Évaluation du niveau de dégradation du bois dans les ouvrages de protection par spectroscopie proche infrarouge et analyse vibratoire

Jean-Baptiste Barré

▶ **To cite this version:**

Jean-Baptiste Barré. Évaluation du niveau de dégradation du bois dans les ouvrages de protection par spectroscopie proche infrarouge et analyse vibratoire. Génie civil. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT : 2017GREAS005 . tel-01589461v2

HAL Id: tel-01589461

https://theses.hal.science/tel-01589461v2

Submitted on 25 Jan 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

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE ALPES

Spécialité : Biotechnologie, Instrumentation, Signal et imagerie pour la médecine, la biologie et l'environnement

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Jean-Baptiste BARRÉ

Thèse dirigée par **Freddy Rey** et

codirigée par **Franck BOURRIER** et **David BERTRAND**

préparée au sein du centre

IRSTEA de Grenoble, UR Écosystèmes Montagnards

dans l'**École doctorale Ingénierie pour la santé la Cognition et l'Environnement**

Évaluation du niveau de dégradation du bois dans les ouvrages de protection par spectroscopie proche infrarouge et analyse vibratoire

Thèse soutenue publiquement le **1 février 2017**,

devant le jury composé de :

Federico PRETI

Professeur, Université de Florence, Président du jury

Meriem FOURNIER

Professeur, AgroParisTech, Rapporteur

Joris VAN ACKER

Professeur, Université de Gent, Rapporteur

David BERTRAND

Maître de conférences, INSA LYON, Examinateur

Franck BOURRIER

Chargé de recherche, IRSTEA, Examinateur

Jean-Luc COUREAU

Maître de conférences, Université de Bordeaux, Examinateur

Freddy REY

Directeur de recherche, IRSTEA, Examinateur

Remerciements

Ce mémoire de thèse rend compte de trois années de travail menées au centre IRSTEA de Grenoble. Je tiens ici à remercier tous ceux qui ont rendu cette aventure possible. Précisons que tout a commencé six ans plus tôt suite à une initiative heureuse de Frédéric Bray. Je poussais alors pour la première fois les portes de l'institut, accueilli pour une mission de quelques mois. De fil en aiguille, les personnes rencontrées au centre m'ont donné le goût pour la recherche jusqu'à présenter une thèse de doctorat.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Freddy REY, directeur de recherche à IRSTEA, pour son accompagnement sur des sujets scientifiques parfois éloignés de ses activités. Je lui suis très reconnaissant des conseils et directives qu'il a su m'apporter dès la rédaction du sujet. Nos échanges ont toujours été une occasion de ramener la réflexion à l'essentiel et de m'éviter ainsi de m'égarer dans les méandres de la science.
Je remercie chaleureusement Frank BOURRIER, chargé de recherche à IRSTEA, de m'avoir accordé sa confiance depuis les premières idées sur un potentiel sujet jusqu'à la rédaction finale de ce mémoire en passant par la recherche de financements. Sa présence infaillible et son ouverture d'esprit a largement contribué à la réussite de ce travail de thèse. Je remercie également David Bertrand, maître de conférences à l'INSA, d'avoir participé à l'encadrement de ma thèse. Je remercie aussi Marie-France Thévenon, directrice de recherche au CIRAD et Loïc Brancheriau, directeur de recherche au CIRAD, et Lauric Cécillon, chargé de recherche à IRSTEA, pour leur soutien scientifique et leur disponibilité à l'occasion des comités de pilotage.
J'adresse aussi mes remerciements à l'ensemble des membres l'équipe PIER et particulièrement à Frédéric Berger, ingénieur de recherche à IRSTEA, qui a réussi à insuffler, parmi nous, un état d'esprit salvateur pour endurer ce travail de thèse. Merci à Sylvain, le plus suisse des lozériens, pour avoir joué les garde-fous, penses bêtes et gardien du temps dans nos déplacements quotidiens. . Merci à Eric et Pascal pour leurs nombreux coups de main dans les manips. Merci à Mao pour son enthousiasme débordant et contagieux.

La pause-café et son vivier de bras cassés ont aussi été d'une importance cruciale pour décompresser pendant les longues heures de rédaction. Merci à Coralie pour ses relectures attentives, Hugues pour sa pédagogie du désaccord, Seb pour son dynamisme, sa curiosité et son enthousiasme. Enfin, un grand merci à mon petit Frédéric, sans qui rien de tout cela ne se serait écrit.

Et lorsqu'on a charge de famille, une thèse ne se gagne pas qu'au labo. Aussi, je remercie très sincèrement Nath et Yvan pour leur aide, notamment dans la gestion quotidienne des enfants, Claire et Guillaume de m'avoir garanti une vue excellente tout au long de ces trois années. Je remercie très particulièrement Pascal F. et Vincent F. pour leur attention indéfectible à mon égard. Je salue aussi les gars du poker de m'avoir accepté à venir perdre mes 5 euros le jeudi soir.

Je remercie enfin ma famille. Marie, Camille, Colin et Marius (arrivé en cours de route) m'ont apporté l'équilibre essentiel pour affronter pareil travail.

Résumé

La construction d'ouvrages de protection répond à la nécessité de se protéger d'aléas naturels comme les phénomènes d'érosion ou de glissement de terrain. Si le béton est classiquement utilisé pour la construction de tels ouvrages, le bois est régulièrement employé pour des aléas engendrant des contraintes faibles ou modérées. Pour cela, les praticiens s'appuient sur deux approches différentes, le génie civil et le génie biologique, qui impliquent la mise en œuvre de structures construites à partir d'agencements de rondins de bois d'essences locales. Il existe cependant des lacunes de savoir-faire et de connaissances freinant la prescription de ces ouvrages. Les verrous scientifiques concernent notamment l'évaluation du niveau de dégradation des propriétés mécaniques des rondins pour le suivi des ouvrages existants.

L'objectif de cette thèse est d'**évaluer le niveau de dégradation du bois dans les ouvrages de protection à partir de la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) et de l'analyse vibratoire**.

Dans ce travail de thèse, le niveau de dégradation d'un rondin est défini comme le taux de perte en module d'élasticité (MOE) ou en module de rupture (MOR) par rapport à leur valeur à l'état intact, *i.e.* non dégradé. De ces taux évalués à partir de mesure par essais de flexion en conditions quasi-statiques, deux indicateurs de référence, Dw_{MOE} et Dw_{MOR}, ont été définis pour développer les méthodes SPIR et analyse vibratoire. Les deux méthodes se différencient notamment par leur échelle d'investigation, considérée comme locale, *i.e.* ponctuelle sur le rondin, pour la SPIR et globale, *i.e.* le rondin entier, pour l'analyse vibratoire. Elles se différencient aussi par leur impact sur l'élément étudié, la mesure par la méthode SPIR étant semi-destructive, car elle requiert un prélèvement, et celle par analyse vibratoire étant non-destructive. Afin d'accélérer le processus de dégradation, les expérimentations associées au développement de ces méthodes ont eu lieu en conditions semi-contrôlées. A l'issue de leur développement, les méthodes ont été testées pour évaluer le niveau de dégradation des rondins en conditions naturelles.

La *méthode par SPIR* évalue le niveau de dégradation à partir de modèles de prédiction des indicateurs de référence Dw_{MOE} et Dw_{MOR} basés sur les statistiques multivariées, la régression des moindres carrés partiels notamment. Elle s'appuie sur un pré-traitement des spectres permettant de mettre en avant les effets de l'activité microbienne sur les échantillons. Les performances d'évaluation du niveau de dégradation de rondins sont satisfaisantes (RMSEP=0.13 pour Dw_{MOE} et RMSEP=0.17 pour Dw_{MOR}). Concernant la *méthode par analyse vibratoire*, trois propriétés mécaniques se sont révélées sensibles à l'activité microbienne : le MOE calculé selon la théorie d'Euler-Bernoulli (E_n), le MOE calculé selon la théorie de Timoshenko (E_{timo}) et le taux d'amortissement ξ. De ces trois propriétés, E_n a été retenu pour définir un indicateur (Dw_{E_n}) d'évaluation du niveau de dégradation. Finalement, la méthode par analyse vibratoire se base sur les indicateurs Dw_{E_1}, calculé à partir de E_n au premier mode de vibration, et Dw_{E_2}, calculé à partir de E_n au second mode de vibration (moins sensible aux imperfections géométriques). Dw_{MOE} est fortement corrélé à Dw_{E_1} (r^2=0.84) et Dw_{E_2} (r^2=0.83). Finalement, testées sur des rondins dégradés en conditions naturelles, les méthodes SPIR et analyse vibratoire ont permis d'évaluer des niveaux de dégradation similaires, bien que les échelles d'investigation soient différentes.

Ce travail de thèse a contribué à l'approfondissement des connaissances sur l'évaluation du niveau de dégradation du bois dégradé par une communauté microbienne. D'après les résultats obtenus, il est envisageable d'associer ces méthodes à celles déjà mises en œuvres par les praticiens lors du diagnostic des ouvrages de protection en bois.

Abstract

The construction of protective structures responds to the need to protect themselves from natural hazards such as erosion or landslides. If the concrete is conventionally used for their construction, wood is regularly used for natural hazards generating low or moderate forces. For this, practitioners rely on two different approaches, civil engineering and bioengineering, which require, in this context, the implementation of structures built on the basis of an arrangement of logs. However, there are knowledge gaps hampering the design of these structures. In particular, scientists obstacles concern the assessment of the level of decay, in the sense of mechanical properties, of logs for monitoring existing structures.

The aim of this thesis is to **assess the level of decay of wood in protective structures from near infrared spectroscopy (NIRS) and vibration analysis**. In this thesis, the level of decay of a log is set from the rate of loss in modulus of elasticity (MOE) or modulus of rupture (MOR) relative to their intact value, *i.e.* not degraded. From these rates evaluated from bending tests under quasi-static conditions, we defined two reference indicators, Dw_{MOE} and Dw_{MOR}, on which are based the two methods developed in this thesis.

The two methods are differentiated in particular by their scale of investigation, considered local, *i.e.* punctual on the log, for the NIRS and global, *i.e.* the whole log, for the vibration analysis. They are also differentiated by their impact on the studied elements, the measurement by the SPIR method being actually semi-destructive because it requires a sampling, and that by vibratory analysis being non-destructive. In order to accelerate the degradation process, the experiments associated with the development of these methods took place under semi-controlled conditions. At the end of their development, the methods were tested to assess the level of decay of logs under natural conditions.

The *method by SPIR* evaluates the level of decay from prediction models of the reference indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR} based on multivariate statistics, partial least squares regression in particular. It is based on a pre-treatment of the spectra to highlight the effects of microbial activity on the samples. The performance of evaluating the degradation level of logs is satisfactory (RMSEP = 0.13 for Dw_{MOE} and RMSEP = 0.17 for Dw_{MOR}). Regarding *vibration analysis*, three mechanical properties were found to be sensitive to microbial activity : the MOE calculated according to the Euler-Bernoulli theory (E_n), the MOE calculated according to the Timoshenko theory (E_{timo})and the damping ratio ξ. Of these three properties, E_n has been chosen to define an indicator (Dw_{E_n}) to evaluate the level of degradation. The vibration analysis method is based on the indicators Dw_{E_1}, calculated from E_n at the first vibration mode, and Dw_{E_2}, calculated from E_n at the second mode vibration mode that is less sensitive to geometric imperfections. Dw_{MOE} is strongly correlated to Dw_{E_1} (r^2=0.84) and Dw_{E_2} (r^2=0.83). Finally, tested on logs degraded under natural conditions, the NIRS and vibration analysis methods allowed evaluating similar levels of decay, although the scales of investigation are different.

This work contributes to the increasing of knowledge on the assessment of the level of decay of wood degraded by a microbial community. From the results obtained, it is possible to associate these methods with those already implemented by practitioners when diagnosing protection structures.

