99dB alors que l'énergie absolue va de 4 à 5000), une normalisation des données entre 0 et 1 est réalisée. Cette étape permet donc d'annuler le poids des paramètres de grandes valeurs.

3- Analyse en composante principale (ACP)

Une analyse en composante principale est ensuite réalisée afin d'améliorer la visualisation des résultats de la classification obtenus par la méthode des k-moyennes en diminuant le nombre de dimensions de l'espace orthogonal.

4- Classification des données avec l'algorithme des k-moyennes

L'algorithme des k-moyennes est un algorithme de classification non-supervisée qui fonctionne selon plusieurs étapes (Huguet 2002, Foulon 2015) :

- a- Choix du nombre k de classes (le choix est parfois aléatoire si on ne connaît pas le nombre de classes à priori)
- b- Initialisation des centres des k-classes de façon aléatoire (figure E-1)
- c- 1^{ère} itération : Calcul de la distance euclidienne entre chaque vecteur et les différents centres des classes et attribution des vecteurs à la classe pour laquelle la distance euclidienne est la plus petite (figure E-2)
- d- Evaluation des nouveaux centres des classes à la fin de la 1^{ère} itération (figure E-3).
- e- 2^{ème} itération : Calcul de la distance euclidienne entre chaque vecteur et les nouveaux centres des classes. Une nouvelle attribution des vecteurs à la classe pour laquelle la distance euclidienne est la plus petite est opérée (figure E-4).
- f- Evaluation des nouveaux centres des classes à la fin de la 2^{ème} itération (figure E-5).
- g- L'algorithme converge et la procédure se termine une fois que les centres des classes sont stables.

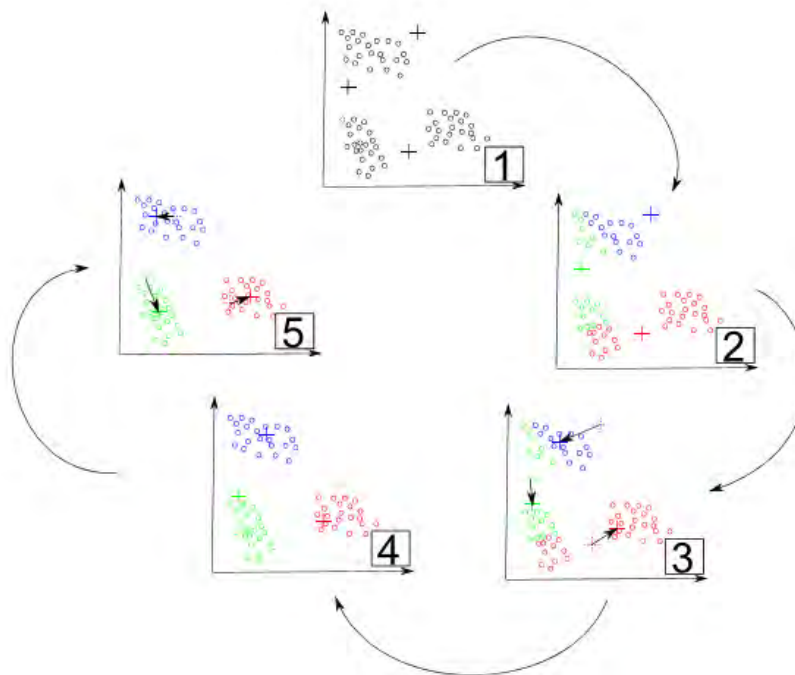


Figure E : Etapes de fonctionnement de l'algorithme k-moyennes (d'après Foulon 2015)

Le paramétrage de cet algorithme sur Noesis nécessite le choix du type de distance. Une distance euclidienne est sélectionnée. Ensuite on a choisit une initialisation des centres des k-classes de façon aléatoire et un nombre d'itérations égales à 100. Comme on ne connaît pas au préalable le nombre de classes, une variation de ce dernier entre 2 et 5 classes a été choisie. Pour valider le nombre de classes optimal, nous nous sommes basés sur des critères de validation proposés par Noesis qui sont le critère de Davies et Bouldin et le critère Tou.

5- Validation du nombre des classes

Le logiciel Noesis possède des critères statistiques qui peuvent permettre d'aider à la validation du nombre de classes. Statistiquement le nombre de classes optimal est celui qui

minimise le coefficient de Davies et Bouldin (D&B) et maximise le coefficient Tou (Huguet 2002, Godin et al. 2011, Hamdi 2012). Ces deux critères sont définis comme suit :

$$D\&B = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^n \max\left(\frac{d_i + d_j}{d_{ij}}\right)$$

Avec K : le nombre de classes, d_i : la distance moyenne à l'intérieur de la classe i, d_j : la distance moyenne à l'intérieur de la classe j, d_{ij} : la distance moyenne entre les classes i et j.

$$Tou = \frac{\min(D_{ij})}{\max(D_k)} \quad i, j, k = 1, \dots, C$$

Avec D_{ij} : la distance minimale entre les classes i et j et D_k : la distance maximale à l'intérieur d'une classe k.

Ces critères ont été utilisés pour chaque classification. Nous discuterons de la validité de ces critères statistiques lors de l'analyse des classements multiparamétriques dans les chapitres 3, 4 et 5.

Titre : Contribution au suivi par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois

Résumé : Aujourd'hui les structures multi-matériaux à base de bois sont en plein essor. Ces structures mixtes sont à la fois originales et mécaniquement prometteuses. En revanche, leur utilisation est encore récente. Cela se traduit par une certaine méconnaissance de leur comportement et notamment vis-à-vis de la présence des endommagements pouvant conduire à la dégradation de leurs propriétés mécaniques. Dans ce cadre, l'émission acoustique peut être une alternative pour l'inspection et le contrôle de ces structures.

Afin de caractériser l'évolution de l'endommagement dans les structures multi-matériaux, il est indispensable de commencer par la caractérisation de l'endommagement de chaque matériau isolé. Le travail de recherche présenté dans ce document porte donc sur la caractérisation par émission acoustique de l'endommagement du matériau principal de la structure qui est le matériau bois. L'une des difficultés associée à son suivi par émission acoustique tient en particulier à la variation de sa réponse acoustique selon la structure du matériau, le type d'essence et la sollicitation appliquée.

Dans cette étude, à partir de trois types d'essais mécaniques normalisés (traction, compression et flexion), l'endommagement de trois essences de bois (Douglas, sapin pectiné et peuplier) a été caractérisé par la technique d'émission acoustique. Les résultats obtenus montrent que l'émission acoustique est une technique performante pour la détection précoce de l'endommagement du matériau bois. Elle permet également d'affiner les scénarios d'endommagement et de différencier les signatures acoustiques des différents mécanismes par le biais d'algorithmes de reconnaissance de forme. En outre, les résultats obtenus ont vérifiés que la réponse acoustique est dépendante de l'essence et du type de sollicitation.

Mots clefs : Bois, émission acoustique, endommagement, mécanismes d'endommagement, traction, compression, flexion

Title: Contribution of acoustic emission technique for monitoring damage of wood-based multi-material structures

Abstract: The application of wood-concrete-composite hybrid materials in a mechanical structure is increasing day after day. These multi-material structures are both original and mechanically promising. Nevertheless, their use is still recent. This results are in a certain lack of knowledge about their behavior and in particular with regard to the presence of damage which may lead to the degradation of their mechanical properties. In this context, acoustic emission (AE) may be an appropriate non destructive method for the inspection and control of these structures.

In order to characterize the evolution of damage in multi-material structures, it is essential to characterize the damage of each constituent material. This work presents the first part of the project for assessment of hybrid structures. It concerns the characterization by acoustic emission of the damage of wood material. One of the difficulties associated with acoustic emission monitoring of wood is the variability and the complexities in its response, because the AE response depends on the structure of the wood specie and the loading condition.

In this study, under different mechanical loading (standard tensile, compression and bending tests), damage of three wood species (Douglas fir, Silver fir and poplar) is characterized by the technique of acoustic emission. Results obtained show that the acoustic emission is efficient for the early detection of the damage of the wood material. It also allows to refine the damage scenarios and to differentiate the acoustic signatures of different mechanisms by means of unsupervised pattern recognition algorithms. Moreover, the results confirm that the acoustic response is dependent on the wood specie but also on the loading condition.

Keywords: Wood, Acoustic emission, Damage, Damage mechanisms, tensile test, compression test, bending test