Table des matières

I Introduction **5**

1 Contexte **7**
1.1 Contexte général 7
1.2 État de l'art 8
1.2.1 Les ouvrages de protection en bois 8
1.2.2 La dégradation du bois dans le contexte des ouvrages de protection 11
1.2.3 L'évaluation destructive et non destructive des propriétés mécaniques et de la densité du bois 16

2 Problématique **23**
2.1 Le besoin des praticiens 23
2.2 La problématique scientifique 24

3 Objectifs et structures de la thèse **25**
3.1 Objectifs de la thèse 25
3.2 Structure de la thèse 25

4 Démarche méthodologie **29**

II Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par spectroscopie proche infrarouge **31**

1 Introduction **33**

2 Évaluation du niveau de dégradation de tiges de sapin de section carrée par spectroscopie proche infrarouge **37**
2.1 Introduction 37
2.2 Materials and Methods 39
2.3 Results and discussion 43
2.3.1 Mechanical degradation indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR} 43
2.3.2 Near-infrared spectra 44
2.3.3 Prediction of mechanical degradation indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR} using the PLSR of differential spectra 46
2.4 Conclusion 49

3 Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin par spectroscopie proche infrarouge **53**
3.1 Introduction 54
3.2 Materials and Methods 55

3.3 Results . . . 58
3.3.1 Mean intact spectrum and differential spectra . . . 58
3.3.2 Assessment of the level of decay using NIRS . . . 58
3.4 Discussion . . . 60
3.4.1 Mean intact spectrum and differential spectra . . . 60
3.4.2 Assessment of the level of decay using NIRS . . . 62
3.5 Conclusion . . . 62

4 Synthèse 65

III Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par analyse vibratoire 67

1 Introduction 69

2 Effets de la dégradation microbienne sur l'élasticité et l'amortissement de rondins de sapin blanc mesurés par analyse vibratoire 73
2.1 Introduction . . . 73
2.2 Materials and Methods . . . 75
2.3 Results . . . 78
2.4 Discussion . . . 80
2.5 Conclusion . . . 85

3 Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc par analyse vibratoire 87
3.1 Introduction . . . 88
3.2 Materials and methods . . . 89
3.2.1 Silver fir samples and the degradation process . . . 89
3.2.2 Calculation of the dynamic modulus of elasticity . . . 89
3.2.3 Influences of three types of geometrical imperfections . . . 90
3.2.4 Assessing the level of decay from the indicator Dw_{E_n} and comparison with the indicator of reference Dw_{MOE} . . . 92
3.3 Results . . . 93
3.3.1 Influences of three types of geometrical imperfections . . . 93
3.3.2 Assessing the level of decay from the indicator Dw_{E_n} and comparison with the indicator of reference Dw_{MOE} . . . 94
3.4 Discussion . . . 95
3.4.1 Influences of three types of geometrical imperfections . . . 95
3.4.2 Assessing the level of decay from the indicator Dw_{E_n} and comparison with the indicator of reference Dw_{MOE} . . . 97
3.5 Conclusion . . . 97

4 Synthèse 99

IV Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin dégradés en conditions naturelles par SPIR et analyse vibratoire 101

1 Introduction 103

2 Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin dégradés en conditions naturelles par SPIR et analyse vibratoire 105
2.1 Introduction . . . 106
2.2 Materials and Methods . . . 107
2.2.1 Samples preparation and experimental sites . . . 107
2.2.2 Applicability of the methods on samples degraded in natural conditions . 108
2.2.3 Comparison of the level of decay assessed by NIRS based method and VRM110
2.3 Results . . . 112
2.3.1 Applicability of the methods on samples degraded in natural conditions . 112
2.3.2 Comparison of the levels of decay assessed by NIRS-based method and VRM114
2.4 Discussion . . . 115
2.4.1 Applicability of the methods on samples degraded in natural conditions . 115
2.4.2 Comparison of the levels of decay assessed by NIRS-based method and VRM116
2.5 Conclusion . . . 117

3 synthèse 119

V Synthèse générale et perspectives 121

1 Synthèse générale 123
1.1 Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par spectroscopie proche infrarouge . . . 123
1.2 Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par analyse vibratoire . . . 125
1.3 Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions naturelles par SPIR et analyse vibratoire . . . 126
1.4 La méthodologie de dégradation . . . 126

2 Perspectives 129
2.1 Le développement des méthodes d'évaluation du niveau de dégradation par SPIR et analyse vibratoire . . . 129
2.2 Le diagnostic des ouvrages de protection en bois . . . 130
2.3 L'évaluation du niveau de dégradation du bois hors du contexte des risques naturels131

Bibliographie 133

Première partie

Introduction

Chapitre 1

Contexte

1.1 Contexte général

Les inondations et coulées de boue, les séismes, les mouvements de terrains, les feux de forêts ainsi que les avalanches sont des aléas naturels présents en France. Il s'agit de phénomènes naturels dangereux qui peuvent se caractériser par leur intensité et leur occurrence, tout autant spatiales que temporelles. Lorsqu'il menace des enjeux humains et matériels (personnes, infrastructures, habitations,...) caractérisés par leur vulnérabilité, un aléa naturel est considéré comme un risque naturel. Par définition, l'aléa naturel ne se maîtrise pas complètement mais il convient de se prémunir de ses effets dommageables pour contenir le risque sur un enjeu. Souhaitant contribuer aux réflexions mises en œuvre pour gérer les risques naturels, ce travail de thèse s'intéresse tout particulièrement aux actions de protection, notamment celles destinées à contrer les aléas de type érosion et glissement de terrain superficiel. La mise en place de ces mesures de protection se traduit en pratique par la construction d'ouvrages de protection (Naaim-Bouvet et al., 2015; Piton et al., 2016). Ces ouvrages ont été construits, en fonction des époques et des contextes techniques, à partir de différents matériaux tels l'acier, le béton, la pierre, le bois ou les végétaux. Tandis que les ouvrages faisant usage du bois pour lutter contre ce type de risques naturels ont connu leur âge d'or entre le XIXe siècle et le XXe siècle, l'apparition du béton au début du XXe siècle a permis aux praticiens de concevoir des ouvrages résistants et offrant une fonction de protection plus stable dans le temps : l'usage du béton s'est alors généralisé. Moins d'un siècle plus tard cependant, le contexte économique et environnemental a évolué en faveur du matériau bois (Kail et al., 2007; Hung et al., 2009). Les années 1990 ont ainsi vu le retour de la construction d'ouvrages de génie civil en bois, destinés à lutter contre des phénomènes engendrant des contraintes mécaniques faibles ou modérées. Pour leur conception, les praticiens se sont alors appuyés sur les réalisations du passé (Evette et al., 2009). En France, l'application en 1882 des lois de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) pour lutter contre les inondations dévastatrices, avait entrainé la construction d'un nombre conséquent d'ouvrages de ce type aujourd'hui quasiment disparus (Fig. 1.1).

De nos jours encore, la question de la durabilité des ouvrages de génie civil en bois constitue un des principaux freins à leur développement. En effet, le bois en milieu naturel se dégrade plus ou moins rapidement eu égard à sa nature organique. Aussi, en s'inspirant de techniques anciennes (Evette et al., 2009), les praticiens ont cherché à prolonger la durée de vie de certains types d'ouvrages en intégrant à la structure bois, lors de la construction, des plantes ligneuses, sous forme de plants ou de boutures. Ces plantes, une fois leur maturité atteinte, permettent ainsi d'assurer, en lieu et place de la structure bois, la fonction de protection lorsque la structure bois a disparu. Ce faisant, les praticiens se sont rapprochés, dans leur pratique, de solutions proposées par l'ingénierie écologique en général et plus particulièrement par l'ingénierie végétale.

(a) Seuils en bois. 1894. Pellafol (Isère). Crédit : RTM.

(b) Seuils en bois et pierres. Torrent du Chagnon en 1934. Vars (Hautes Alpes). Crédit : RTM.

FIGURE 1.1 – Ouvrages de protection en bois

L'ingénierie écologique représente la conception de projets basés sur l'utilisation du vivant ou à destination du vivant (Rey, 2017). Des travaux de recherche ont révélé son potentiel pour répondre à des problématiques de contrôle des aléas naturels, tels que l'érosion (Rey, 2009) et les glissements superficiels (Mao et al., 2012), notamment pour la protection d'enjeux humains. Pour ce faire, l'ingénierie écologique emploie des plantes herbacées ou ligneuses ayant, dans ce contexte, une fonction de protection et une fonction écologique pour le maintien de la biodiversité (Burylo et al., 2014). Toutefois, utiliser le végétal implique une échelle temporelle rythmée par les saisons végétatives, rarement compatible avec les phénomènes traités. La parade consiste alors à aménager une structure biodégradable à même d'assurer temporairement une partie de l'action corrective et stabilisatrice, le temps que les végétaux se développent et assurent à leur tour leur rôle de protection ou de stabilisation. Cette structure biodégradable peut être constituée d'un agencement de rondins non traités qui, sous l'action d'une communauté saproxylique, les espèces qui décomposent le bois pour s'en nourrir, se dégradent. Pour ce type d'ouvrages, la résorption de la structure est un phénomène recherché. La biodégradabilité du bois n'est plus un inconvénient, contrairement aux cas des ouvrages de génie civil en bois ayant vocation à être pérennes.

L'enjeu, pour les concepteurs d'ouvrages de protection en bois de génie civil ou d'ingénierie écologique, est d'être en mesure d'apporter aux maîtres d'ouvrages des solutions fiables. Cette nécessité passe par une meilleure compréhension du fonctionnement des ouvrages. En particulier, la question de l'évaluation de la dégradation de la structure bois est récurrente.

1.2 État de l'art

1.2.1 Les ouvrages de protection en bois

Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons tout autant aux ouvrages de génie civil en bois qu'à ceux d'ingénierie écologique intégrant une structure bois, réalisés dans l'optique de protéger les populations ou infrastructures de phénomènes de type érosion ou glissement de terrain superficiel.

(a) Ouvrage à simple paroi stabilisé par des tirants. Crédit : RTM.

(b) Construction d'un caisson de soutènement. Crédit : Dynamique Environnement

FIGURE 1.2 – Exemples d'ouvrages de génie civil en bois

Dans la suite du document, et lorsqu'aucune raison ne nécessite de faire la distinction entre ces deux familles d'ouvrages, nous retiendrons la terminologie « d'ouvrages de protection en bois ». En effet, ceux-ci ont en commun d'être construits à partir de rondins, prélevés dans le fût des arbres et possédant naturellement une géométrie irrégulière. La question de la durée de vie de ces ouvrages se pose, confrontant les praticiens à la problématique de l'évaluation du niveau de dégradation des éléments constitutifs.

1.2.1.1 Les ouvrages de génie civil en bois

La fonction des ouvrages de génie civil en bois est variable, mais tous ont en commun de devoir résister à la poussée des terres et, dans le cas des ouvrages en cours d'eau, à la poussée des eaux. A ces fins, les ouvrages sont conçus majoritairement selon deux principes constructifs (Roman, 2009).

Le premier principe constructif conduit à la réalisation d'une structure à simple paroi. Il s'agit d'un empilement vertical de rondins, assemblés par des tiges métalliques. Si la topographie du terrain le permet, la stabilité de la structure est en premier lieu assurée par un ancrage des extrémités de la paroi dans le sol ou la berge. Pour des structures de faible hauteur (empilement de trois rondins), la stabilité est également assurée par des pieux ancrés profondément dans le sol, du côté aval de l'ouvrage. En complément des autres techniques, ou si aucune de celles-ci n'est applicable, la paroi peut être stabilisée par d'autres rondins, appelés tirants, fichés dans le sol en amont de l'ouvrage (Fig.1.2a). Ce principe constructif sert principalement à réaliser de petits seuils de correction torrentielle dans les cours d'eau. Les dimensions caractéristiques de ces ouvrages varient généralement entre deux et six mètres de largeur pour une hauteur pouvant atteindre un mètre.

Le second principe constructif correspond à une structure à double parois, autrement appelée caisson. La structure est constituée par un agencement de rondins formant une ossature tridimensionnelle. Elle possède une paroi aval qui reste visible une fois l'ouvrage terminé et une paroi amont reliée à la première par des rondins de petites tailles appelés traverses. Les rondins

sont assemblés entre eux au moyen de tiges métalliques. Les espaces laissés vides sont, quant à eux, comblés par des matériaux inertes et drainants, généralement de la pierre. La structure est construite à même le sol, terrassé avec une contre-pente de façon à ce que l'élévation de la structure soit légèrement inclinée. Ainsi construite, la structure est auto-stable et assure la fonction de soutènement par son poids propre. Sa stabilité peut cependant être renforcée par des pieux en béton armé.

Ce principe constructif présente comme avantage de pouvoir moduler la longueur de l'ouvrage en fonction de l'étendue de l'aléa à contrôler. Celle-ci varie ainsi de quatre à plusieurs dizaines de mètres. La hauteur varie quant à elle d'un à quatre mètres. Enfin, la largeur de l'ouvrage est *a minima* égale à la moitié de la hauteur. Pour la conception des ouvrages, l'empirisme prévaut, excepté pour ces ouvrages à doubles parois dont la taille, généralement plus conséquente, exige un dimensionnement mécanique. Ainsi, les praticiens se basent sur la norme Eurocode 5 (CEN, 2005) spécifique à la construction des ouvrages en bois. Le dimensionnement de la structure permet de contrôler sa stabilité au renversement et au glissement ainsi que de vérifier l'équilibre statique interne. Connaissant les efforts internes et les propriétés mécaniques du bois utilisé, il est possible de vérifier les sections de bois de la structure ainsi que la tenue des assemblages.

Ces structures sont souvent utilisées dans les cours d'eau pour réaliser des caissons de retenue de berges (Fig.1.2b) ou des seuils de correction torrentielle (Fig. 1.3). En voirie, ils servent au contrôle des glissements superficiels en amont de la chaussée et en soutènement de pistes forestières.

FIGURE 1.3 – Seuil de correction torrentielle en sapin. Morzine (Haute-Savoie). Crédit : IRSTEA

1.2.1.2 Les ouvrages d'ingénierie écologique avec une structure bois

L'ingénierie écologique renvoie aux stratégies, aux outils et aux techniques végétales adaptés pour une intervention sur les milieux dégradés et se basant sur des connaissances en écologie (Bergen et al., 2001; Gattie et al., 2003). Pour répondre à des problématiques d'atténuation de risques naturels, elle propose notamment des solutions combinant un matériel végétal avec un matériel inerte. Parmi les seconds, le rondin en bois est souvent utilisé (Zeh, 2007). Il s'agit alors, au moyen d'un agencement de rondins, de former une structure qui assure la fonction de protection le temps que le matériel végétal soit suffisamment développé. Les principes constructifs utilisés pour réaliser ces structures sont variés et dépendent notamment de la nature du risque à traiter

(a) Structure bois à simple paroi. Crédit : F.Rey

(b) Armatures en bois. Crédit : Dinocosner

FIGURE 1.4 – Exemples d'ouvrages d'ingénierie écologique

et du lieu d'implantation. Les structures à simple et double parois sont largement utilisées dans ce contexte et sont identiques à celles des ouvrages de génie civil en bois décrites précédemment. Lors de la construction, le matériel végétal est installé sous la forme de plants ou de boutures (Fig. 1.4a). Pour que son développement soit assuré, le matériau de remplissage est un substrat adapté à la reprise du matériel végétal, le plus souvent un matériau gravelo-terreux. Il est cependant nécessaire de retenir ce substrat à l'intérieur de la structure bois, au moyen de géonattes de coco, par exemple. Un autre principe constructif couramment utilisé est l'armature en bois installée sur les talus ou pentes à maintenir en place (Fig. 1.4b). Lors de la construction, des lits de plants et plançons, par exemple, sont déposés régulièrement sur toute la hauteur de l'ouvrage.

1.2.2 La dégradation du bois dans le contexte des ouvrages de protection

Les ouvrages de protection en bois sont construits en milieu naturel, souvent à proximité, voire dans les cours d'eau, où les phénomènes érosifs et de glissements sont courants. Les rondins se retrouvent alors dans des dispositions très variables, allant du contact partiel avec le sol à l'immersion totale sous l'eau, en passant par l'enfouissement partiel. Ces différentes dispositions ont une large influence sur le niveau de dégradation atteint par les rondins. Ceci tient à la nature du matériau bois, d'une part, et des agents saproxyliques d'autre part.

1.2.2.1 Les caractéristiques du matériau bois d'espèces de zones tempérées

À l'échelle cellulaire

Le bois est constitué de cellules formées à partir de cellulose (40 à 50%), d'hémicellulose (20 à 30%) et de lignine (20 à 30%) (Dirol et al., 2001). La cellulose est présente sous la forme de microfibrilles associées entre elles par des hémicelluloses (Trouy, 2015). La lignine associée aux hémicelluloses forme une matrice autour des microfibrilles de celluloses (Fig. 1.5). Ensemble, ces trois composants constituent des couches successives pour former la paroi cellulaire.

À l'échelle microscopique

À l'échelle microscopique, l'anatomie du bois se caractérise par une organisation cellulaire, appelée plan ligneux. La formation du plan ligneux est pilotée par le génome. Le plan ligneux

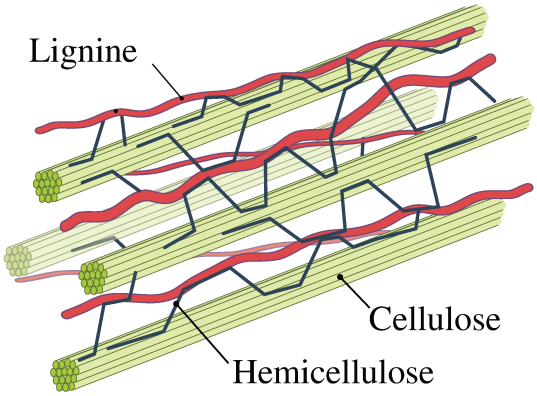

FIGURE 1.5 – Schéma de principe de la matrice lignocellulosique.

(a) Coupe transversale de sapin blanc (*Abies alba* Mill.). Crédit : WSL.

(b) Coupe transversale de l'épicéa commun (*Picea abies* Karsten) avec la présence des canaux résinifères. Crédit : WSL.

FIGURE 1.6 – Coupes transversales de sapin blanc et d'épicéa commun. Alternance de cellules de bois de printemps (zones claires) et d'été (zones foncées)

des espèces d'une même famille possède des caractéristiques générales identiques, notamment le type et les fonctions des différentes cellules. Pour la famille des angiospermes (arbres feuillus), les fonctions de soutien mécanique et de conduction des matières nutritives sont assurées par des cellules différentes. *A contrario*, pour la famille des gymnospermes (arbres résineux), un seul type de cellule, les trachéides, assurent ces deux fonctions. De plus, de par son origine génétique, le plan ligneux présente des caractéristiques constantes pour une espèce donnée. Il permet de distinguer entre elles les espèces d'une même famille dont les plans ligneux présentent des analogies (Fig. 1.6a). Par exemple, le sapin blanc (Fig. 1.6a) et l'épicéa commun (Fig. 1.6b) ont deux plans ligneux très semblables. Ces espèces se différencient pourtant par la présence de canaux résinifères chez l'épicéa. Aussi, si chaque espèce possède son propre plan ligneux, leurs caractéristiques montrent une variabilité intra-espèce importante, qui résulte de l'adaptation des individus à leurs conditions de croissance.

Le bois est un matériau hygroscopique. Cela signifie que ses cellules contiennent de l'eau sous différentes formes, dont la quantité varie en fonction des conditions de température et d'humidité de l'air. La teneur en eau d'un échantillon se mesure en déterminant la masse d'eau qu'il contient,

exprimée en pourcentage de la masse anhydre (Williamson et al., 2010). Pour une teneur en eau comprise entre 0 et 30%, l'eau, nommée dans ces conditions "eau liée", s'imprègne dans la paroi des cellules. Les variations de teneurs en eau, dans cette même plage, entrainent un retrait ou un gonflement du bois. Lorsque la teneur en eau dépasse environ 30%, le point de saturation des fibres (PSF) en eau liée est atteint. De l'eau libre apparait alors à l'intérieur des cellules. Au-dessus du PSF, le bois est géométriquement stable. Le bois ne contient plus d'eau seulement à l'état anhydre, un état qui ne peut être obtenu qu'artificiellement par un séchage à 103°C. Au delà des variations dimensionnelles du bois, l'hygroscopie a également des conséquences importantes sur ses propriétés mécaniques.

À l'échelle macroscopique

Le bois se caractérise par son orthotropie définie dans un repère cylindrique formé à partir des axes longitudinal (L), radial (R) et tangentiel (T) (Fig.1.7). L'axe longitudinal correspond à l'axe de la grume. L'axe radial est perpendiculaire à L et passe par la fibre neutre de la grume. Enfin, l'axe tangentiel est perpendiculaire aux deux autres (Fig. 1.7). A cette échelle, il est souvent possible de distinguer les cernes qui marquent les cycles annuels de croissance de l'arbre. Un cerne se caractérise par la succession de bois de printemps et d'été (Fig. 1.6). Le premier correspond aux cellules formées lors de la reprise végétative et se caractérise par des cellules de fortes sections et aux parois minces, tandis que le bois d'été se caractérise par des cellules de sections plus petites et aux parois épaisses.

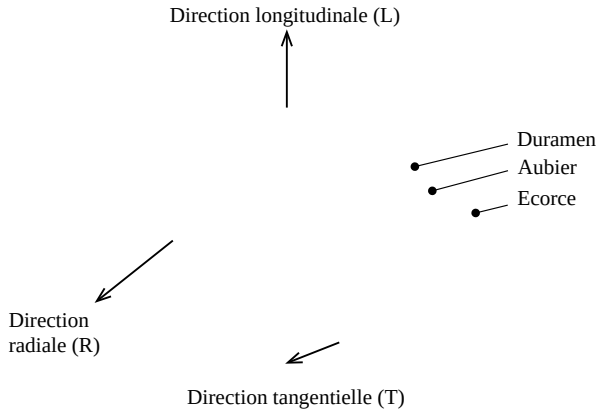

FIGURE 1.7 – Détail des différentes parties d'un tronc.

À l'échelle de l'arbre

Une coupe transversale d'un arbre permet d'identifier trois zones distinctes (Fig. 1.7). En partant de l'extérieur, la première zone correspond à l'écorce, ou suber, partie inerte qui assure une fonction de protection mécanique et thermique des cellules vivantes contre les agressions extérieures. La zone suivante correspond à l'aubier dans lequel une partie des cellules de bois sont vivantes. L'aubier assure la circulation de la sèvre brute chargée de sels minéraux vers les centres de la photosynthèse (feuille ou aiguille). Enfin, la zone au cœur de l'arbre correspond au duramen composé de cellules mortes. Le phénomène de transformation de l'aubier en duramen est appelé duraminisation. Au cours de cette transformation, les cellules meurent et cessent de transporter la sève. A l'intérieur des cellules apparaissent alors des composés biochimiques nommés "extractibles" qui protègent le bois. Ceux-ci peuvent être des huiles, des résines, des terpènes ou encore

TABLE 1.1 – Densité et classes de durabilité naturelle vis à vis des champignons lignivores des principales essences utilisées dans les ouvrages de protection en bois en France. Selon norme EN-350-2 (CEN, 1994). Classe 1 : très durable - Classe 5 : non durable.

Nom commun	Nom scientifique	Densité [$kg.m^{-3}$]	Durabilité naturelle
Épicéa	*Picea abies(L.) Karst*	440-460-470	4
Douglas	*Pseudotsuga menziesii*	510-530-550	3
Mélèze	*Larix decidua Mill.,*	470-600-650	3,4
Pin sylvestre	*Pinus sylvestris L.*	500-520-540	3,4
Sapin	*Abies alba Mill.*	440-460-480	4
Chêne	*Quercus robur L.,*	670-710-760	2
Châtaignier	*Castanea sativa Mill.*	540-590-650	2
Robinier	*Robinia pseudoacacia L.*	720-740-800	1,2

des composés polyphénoliques comme les tanins. Ils peuvent apporter une couleur différente au duramen, permettant de le différencier visuellement de l'aubier. Ces extractibles sont en grande partie à l'origine de la durabilité des essences de bois. Leur présence et leur nature sont cependant très variables d'une essence à l'autre. Il en résulte une variabilité de la durabilité du duramen en fonction des essences (Tableau 1.1). En revanche, quelle que soit l'essence concernée, l'aubier est quant à lui non durable (Classe de durabilité 5).

Les propriétés mécaniques

Le bois tire ses propriétés mécaniques notamment des microfibrilles de cellulose incrustées d'hémicelluloses (Fig.1.5) et de l'agencement des cellules (Zabel et al., 1992). Ces propriétés diffèrent en fonction du plan d'orthotropie considéré (Bodig et al., 1993; Guitard, 1987). Dans le contexte du dimensionnement des rondins constitutifs des ouvrages de protection en bois, les propriétés du bois sollicitées sont celles correspondant à l'axe longitudinal. Dans le contexte des assemblages, il s'agit des propriétés selon les axes radial et tangentiel. Selon l'axe longitudinal, le comportement mécanique du bois est classiquement défini par une loi élastoplastique caractérisée par un module d'élasticité (MOE) et un module de rupture (MOR) (Tableau 1.2). Le MOE traduit le comportement élastique du matériau dans la direction longitudinale, à savoir sa capacité à se déformer sous une sollicitation puis à revenir à son état d'origine lorsque la sollicitation disparait. Le MOR représente la contrainte longitudinale maximale avant rupture du bois. Cette approche peut être complétée en prenant en compte le caractère hygroscopique du bois. En fonction des conditions de température et de l'hygrométrie de l'air, la teneur en eau du bois est variable. Par exemple,pour une température de 20 degré celsius, la teneur en eau du bois sera de 2% pour une hygrométrie de l'air de 10% et de 22% pour une hygrométrie de l'air de 90%. L'hygroscopie du bois a des conséquences importantes sur la plupart des propriétés mécaniques (Gerhards, 1982). Les propriétés mécaniques, le MOE et le MOR notamment, décroissent avec l'augmentation de la teneur en eau jusqu'à ce que celle-ci atteigne le PSF. Au-dessus du PSF, les propriétés mécaniques restent stables. De par l'origine naturelle du bois, ses propriétés mécaniques ont une variabilité élevée, comparativement à d'autres matériaux utilisés en construction comme le béton ou l'acier. A titre d'exemple, le MOE longitudinal moyen du sapin blanc à 12% de teneur en eau est de 14300 MPa, avec un écart-type de 3000 MPa, et le MOR moyen en flexion statique est de 80 MPa, avec un écart-type de 9 MPa (Cirad, 2015).

TABLE 1.2 – Valeurs et écarts-types de MOE et MOR (en MPa) à une teneur en eau de 12% pour les espèces généralement mises en oeuvre dans les ouvrages de protection en bois. Source : Cirad (2015)

Espèce	MOE	Ecart-type	MOR	Ecart-type
Épicéa	11900	2000	78	18
Douglas	16800	1550	91	6
Mélèze	11800	-	90	-
Pin sylvestre	12900	-	97	-
Sapin	14300	3000	80	9
Chêne	13300	1750	105	15
Châtaignier	13300	-	71	-
Robinier	16800	-	126	-

1.2.2.2 La dégradation du bois au contact du sol

La dégradation du bois se justifie, d'un point de vue écologique, par la nécessité de recycler la matière organique. Ce processus physico-chimique complexe implique des facteurs biotiques et abiotiques, dont l'étude exhaustive en milieu naturel est difficile et encore incomplète, en raison notamment de la durée du cycle de dégradation (Freschet et al., 2012). Parmi les facteurs biotiques agissant sur la dégradation, les insectes xylophages et les communautés microbiennes, présents dans tous types de sols, ont très tôt été étudiés pour s'en prémunir dans les constructions en bois. S'agissant des communautés microbiennes, les champignons et les bactéries sont les espèces qui ont une action significative sur le matériau.

Les xylophages

Les *champignons* colonisent le bois en condition aérobie. Ils sont habituellement classés en trois types de pourritures, blanche, brune et fibreuse, en fonction des modifications du bois identifiables visuellement (Goodell et al., 2008). Cette classification traduit des mécanismes de décomposition du bois différents (Zabel et al., 1992; Schwarze, 2007). Ainsi, la pourriture blanche dégrade les hémicelluloses, la lignine et la cellulose, la pourriture brune la cellulose et la pourriture fibreuse les hémicelluloses, la cellulose et la lignine (Blanchette, 1995). Les champignons se développent grâce à leur mycelium formé d'hyphes, filaments très fins (quelques micromètres de diamètre), capables de passer dans les ponctuations des cellules. Les facteurs clés qui influencent la croissance du mycelium, et la dégradation du bois qui en résulte, sont la température du bois, sa teneur en eau et la dynamique de ces grandeurs (Viitanen, 1994; Brischke et al., 2008a). Chaque champignon possède ses propres mécanismes enzymatiques qui requièrent des conditions de température et d'humidité spécifiques pour obtenir un développement optimal (Zabel et al., 1992). D'une manière générale, la teneur en eau est le facteur prépondérant. En dessous de 25%, faute de disponibilité en eau, et au-dessus de 80%, faute d'oxygène, l'activité fongique cesse. La teneur en eau optimale se situe entre 35 et 50% (Dirol et al., 2001). Les champignons lignivores ont une activité optimale pour une température située entre 25 et 35°C. En dessous de 0°C, l'activité fongique s'arrête. La dégradation fongique a des conséquences importantes sur les propriétés du bois. Au niveau chimique, les hémicelluloses, la cellulose et la lignine sont directement affectées en proportions variables en fonction du type de pourriture. Cette destruction progressive des éléments constitutifs de la paroi cellulaire (Fig. 1.8) entraîne une perte de densité (Zabel et al., 1992). En conditions de température et d'humidité constantes, l'intensité de la perte de densité est variable en fonction du type de champignons et de l'essence de bois (Wilcox et al., 1968).

Les *bactéries* colonisent le bois en conditions anaérobies et aérobies. Leur faible mobilité, par

rapport aux champignons notamment, limite leurs modes d'action (Clausen, 1996). Un seul type de bactéries est capable de s'attaquer à la structure du bois. Ces bactéries provoquent une érosion du bois ou creusent des tunnels (Kim et al., 2000) dans des conditions totalement anaérobies dans lesquelles l'activité fongique est impossible (Meyer et al., 2015).

Les *insectes xylophages* ou leurs *larves* attaquent le bois pour se nourrir des composants du bois ou pour s'y loger (Zabel et al., 1992). Ils creusent des galeries de 1 à 5 mm de diamètre dans l'aubier et dans le duramen des essences les moins résistantes, entrainant progressivement une réduction de la densité et des propriétés mécaniques du bois. En milieu naturel, les insectes présents lorsque le bois présente des taux d'humidité élevés (supérieurs au PSF) sont nommés insectes de bois frais (Dirol et al., 2001). Il s'agit notamment des insectes de la famille des bostryches.

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous focaliserons sur l'action de la communauté microbienne, et particulièrement celle des champignons, identifiée comme agent principal de la dégradation dans les ouvrages de protection en bois (Noetzli et al., 2008).

La mesure du niveau de dégradation

La perte de masse est couramment utilisée pour évaluer le niveau de dégradation d'un échantillon de bois. Cette méthode destructive, décrite dans la norme EN 15083-1 (CEN, 2005), consiste à mesurer, en conditions contrôlées, la perte de masse en bois entre l'état intact et l'état dégradé. La pesée de l'échantillon se fait systématiquement à l'état anhydre. La mesure évalue le niveau de dégradation global de l'échantillon et s'affranchit de sa variabilité locale due à l'hétérogénéité de développement des champignons à l'intérieur du bois. Cette méthode est utilisable en laboratoire. Pour des essais de champs (tests de durabilité en conditions naturelles), la norme EN 252 (CEN, 2014) fournit les indications permettant d'évaluer le niveau de dégradation à partir d'une analyse visuelle de l'échantillon, complétée par une quantification des surfaces altérées. Par cette méthode, l'évaluation est donc essentiellement qualitative. La norme EN 252 mentionne également dans ses annexes la possibilité d'évaluer la dégradation par la perte de MOE de l'échantillon. En effet, le MOE, ainsi que le MOR, sont largement affectés par l'activité fongique (Wilcox, 1978). Cependant, il est préconisé d'effectuer ces mesures pour une teneur en eau supérieure au PSF.

En dehors du contexte normatif présenté ci-dessus, d'autres techniques d'évaluation du niveau de dégradation existent. Celui-ci peut ainsi être quantifié *chimiquement* par mesure de la perte des composés lignocellulosiques (Strukelj et al., 2013), *mécaniquement*, par mesure de la perte de ses propriétés (Curling et al., 2002b) ou encore *physiquement* par mesure de la perte de densité (Creed et al., 2004). Cependant, ces méthodes n'évaluent pas les mêmes grandeurs, ce qui rend leur comparaison délicate. Par exemple, les propriétés mécaniques se montrent plus sensibles à l'activité fongique que la densité. Le MOE et le MOR, notamment, diminuent plus rapidement que la densité d'un échantillon de bois soumis à une pourriture blanche ou brune (Winandy et al., 1993).

1.2.3 L'évaluation destructive et non destructive des propriétés mécaniques et de la densité du bois

1.2.3.1 L'évaluation destructive des propriétés mécaniques et de la densité du bois

Le MOE et le MOR sont calculés à partir d'essais de flexion quasi-statique quatre points selon la norme EN 408 (CEN, 2003). Les essais consistent à mesurer la déformation induite par un chargement progressif. Connaissant les déplacements associés aux forces appliquées et les dimensions caractéristiques de l'échantillon, il est possible de calculer les valeurs de MOE et MOR. Le

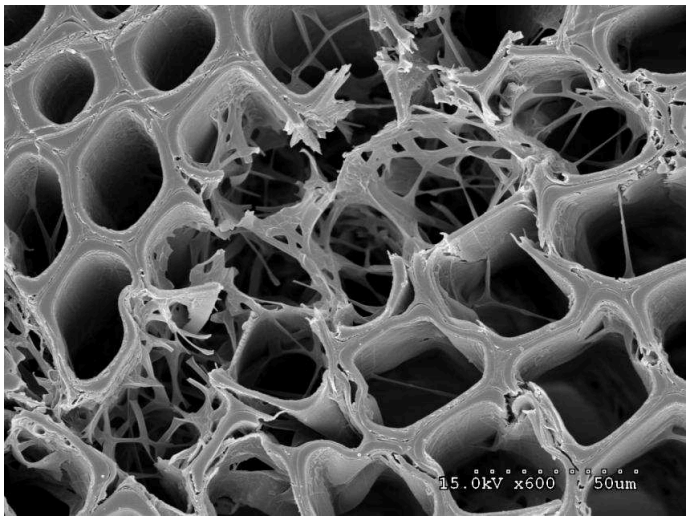

FIGURE 1.8 – Bois de pin dégradé par *Jaapia argillacea* (pourriture blanche). Crédit : B. Held, Univ. of Minnesota

MOE est déterminé dans le domaine élastique alors qu'il est nécessaire d'aller jusqu'à la rupture de l'échantillon pour calculer le MOR. Hors du cadre normatif, il est aussi possible de mesurer ces grandeurs par des essais de flexion trois points. La valeur de MOE correspond alors à un MOE apparent, car la déformation mesurée intègre les effets du cisaillement et de l'indentation (Brancheriau et al., 2002a). Ces effets peuvent cependant être atténués en mesurant l'indentation et en prenant des échantillons ayant un rapport "longueur sur hauteur" suffisamment grand (L/h >18).

1.2.3.2 L'évaluation non-destructive des propriétés du bois

L'inspection visuelle constitue la plus ancienne des techniques d'évaluation non destructive du bois. Celle-ci a été largement utilisée, notamment dans le cadre de la sélection des arbres dont le bois était destiné à un usage structurel. Les premières recherches visant à développer des technologies de mesures non destructives afin d'évaluer les propriétés du bois ont débuté dans les années 1960. Ces technologies ont trouvé plusieurs applications, dans le diagnostic de l'état de structures en bois de types charpente, passerelle ou pont (Kasal et al., 2004; Brashaw et al., 2009), dans la caractérisation mécanique du bois façonné en scierie (Gaunt et al., 2003) et dans le diagnostic d'arbres sur pied (Wang et al., 2001; Gao et al., 2012). Les techniques employées sont très diverses : mécanique, acoustique, électromagnétique, nucléaire, spectroscopique, vibratoire, résistance au perçage et électrique. Ces technologies se situent à des stades opérationnels plus ou moins avancés et ont une portabilité variable, allant de l'équipement de laboratoire à l'appareil portable autonome énergiquement. Ainsi, seules les techniques acoustique, vibratoire et de résistance au perçage ont réellement été adaptées pour évaluer les propriétés mécaniques et la densité du bois dans la perspective de diagnostiquer une structure bois (Ross et al., 1994).

L'évaluation par inspection visuelle

Dans le contexte de la production de bois de structure, l'inspection visuelle a longtemps été la seule méthode non-destructive pour le classement mécanique des bois. En France, l'analyse visuelle est encadrée par la norme NF B 52-001 (AFNOR, 1998), laquelle définit les critères visuels permettant d'affecter la pièce de bois à une classe de résistance mécanique. Pour les

grumes, des méthodes non normatives ont également été développées afin d'évaluer leur qualité, et celle des pièces qui en sont issues (Chiorescu et al., 2003). L'inspection visuelle visant à réaliser un diagnostic de structures est aussi largement utilisée, et reste recommandée en complément d'autres méthodes, telles que l'analyse vibratoire ou la vitesse de propagation d'ondes (Ross et al., 2007; Cavalli et al., 2013). Elle permet d'identifier très rapidement les éléments moyennement ou fortement endommagés et peut également être utilisée pour guider des investigations plus avancées avec d'autres méthodes (Piazza et al., 2008; Feio et al., 2015). Par exemple, dans le cas des ouvrages de protection en bois, le praticien complète souvent l'inspection visuelle par des sondages superficiels au couteau pour connaitre ponctuellement l'épaisseur de bois dégradé. Cette inspection visuelle est ainsi très utile, mais ses limites sont évidentes. Celle-ci ne porte en effet que sur les parties visibles de la structure, ce qui restreint significativement son champ d'application pour le diagnostic d'ouvrages de protection en bois. Enfin, elle ne permet pas de détecter un stade de dégradation précoce et repose en grande partie sur l'expérience du praticien.

L'évaluation de la densité

La perte de densité est actuellement la méthode la plus fréquemment utilisée pour évaluer le niveau de dégradation du bois, car la méthode basée sur la perte de masse d'un échantillon ne peut pas être appliquée *in situ*. La technique la plus précise, pour évaluer la perte de densité, consiste à mesurer, en laboratoire, la densité d'un échantillon stabilisé à 12% de teneur en eau, conformément à la norme EN 384 (CEN, 2010). Si la teneur en eau ne peut pas être contrôlée, il est conseillé de déterminer la densité à l'état anhydre (Williamson et al., 2010). La mesure de la densité peut également servir à donner une indication sur les propriétés mécaniques. Le coefficient de corrélation entre la densité et le MOR ou le MOE varie cependant entre des valeurs moyenne ou basse ($0.4<r^2<0.6$) (Feio et al., 2015).

Pour une mesure *in situ*, deux techniques d'estimation indirecte de la densité sont généralement utilisées (Mäkipää et al., 2011). Celles-ci font partie des méthodes de test local (Bertolini et al., 1998). La première consiste à mesurer, à l'aide d'un Pilodyn (société KRS ApS), la profondeur de pénétration d'une aiguille projetée par un ressort dans la pièce de bois. La profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la densité du bois. Le Pilodyn indique ainsi la densité relative du bois. Il est parfaitement adapté aux ouvrages de protection en bois pour l'investigation des rondins à l'échelle locale (Akita et al., 2014). Cependant, il fournit une information limitée à la longueur de l'aiguille (40 mm). En cela, la technique basée sur la résistance de perçage est plus adaptée, celle-ci permettant d'atteindre des défauts en profondeur dans le bois. L'aiguille de perçage permet d'évaluer des rondins jusqu'à 480 mm de diamètre. La technique consiste à mesurer la résistance du bois au perçage par une aiguille équipée d'une tête de perçage de 3 mm de diamètre. La vitesse de perçage est de l'ordre de 40 cm/min. L'appareil restitue la résistance au perçage, qui est corrélée à la densité, sous forme de profil (Kasal et al., 2004). Cette technique est aujourd'hui largement utilisée dans le diagnostic de structures en bois et d'arbres sur pied.

L'évaluation non-destructive des propriétés mécaniques

Deux méthodes sont essentiellement utilisées pour estimer la valeur du MOE de manière non destructive (Wang et al., 2002). Elles font partie des méthodes de test global (Bertolini et al., 1998). La première méthode est basée sur la *vitesse de propagation d'ondes* (Kasal et al., 2011). L'onde peut être sonore ou ultrasonore. L'onde sonore est obtenue par un impact sur l'élément étudié et l'onde ultrasonore est produite par un générateur piézo-électrique (Fig. 1.9a). La méthode consiste à propager une onde sonore ou ultrasonore dans l'élément étudié et

à mesurer le temps de propagation de celle-ci. Le temps de propagation permet de calculer la vitesse de propagation de l'onde connaissant les dimensions de l'élément. Finalement, le module d'élasticité dynamique (DMOE) est estimé à partir de E_{sw} (Equ. 1.1), et cela bien que le bois ne soit ni homogène ni isotrope (Ross et al., 1994).

$$E_{sw} = V^2 \rho \tag{1.1}$$

avec V la vitesse propagation de l'onde et ρ la densité du bois.

E_{sw} donne une estimation de DMOE précise pour des bois purgés de défaut (r^2=0.96). La présence d'imperfections naturelles (nœuds, fissures, déformation...) détériore la qualité de l'estimation (r^2 = 0.65) pour des poutres anciennes en bois -(Kasal et al., 2011). En effet, l'hypothèse conduisant à considérer que l'onde parcourt une ligne droite entre le point d'émission de l'onde et le point de réception ne peut être que partiellement vérifiée en présence de défaut. La mesure de MOE sur un élément au-dessus du PSF peut également être biaisée par une répartition hétérogène de l'eau à l'intérieur de l'élément étudié, entrainant alors une hétérogénéité de la densité (Carter et al., 2007). L'usage de cette méthode est limité par un phénomène d'atténuation de l'onde parfois trop important pour obtenir une mesure, notamment pour des éléments de grande longueur ou fortement dégradés (Kasal et al., 2011). En outre, la dégradation peut poser un problème de couplage entre le bois et le récepteur et/ou l'émetteur, entraînant une atténuation de l'onde. Enfin, Wang et al. (2001) ont montré que cette technique était plus sensible aux imperfections géométriques d'une grume que l'analyse vibratoire.

L'*analyse vibratoire* est une technique consistant à mesurer les déplacements d'une poutre en vibration libre et à déterminer ses fréquences de vibration (Fig. 1.9b). Pour cela, la poutre est considérée librement appuyée sur des supports très élastiques. Connaissant les fréquences de vibration et les caractéristiques de la poutre, il est possible de calculer son module d'élasticité dynamique (DMOE) à partir des théories d'Euler-Bernoulli ou de Timoshenko (Brancheriau et al., 2002b). L'analyse vibratoire ne fait habituellement pas partie des techniques citées pour évaluer des structures bois *in situ*, car les éléments testés n'ont pas les conditions d'appui libre-libre requises pour l'appliquer. Cependant, elle a été étudiée avec succès pour évaluer le niveau de dégradation de petits échantillons calibrés (Machek et al., 2001b; Grinda et al., 2005; Alfredsen et al., 2006).

Retenir, comme méthode d'analyse, le calcul de la vitesse de propagation d'ondes ou l'analyse vibratoire requiert de disposer en amont de la densité de l'élément analysé. Si l'élément est trop grand, la densité moyenne est mesurée à partir de plusieurs prélèvements afin de tenir compte de la variabilité de la densité au sein de l'élément. Il faut souligner que cette variabilité s'accentue avec la progression de la dégradation. Pour autant, les deux techniques ont permis d'évaluer la perte de DMOE engendrée par l'activité fongique pour des pièces de bois calibrées (Ross et al., 1994; Machek et al., 2001b).

Pour des pièces de bois non calibrées, Legg et al. (2016) ont réalisé un état de l'art sur l'application de ces deux méthodes d'estimation du MOE à des grumes ou des arbres sur pied. Les études réalisées mettent en avant les effets néfastes des imperfections matérielles et géométriques sur la précision des estimations. Les critères de rectitude et de constance de la géométrie, d'isotropie et d'homogénéité du matériau font effectivement partie des hypothèses des théories sous-jacentes à ces méthodes. Toutefois, les auteurs insistent sur le fait que la plupart des études comparent les deux méthodes entre elles et ne s'appuient pas sur une comparaison avec une autre technique comme la mesure par essais de flexion statique, qui est moins sensible aux imperfections matérielles et géométriques.

L'évaluation indirecte des propriétés du bois par spectroscopie proche infrarouge

(a) Mesure par la méthode de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores au moyen du Sylvatest (cbs-cbt). Crédit : sillon38.

(b) Mesure par analyse vibratoire sur un rondin. Crédit : IRSTEA.

FIGURE 1.9 – Estimation non destructives de MOE.

La Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR) permet classiquement d'analyser des échantillons de bois obtenus par carottage sur les éléments constitutifs de la structure. Cette technique de prélèvement ne pose pas de difficulté particulière pour les ouvrages de protection en bois, le carottage ayant un impact visuel et structurel très limité. Dans la suite de nos propos, nous considérerons ainsi la SPIR comme une méthode semi-destructive. L'acquisition des spectres peut être faite directement par application du faisceau lumineux sur le bois. La surface analysée dépend alors du diamètre du faisceau. Il n'y a pas de restriction sur la teneur en eau du bois. De cette manière, l'acquisition des spectres peut être réalisée *in situ* avec un appareil portable.

L'acquisition peut également être réalisée sur un prélèvement de bois réduit en poudre. Pour cela, il est nécessaire de maintenir la teneur en eau de l'échantillon en dessous de 10 %. Cette méthode offre l'avantage d'homogénéiser la matière analysée. Elle requiert cependant un temps de préparation des échantillons plus important et ne peut être effectuée *in situ*.

FIGURE 1.10 – Acquistion du spectre infra-rouge avec une SPIR portable. Crédit : Forest Quality Pty Ltd

La SPIR permet d'obtenir le spectre d'absorption d'un échantillon soumis à un rayonnement électromagnétique, dont la longueur d'onde varie dans le proche infrarouge entre 750 et 2600 nm.

Soumis à un rayonnement électromagnétique, une molécule se met en vibration lorsque la fréquence de radiation correspond à celle de vibration d'une des liaisons chimiques (liaison entre atomes) de la molécule. Celle-ci absorbe alors une partie de l'énergie du rayonnement. Il est ainsi possible de relier une longueur d'onde électromagnétique à une liaison chimique. Plus généralement, il est possible de relier des groupes fonctionnels à des longueurs d'ondes du spectre proche infrarouge. Par exemple, la molécule d'eau H_2O soumise à un rayonnement de longueur d'onde 1940 nm entre dans un mode de vibration de flexion (Workman et al., 2008). Le phénomène d'absorption répond à la loi de Beer Lambert qui stipule que l'absorption est proportionnelle à la concentration du constituant (Burns et al., 2008). Il est ainsi théoriquement possible de quantifier, à partir du spectre, le nombre de liaisons chimiques d'un constituant. Dans la pratique, une molécule d'origine organique telle que la cellulose, l'hémicellulose ou la lignine est composée de plusieurs liaisons chimiques. Le spectre résultant traduit alors les vibrations combinées des différentes liaisons ainsi que les modes de vibration d'ordres 1 et 2 de chacune des liaisons (Banwell et al., 1994). Dans ces conditions, l'affectation des pics du spectre à des composants chimiques est délicate et fait régulièrement l'objet d'études (Schwanninger et al., 2011a).

Dans le cas du matériau bois, l'usage de la SPIR a été développé notamment pour doser ses composants ou estimer ses propriétés en lien avec sa composition chimique (Tsuchikawa, 2007; Tsuchikawa et al., 2013; Tsuchikawa et al., 2015). Des modèles de prédiction du composant ou de la propriété à estimer sont construits à partir des spectres à l'aide d'analyses de données multivariées. A cette fin, la méthode des moindres carrés partiels (PLSR) est fréquemment utilisée, étant particulièrement adaptée pour les jeux de données comportant un nombre important de variables dépendantes (les longueurs d'ondes) (Mevik et al., 2013; Wold et al., 2001). La SPIR a également été utilisée pour estimer la densité, MOE et MOR de différentes essences (Kelley et al., 2004; Sandak et al., 2015b) ainsi que pour évaluer la dégradation du bois (Fackler et al., 2012; Sandak et al., 2013; Sandak et al., 2015a).

Chapitre 2

Problématique

2.1 Le besoin des praticiens

Les praticiens mettent en avant la difficulté de gérer un patrimoine d'ouvrages de protection en bois conséquent, avec peu de moyens d'investigation permettant d'estimer l'état de ces ouvrages et de leurs éléments constitutifs (rondins) en particulier, en termes de tenue mécanique. Faute de méthode précise, la cinétique de dégradation des ouvrages est difficile à apprécier. Par ailleurs, les rondins étant prélevés sur site, leurs propriétés mécaniques sont inconnues, ce qui oblige les praticiens à dimensionner les structures en faisant une hypothèse de propriétés basses pour être sécuritaire. Cette solution est toutefois peu satisfaisante d'un point de vue économique car elle engendre des surcouts de matière liée à un potentiel sur-dimensionnement des rondins.

L'attente des praticiens est peu courante dans le sens où, classiquement, si un ouvrage en bois est soumis aux classes d'emploi 4 et 5 (norme EN 335-2 (CEN, 1994)), l'essence de bois employée et les traitements de préservation associés sont choisis afin de se prémunir de toute altération significative sur la durée de vie envisagée de l'ouvrage. Pour les ouvrages de protection en bois, les praticiens prélèvent généralement les rondins dans des arbres à proximité immédiate de l'aléa. Le bois utilisé n'est alors pas traité contre les xylophages, et ne correspond que rarement aux exigences de durabilité requises pour des ouvrages de classes d'emploi 4 ou 5. Par conséquent, la dégradation est une problématique plus importante dans les ouvrages de protection que dans les ouvrages classiques.

L'estimation des propriétés mécaniques, du MOE et du MOR en particulier, au cours de la vie de l'ouvrage est donc primordiale pour mieux dimensionner les structures bois et être en mesure d'estimer leur durée de vie. Aujourd'hui, les outils non destructifs à disposition pour réaliser cette estimation sont peu nombreux et évaluent uniquement le MOE. La qualité de leur mesure sur des rondins dégradés est mal renseignée. Ils ont en effet été développés en premier lieu pour être appliqués à des pièces de bois calibrées et sans défaut et donnent, dans ce contexte, des valeurs de MOE très satisfaisantes. Ainsi, les praticiens posent la question des méthodes à utiliser pour :

- estimer les propriétés mécaniques des rondins à l'état intact, afin de les prendre en considération lors du dimensionnement des ouvrages.

- évaluer le niveau de dégradation de rondins afin d'apprécier l'état structurel global de l'ouvrage.

2.2 La problématique scientifique

La demande des praticiens met en avant l'importance d'évaluer, au cours de la vie d'un ouvrage bois, les MOE et MOR de ses éléments constitutifs afin d'être en capacité de déterminer son état structurel. La mesure de MOE et de MOR sur un ouvrage dégradé ne renseigne pas précisément sur son niveau de dégradation, car la variabilité des propriétés aux états intact et dégradé est trop importante (Tableau 1.2). Il est donc nécessaire de connaitre les propriétés du bois à ces deux états afin d'établir un niveau de dégradation précis. Ainsi, dans la suite de ce mémoire, le niveau de dégradation de référence sera défini à partir du taux de perte de MOE ou de MOR par rapport à leur valeur à l'état intact.

Parmi les techniques non destructives, seule la SPIR est à même d'évaluer à la fois le MOE et le MOR. Les études portant sur la SPIR ont effectivement révélé son potentiel pour évaluer ces grandeurs pour des échantillons calibrés et intacts. Des études ont également montré que la SPIR est sensible aux effets de l'activité fongique. En conditions contrôlées, la dégradation d'échantillons obtenue par des champignons de pourriture brune ou blanche a été identifiée dans les spectres en proche infrarouge pour les longueurs d'ondes correspondant aux composants du bois. Cependant, la SPIR entre dans la catégorie des méthodes de test local, ce qui limite par là-même son intérêt pour l'analyse d'éléments ayant une importante hétérogénéité de dégradation. L'analyse vibratoire ou la méthode basée sur la vitesse de propagation d'ondes sont alors requises pour obtenir une évaluation globale.

L'analyse vibratoire a donné des résultats prometteurs pour estimer un niveau de dégradation sur des échantillons calibrés. Cette analyse repose sur un principe physique qui n'est pas autant affecté par les changements de milieu (fissures) que peut l'être la propagation d'une onde acoustique. Elle semble également moins sensible aux imperfections géométriques que la méthode basée sur la vitesse de propagation d'ondes. Toutefois, l'analyse vibratoire appliquée à des rondins entraine nécessairement une erreur d'estimation de MOE, du fait des imperfections géométriques et de l'hétérogénéité du matériau accentuée par l'activité microbienne, qui pourrait être préjudiciable à l'évaluation de leur niveau de dégradation.

La problématique scientifique de ce travail de thèse consiste ainsi à évaluer le niveau de dégradation, défini comme le taux de perte en MOE ou en MOR par rapport à leur valeur à l'état intact, de rondins de bois à partir de méthodes semi ou non destructives basées sur la SPIR ou l'analyse vibratoire. Dans cette perspective, la question de la cinétique de dégradation, souvent évoquée par les praticiens, ne sera pas traitée. Ainsi, pour la SPIR, il convient de savoir si le niveau de dégradation de rondins peut être évalué à partir des spectres en se basant sur des modèles de prédiction des taux de pertes en MOE et MOR. Pour l'analyse vibratoire, la problématique est de savoir si les imperfections géométriques des rondins couplées à l'hétérogénéité du bois sont acceptables pour évaluer le niveau de dégradation à partir de MOE.

Chapitre 3

Objectifs et structures de la thèse

3.1 Objectifs de la thèse

Ce travail de thèse a pour objectif général **l'évaluation du niveau de dégradation du bois dans les ouvrages de protection en bois par spectroscopie proche infrarouge et analyse vibratoire**. Cet objectif nécessite, au préalable, de définir des indicateurs de référence pour apprécier et comparer les deux méthodes proposées. Les indicateurs de référence Dw_{MOE} et Dw_{MOR}, définis, respectivement, comme le taux de perte en MOE ou en MOR par rapport à leur valeur à l'état intact, seront évalués à partir de tests de flexion quasi-statique.

Au sujet de la SPIR, l'objectif est de **développer une méthode d'évaluation du niveau de dégradation mécanique de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées**. Les spectres en proche infrarouge ne permettent pas d'évaluer directement le niveau de dégradation tel que défini dans ce mémoire de thèse. L'un des sous-objectif est alors de développer des modèles de prédiction des indicateurs de référence par l'intermédiaire d'un protocole de traitement des spectres. Il s'agit notamment de trouver les pré-traitements à appliquer aux spectres pour mettre en évidence les effets de la dégradation, de composer avec la variabilité des propriétés inhérentes au matériau bois et enfin de déterminer les paramètres de traitements optimaux, notamment la gamme spectrale à considérer dans les modèles.

Au sujet de l'analyse vibratoire, l'objectif est de **développer une méthode d'évaluation de la dégradation adaptée à un élément en bois de type rondin et de proposer un indicateur de la dégradation associé**. La question clé est alors d'évaluer les effets de la dégradation microbienne sur les grandeurs caractéristiques de l'analyse vibratoire et d'identifier des indicateurs pertinents. Par ailleurs, les imperfections géométriques des rondins ont une influence sur les grandeurs évaluées par l'analyse vibratoire qu'il convient d'apprécier pour juger de la faisabilité de la méthode.

Enfin, le dernier objectif de ce travail de thèse consiste à **tester les deux méthodes sur des rondins dégradés en conditions naturelles**. Il s'agit par là-même de vérifier l'applicabilité des méthodes pour des rondins dégradés en conditions naturelles et de comparer les niveaux de dégradation des rondins évalués par les deux méthodes.

3.2 Structure de la thèse

Suite à cette introduction générale, le manuscrit de thèse a été décomposé en trois parties (Fig. 3.1).

- La première partie s'intéresse à l'évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par spectroscopie proche infrarouge. Elle

est composée de deux chapitres.Le premier chapitre explore les possibilités de la SPIR à atteindre l'objectif en définissant et testant les grands principes de cette méthode sur des échantillons de section carrée à la variabilité volontairement restreinte. Le second chapitre porte quant à lui sur la généralisation de la méthode définie au chapitre précédent sur des échantillons intégrant une plus forte variabilité.

- La seconde partie s'intéresse à l'évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par analyse vibratoire. Elle est également composée de deux chapitres. Le premier porte sur l'évaluation des effets de la dégradation microbienne sur les grandeurs mécaniques de rondins mesurées par analyse vibratoire. A partir des grandeurs sensibles à la dégradation, des indicateurs du niveau de dégradation sont proposés pour évaluer le niveau de dégradation. Le second chapitre se focalise sur la validation d'un des indicateurs issu du chapitre précédent par comparaison avec l'indicateur de référence Dw_{MOE}.
- La troisième partie concerne l'évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin dégradés en conditions naturelles.

Le manuscrit de thèse se termine par une synthèse de l'ensemble des résultats et des perspectives associées à chacun des champs disciplinaires abordés dans ce travail de thèse.

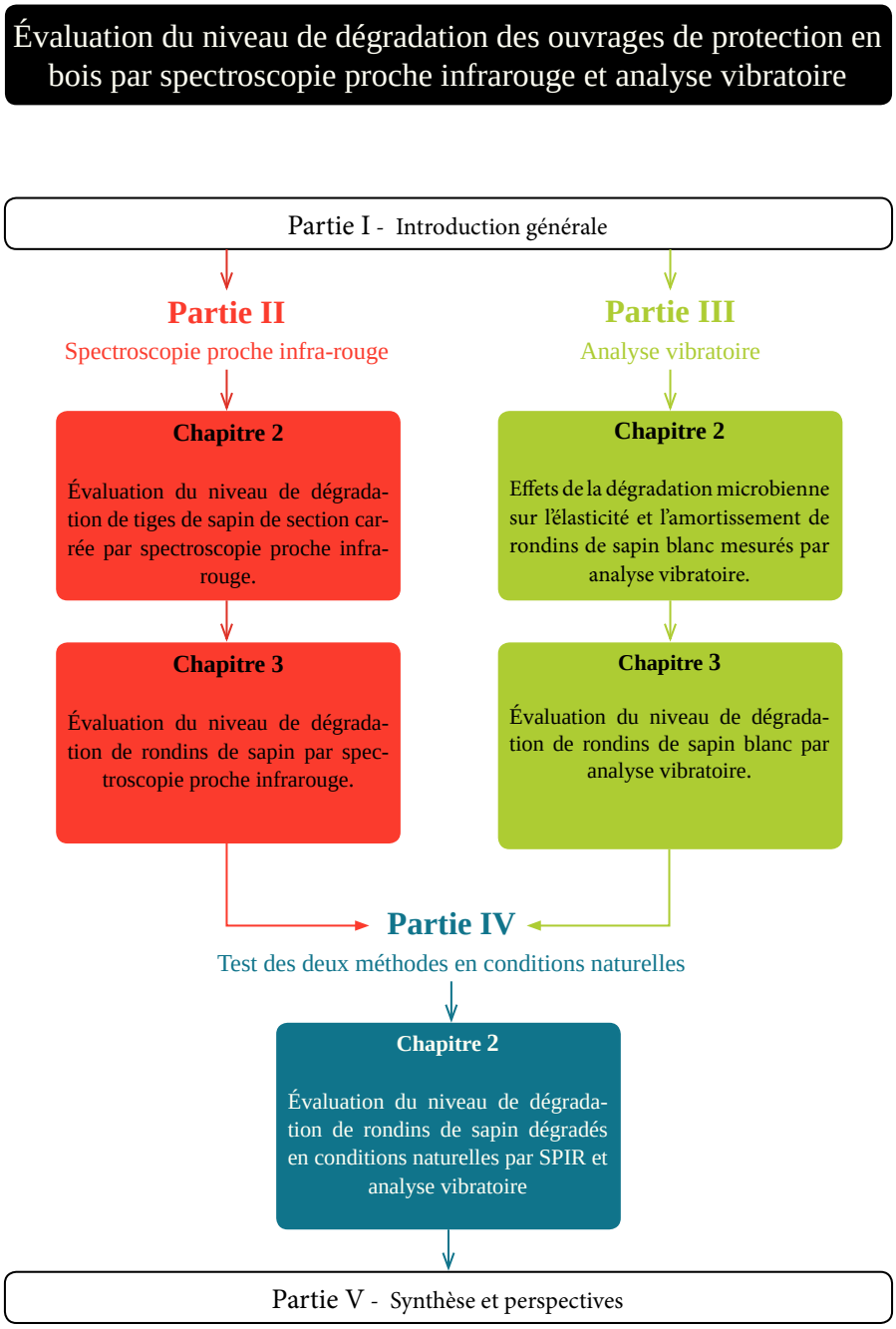
Évaluation du niveau de dégradation des ouvrages de protection en bois par spectroscopie proche infrarouge et analyse vibratoire
Partie I - Introduction générale
Partie II
Spectroscopie proche infra-rouge
Partie III
Analyse vibratoire
Chapitre 2
Évaluation du niveau de dégradation de tiges de sapin de section carrée par spectroscopie proche infrarouge.
Chapitre 2
Effets de la dégradation microbienne sur l'élasticité et l'amortissement de rondins de sapin blanc mesurés par analyse vibratoire.
Chapitre 3
Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin par spectroscopie proche infrarouge.
Chapitre 3
Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc par analyse vibratoire.
Partie IV
Test des deux méthodes en conditions naturelles
Chapitre 2
Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin dégradés en conditions naturelles par SPIR et analyse vibratoire
Partie V - Synthèse et perspectives

FIGURE 3.1

Chapitre 4

Démarche méthodologie

Ce travail de thèse a comme objet d'étude le matériau bois et fait appel à diverses disciplines scientifiques. Des connaissances en mécanique sont requises tant pour appréhender le fonctionnement structurel des ouvrages que d'évaluer les propriétés mécaniques du matériau. et biologie. Dans une moindre mesure, ce travail fait aussi appel à des connaissances en biologie, pour comprendre le fonctionnement des agents saproxiliques et leurs effets sur le bois, et à des connaissances en chimie appliquée au matériau bois.

Le développement des méthodes SPIR et analyse vibratoire nécessite la mise en place d'expérimentations permettant d'obtenir des échantillons à différents niveaux de dégradation. Parmi les essences utilisées pour la construction d'ouvrages de protection en bois, le sapin blanc (*Abies alba* Mill.) est retenu pour ce travail de thèse. Notre choix se porte volontairement sur une essence peu durable (Tableau 1.1) afin de réaliser plusieurs cycles de dégradation sur la durée de la thèse. Il s'agit par ailleurs d'une essence courante en France, particulièrement dans les régions montagneuses où l'approvisionnement est aisé. Un format d'échantillon a été retenu, autant que possible, pour toutes les expérimentations, à l'exclusion de celles portant sur la phase exploratoire de la méthode SPIR. Le format correspond à des rondins dont les dimensions (diamètre moyen : 80 mm, longueur : 155 cm) sont, pour des raisons matérielles, inférieures à celles utilisées dans les ouvrages de protection en bois. Les échantillons de la phase exploratoire de la méthode SPIR sont de section carrée, pour faciliter la mesure des propriétés mécaniques et présenter des surfaces soumises à une dégradation équivalente quelle que soit leur orientation. Ils sont de petites dimensions (30 mm x 30 mm x 500 mm) afin de respecter les contraintes logistiques, tout particulièrement l'espace disponible sous serre et la capacité du banc de mesures.

Pour les expérimentations de développement des méthodes, les échantillons sont l'objet de mesures par SPIR, analyse vibratoire et flexion statique, à l'état intact puis à l'état dégradé. La cinétique ne faisant pas partie de l'objet d'étude de cette thèse, le processus de dégradation est accéléré artificiellement en plaçant les échantillons dans une serre. La teneur en eau des échantillons est contrôlée et ajusté par arrosage pour être maintenue au-dessus du PSF.

Pour l'expérimentation de comparaison des méthodes, il s'agit d'appliquer les méthodes SPIR et analyse vibratoire sur un même lot d'échantillons dégradés en conditions naturelles. Quatre sites expérimentaux aux conditions micro-climatiques contrastées ont été retenus afin de faire varier les conditions de dégradation. Les mesures sont effectuées à l'état intact puis à l'état dégradé lors de la récupération des échantillons.

Deuxième partie

Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par spectroscopie proche infrarouge

Chapitre 1

Introduction

Contexte et objectifs

La dégradation du bois par une communauté microbienne se traduit au niveau chimique par la dépolymérisation d'un ou plusieurs de ses composants. L'évaluation de cette dégradation peut donc être envisagée via une approche consistant à mesurer les changements de composition chimique. Cette dernière est habituellement mesurée par des méthodes de dosages mettant en œuvre des procédés chimiques (Rowell, 2012). Ces procédés permettent au minimum de mesurer les teneurs en lignine, cellulose et hémicellulose. Ces méthodes ne sont cependant pas adaptées au contexte du diagnostic d'ouvrages de protection en bois, notamment en raison du temps nécessaire pour effectuer les mesures. La spectroscopie proche infrarouge (SPIR), associée aux statistiques multivariées, constitue une alternative rapide et précise à ces méthodes. La SPIR a ainsi été étudiée pour prédire la teneur de chacun des composants du bois (Schwanninger et al., 2011b; Schwanninger et al., 2011c; Poke et al., 2006). Elle a par la suite été employée pour caractériser les effets de la dégradation sur le bois (Fackler et al., 2010) mais aussi pour quantifier la dégradation (Ishizuka et al., 2012; Fackler et al., 2007c; Green et al., 2010b). Les études portant sur la dégradation du bois et son évaluation par la SPIR sont basées sur des expérimentations en conditions contrôlées. La dégradation est obtenue à partir de champignons déterminés de types pourritures blanche ou brune. La question se pose alors sur la généralisation des connaissances pour une dégradation obtenue en conditions semi-contrôlées sous serre en présence d'une communauté microbienne. Par ailleurs, la quantification évoquée dans les études précitées reste exclusivement chimique. Or, les indicateurs de référence du niveau de dégradation Dw_{MOE} et Dw_{MOR} définis dans le cadre de ce travail de thèse sont basés sur les propriétés mécaniques du bois (Chapitre I.3). Cette contrainte reste toutefois compatible avec l'usage de la SPIR. Des études ont en effet révélé le potentiel de la SPIR pour estimer les propriétés mécaniques du bois (Tsuchikawa, 2007).

Il convient dès lors de savoir si le niveau de dégradation mécanique d'un rondin de bois, de sapin blanc dans le cas de ce travail de thèse, dégradé en condition semi-contrôlées peut être évalué à partir de la spectroscopie proche infrarouge ?

L'objectif de cette première partie de la thèse est de développer une méthode d'évaluation du niveau de dégradation mécanique de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées en utilisant la SPIR. Dans un premier temps, il s'agit de convenir d'un type de traitements à appliquer aux spectres pour mettre en évidence les effets de la dégradation, et de développer une méthode d'évaluation du niveau de dégradation basée sur des modèles de prédiction des indicateurs de référence Dw_{MOE} et Dw_{MOR} (Chapitre II.2). Dans un second temps, il est nécessaire de généraliser les résultats obtenus précédemment en prenant en compte la variabilité du matériau bois et en appliquant la méthode à des rondins tout en restant en conditions

semi-contrôlées (Chapitre II.3).

Démarche expérimentale

La première étude (Chapitre II.2) vise à explorer les capacités de la SPIR à évaluer le niveau de dégradation de tiges de sapin à partir d'une méthode basée sur des modèles de prédiction des indicateurs de référence Dw_{MOE} et Dw_{MOR}. Les échantillons destinés à la dégradation sous serre sont de faible longueur (500 mm) pour être adaptés au banc de mesure en flexion 3 points. Ils sont de section carrée (30mm x 30mm) pour obtenir une inertie de section constante et des surfaces soumises aux champignons identiques quelle que soit leur orientation. Pour des raisons pratiques, les échantillons ont été prélevés dans une seule grume de sapin blanc provenant des Alpes du Nord françaises. La méthode d'évaluation du niveau de dégradation développée nécessite le calcul d'un *spectre différentiel* défini comme la différence entre le spectre moyen des échantillons intacts, appelé *spectre moyen intact*, et le spectre de l'échantillon dégradé. Deux modèles de prédiction des indicateurs de référence Dw_{MOE} et Dw_{MOR} à partir de spectres différentiels sont calibrés en utilisant la régression des moindres carrés partiels, puis validés à partir d'un jeu de données non pris en compte dans la phase de calibration.

La seconde étude (Chapitre II.3) vise à généraliser la méthode développée au chapitre I.2, d'une part, en intégrant une variabilité géographique dans les échantillons destinés à établir le spectre moyen intact et, d'autre part, en appliquant la méthode à des rondins de sapin issus de plusieurs individus différents. Pour cela, le spectre moyen intact est calculé à partir de 125 échantillons de sapin blanc prélevés par carottage sur des sapins de 5 placettes forestières des Alpes du Nord françaises. Les échantillons destinés à la dégradation sous serre sont issus de 100 sapins blancs de petits diamètres. Leurs dimensions ont été fixées à 155 cm de longueur et 6 à 11 cm de diamètre. Ces dimensions sont issues du compromis entre l'espace disponible dans la serre, les moyens de transports et le type de section mis en œuvre dans les ouvrages bois. Les mesures des propriétés mécaniques ont été réalisées par flexion quasi-statique quatre points, conformément à la norme EN 408 portant sur la détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques des bois de structures (CEN, 2003). Le processus de calibration/validation des modèles de prédictions de Dw_{MOE} et Dw_{MOR} est identique à celui du chapitre II.2.

Partie II

Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par spectroscopie proche infra-rouge (SPIR)

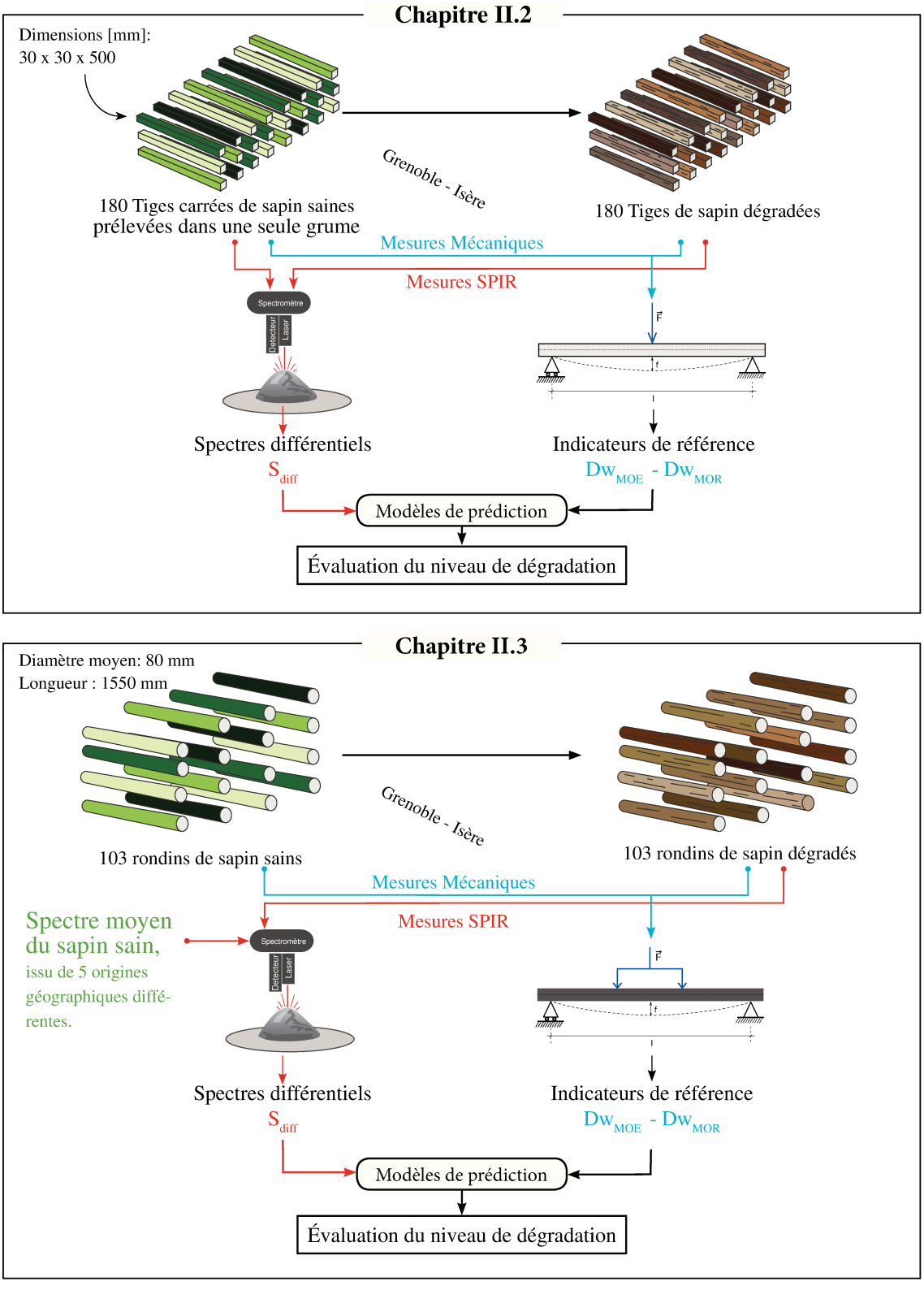

FIGURE 1.1

Chapitre 2

Évaluation du niveau de dégradation de tiges de sapin de section carrée par spectroscopie proche infrarouge

Predicting mechanical degradation indicators of silver fir wooden strips using near infrared spectroscopy.

Barré J.B., Bourrier F., Cécillon L., Brancheriau L., Bertrand D., Thévenon M.F., Rey F.

Article accepted for publication in *European journal of wood and wood products.*

Abstract The management of ecological engineering structures making up a timber structure requires periodical evaluations, including the level of decay of the constituent parts of the timber structure. Methods exist to measure the level of decay in the laboratory or in the field. However, they are rarely appropriate to the conditions of ecological engineering structures, or give partial information. The aim of this study was to predict two mechanical degradation indicators (Dw_{MOE} and Dw_{MOR}) of silver fir (*Abies alba*) wooden strips during microbial decomposition using near-infrared spectroscopy (NIRS). For 1.5 years, we monitored the degradation of 180 squared wooden strips, 30 mm wide and 500 mm long, buried in a greenhouse near Grenoble, France (Altitude : 200 m). Dw_{MOE} and Dw_{MOR} were set from the normalized losses in modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR), two mechanical properties classically used for timber-structure design. A calibration set of 109 samples was selected to build two separate predictive models of Dw_{MOE} and Dw_{MOR} using partial least square regression. The NIR-based models applied to a validation set of 47 samples indicated good prediction performance. The model has a root mean square error of prediction (RMSEP) of 0.15 and a coefficient of determination (r_p^2) of 0.79. The Dw_{MOR} model has a RMSEP of 0.13 and a r^2-value of 0.91. These results highlight the considerable potential of NIRS in assessing the extension of decay in wooden logs.

Keywords decayed wood, modulus of elasticity, modulus of rupture, microbial decomposers, timber structures

2.1 Introduction

Ecological engineering structures, such as wooden check dams and timber log crib walls, are structurally based on timber structures. These structures, made from a framework of logs, require

specific attention since wood may be degraded by a microbial community composed of a variety of micro-organisms or insects. In wet conditions, the most efficient ones are the wood-rotting Basidiomycetes (brown and white rots), Ascomycetes (soft and white rots) and Deuteromycetes (soft rot) that use the wood's chemical components for their nutrition. This results in losses in wood strength and stiffness with potential risk for the structure's integrity. For that reason, practitioners have based their field investigations mainly on direct or indirect density measurement such as resistance drilling or penetration methods (Kasal et al., 2011; Mäkipää et al., 2011) and visual inspections. However, wood has already lost significant strength when fungi effects become visible and the mass loss is quantifiable (Wilcox, 1978). Alternative approaches used, for example, on time-domain reflectometry water content (Previati et al., 2012) and stress-wave measurement (Dackermann et al., 2013) provide experts with more relevant information. These approaches are based on the *in-situ* measurement of wood decay indicators such as mass loss, hardness loss and mechanical property variations.

Specific gravity is a widely used indicator to quantify the extent of fungal attack. However, strength (Haines et al., 1996) and stiffness (Przewloka et al., 2008) losses are more suitable indicators at the early stage of decay (Curling et al., 2002a). The fungi actually alter the lignocellulosic matrix by various mechanisms (Blanchette, 1995), and therefore the mechanical properties (Rowell, 2012). Mechanical properties are all the more important since structural design according to the Eurocode 5 standard (CEN, 2005) is based on these properties. Thus, the modulus of elasticity (MOE) and the modulus of rupture (MOR) are of interest both for structural design and to define decay indicators. However, MOE and MOR remain impossible to measure *in-situ* using classical methods because a bench test is necessary. An alternative solution lies in the use of the near infrared spectroscopy (NIRS) applied to milled cores sampled on structure parts to predict changes in MOE and MOR.

Functional groups of the wood molecules submitted to an electromagnetic radiation vibrate and absorb a part of the radiation. NIRS (wavelengths from 800 to 2500 nm) measures this absorbance or reflection depending on the device used. The returned spectrum is analysed statistically to extract the meaningful information. The spectral data are often used to build predictive models of variables characterizing the data set. Previous studies (Tsuchikawa et al., 2013) have shown that MOE and MOR could be predicted from near infrared (NIR) spectra using multivariate statistics. Kelley et al. (2004) obtained not only accurate predictions of these mechanical properties for solid loblolly pine (*Pinus taeda*) samples, but also, of their chemical compounds, *i.e.* lignin, glucose, mannose and extractives. Sandak et al. (2015a) also reported that NIRS has been used to investigate degradation in wood structural members. Fackler et al. (2007b) analysed chemical changes due to the fungal activity. Green et al. (2010a) predicted levels of degradation in southern pine (*Pinus spp.*). Kelley et al. (2002) detected the chemical changes associated with brown-rot biodegradation of spruce wood. However, they inoculated samples with only one fungus at a time and stored them in an incubator controlling humidity and temperature. On the contrary, wood inoculated with a microbial community has never been studied by NIRS to assess the level of decay.

The aim of this study was to assess the decay extent of silver fir wooden strips degraded by a microbial community using NIRS in semi-controlled conditions. First, the level of decay was defined from two degradation indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR}. They were set from the normalized losses in MOE and in MOR, respectively, between intact and decayed states. Then, partial least square regressions were performed between spectra and Dw_{MOE} or Dw_{MOR} to establish a predictive model of these indicators.

(a) (b) (c)

FIGURE 2.1 – Successive steps of sample installation in the greenhouse.(a) intact samples divided into series ;(b) samples covered with the first layer of woody debris ; (c) samples covered by the second layer of soil.

2.2 Materials and Methods

Wood samples preparation

As intra-tree mechanical properties variation is greater than inter-tree variation (Gonzalez-Rodrigo et al., 2013), a single freshly-cut log of European silver fir (*Abies alba* sp.) was selected to supply the 209 samples (600*30*30mm). No specific attention was paid to defects such as knots. Two pieces sized 50*30*30 mm were collected from each sample : one for moisture content (MC) measurement and the other for NIRS acquisition. The residual pieces sized 500*30*30 mm were used for mechanical tests (intact state), then for the degradation process.

The degradation process took place inside a greenhouse between March, 2013 and October, 2014 in Grenoble, France (Fig. 2.1a). The progression of decay was assumed to be heterogeneous in the cross-section and in the longitudinal direction. Nevertheless, the samples have been buried to limit the influence of heterogeneous fungal growth in the longitudinal direction compared to stakes in the field test according to the EN 252 standard (CEN, 2014). One hundred and eighty of the 209 samples were buried with two layers of different materials. The first layer was made of decayed silver fir debris collected in a silver fir forest stand. This layer included an appropriate fungal community, that already has been active (Fig. 2.1b). The second is a 5-cm local soil layer (Fig. 2.1c). The only controlled parameter during the degradation process was the MC of the samples, which was kept by soil humidification above the fibre saturation point (FSP), *i.e.* 29% according to the Tropix database (Cirad, 2015). The resistive wood moisture sensor "Humitest Timb plus" (Domosystem) was used to check MC *in-situ*. The 29 remaining samples were used to be mechanically tested until rupture at the intact state.

In the greenhouse, the samples were divided into six sets of 30 samples. The sets were successively removed from the greenhouse after 44, 73, 112, 149, 178 and 505 days. The decayed samples were prepared for similar measurements as for the intact state : for each sample, two pieces sized 50*30*30 mm were collected for NIRS and density measurement. The residual sample,sized 400*30*30 mm, was kept for the mechanical test. Each sample was cleaned of soil and mycelium by careful brushing before measurement.

Measurement of moisture content and mechanical properties

Measurement of the MC and mechanical properties was based on the assumption that they were equally distributed within the entire specimen. The MC of the samples was calculated for both intact and decayed pieces (Eq. 2.1). The oven-dry weight (W_0) was measured after sample

drying until weight stabilization using a Memmert oven set at 103.5°C .

$$MC = [(W_h - W_0)/W_0] * 100 \tag{2.1}$$

where W_h is the wet weight.

MOE and MOR were measured using three point bending tests shortly after taking the samples from the greenhouse so that the variation in MC could be ignored. The cross-head loading velocity for all measurements was 2 mm/min to remain in quasi-static conditions. The MOE was calculated in the initial linear part of the load-deflection curve using equation 2.2. For practical reasons, the span-to-depth ratio was limited to 13.33 for intact samples and 10.67 for decayed samples. As a consequence, the measured deflection f included both bending and shear effects. In this case, the calculated MOE corresponded to an *apparent* modulus of elasticity.

$$MOE = \frac{F.L^3}{48.f.I_G} \tag{2.2}$$

where F is the applied force, L the length between the two supports, f the deflection of the sample corrected by the indentations at the supports and the head-load, and I_G the moment of inertia of the cross section.

The MOR is defined from the maximum load supported by the sample using Eq. 2.3 (Dinwoodie, 2000b).

$$MOR = \frac{3.F_{max}.l}{2.b.h^2} \tag{2.3}$$

where F_{max} is the maximum applied force, l the length between the two supports, b the sample width, h the sample height.

From these two properties, we defined two mechanical indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR} depending on each sample's rate of degradation. They are considered as reference values used to build the predictive models. Dw_{MOE} is the normalized loss in the MOE of the same sample between intact and decayed states (Eq. 2.4).

$$Dw_{MOE} = \frac{MOE_i - MOE_d}{MOE_i} \tag{2.4}$$

where MOE_i and MOE_d are the MOE of a sample at intact and decayed states, respectively.

Dw_{MOR} is the normalized loss in the MOR. The MOR cannot be evaluated at intact and decayed states for the same sample because it has to be brought to failure to measure the MOR. Thus, the MOR of a set of 29 samples, randomly selected amongst 209 and not buried in the greenhouse were measured and averaged into one MOR^*_i value. Dw_{MOR} was next calculated for each sample according to Eq. 2.5.

$$Dw_{MOR} = \frac{MOR^*_i - MOR_d}{MOR^*_i} \tag{2.5}$$

where MOR^*_i is the mean MOR of 29 samples in the intact states, MOR_d the MOR of the sample in the decayed state.

This definition of the indicators based on normalization allows one to limit the shear effect assuming that it remains the same, whatever the level of decay. Furthermore, given that the samples's MC was kept above FSP by watering, we assumed that MC differences had no influence on the mechanical properties and consequently on the indicators (Dinwoodie, 2000a).

Near infrared spectroscopy measurements

A piece of each intact or decayed sample, a transversal slice measuring 50*30*30 mm, was collected for the NIRS measurement and dried 12 h in an oven set at 40°C to ease the grinding. In the next step, these cut off parts of the samples were milled to a fine powder (0,25 mm) in a Retsch ZM 200 mill. They were ground to reduce the spatial heterogeneity of wood properties existing in intact wood and reinforced by the fungal colonization (Schwarze, 2007). The powder was dehydrated again for 12 h in an oven to limit the adverse effect of water during spectrum acquisition. *Intact NIRS-sample* refers to the powder obtained from an intact sample and *intact spectrum* to the corresponding infrared spectrum. Likewise, the powder obtained from the decayed sample was called *decayed NIRS-sample* and its spectrum *decayed spectrum*. The NIRS measurements were taken using a diffuse reflectance module with the Thermo Scientific Antaris 2 FT-NIR analyser. This instrument records the absorbance in the spectral region [3999, 10001 cm^{-1}] at a resolution of 4 cm^{-1}. The spectra are thus composed of 1557 wavenumbers. With the same parameters, spectra were acquired from cellulose and lignin kraft extracted from *Pinus pinaster sp.* samples to ease spectrum interpretations.

Spectral data treatments

The information contained in the spectra were highlighted by specific treatments. All data processing was done using R software (R Core Team, 2013). The spectra were managed using the *hyperSpec* package (Beleites et al., 2012). The pre-processing step followed recommendations of Rinnan et al. (2009) for limiting the scattering effect usually observed with milled samples and adjusting the baseline shifts between samples. A single pre-processing step was performed on the spectra to limit the model's complexity. The spectra were adjusted by a de-trending method (baseline correction) using the *baseline* package (Liland et al., 2014).

The proposed method aims to assess the level of decay by comparing of intact and decayed spectra. A *differential spectrum* S_{diff} was calculated for each decayed sample from the difference between a *mean intact* spectrum, the average of all intact spectra, and the spectrum of a decayed NIRS-sample (Eq. 2.6). This methodology was selected for two reasons. Firstly, it was considered that intact spectra would not be available throughout real structure investigations. The proposal aims to consider the *mean intact* spectrum to establish a spectral reference for the silver fir samples. Secondly, the saproxylic community present in the greenhouse was potentially highly diverse (Stokland et al., 2012) and was not determined for practical reasons. In particular, the three types of wood-inhabiting fungus (brown, white and soft rots) might be expected. No assumption can be made on a predominantly decayed chemical compound. However, no studies has been published on the effect of the fungal community on NIR spectra. Most NIRS studies of decayed wood have investigated spectral modifications caused by known fungal species in controlled conditions. These species are mainly white or brown rot types (Fackler et al., 2012; Green et al., 2012) and seldom soft rot (Stirling et al., 2007). Hence, it was proposed to highlighted the affected parts of the spectra by means of S_{diff}.

$$abs^{i}_{diff} = abs^{i}_{g.mean} - abs^{i}_{d} \tag{2.6}$$

where i indicates the wavelength, $abs^{i}_{g.mean}$ is the *baseline-corrected* absorbance of the *mean intact* spectrum and abs^{i}_{d} is the *baseline-corrected* absorbance of the decayed sample.

Spectral analysis

The data set exploration started with a principal component analysis (PCA) on the whole spectra. PCA facilitates the understanding of complex data sets with many variables. The partial least square regression (PLSR) was next used to develop predictive models of Dw_{MOE} and Dw_{MOR} from differential spectra. PLSR is a multivariate regression method used in spectroscopy because it is adapted when collinear variables are used (Wold et al., 2001). Sandak et al. (2015c) referred to several studies using PLSR in a quantitative manner in decayed-wood investigations. The process of model construction was divided into calibration and validation phases (Fig. 2.2).

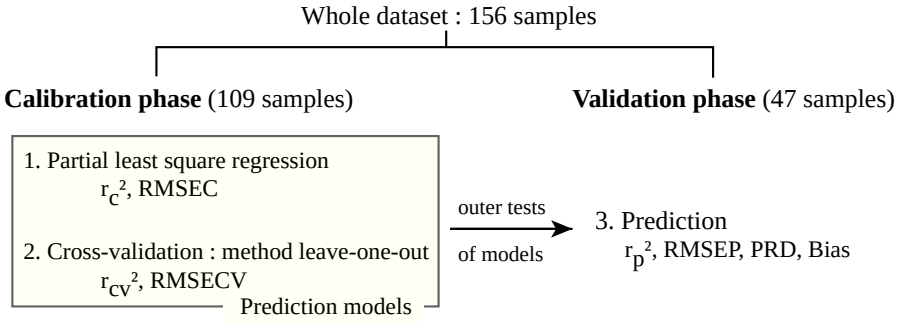

FIGURE 2.2 – Details on the validation process of the predictive models.

The *validation phase* consists of applying the PLSR function from the *pls* package (Mevik et al., 2013) on a calibration set of 109 samples using the Kennard-Stone algorithm, as implemented in the *soil.spec* package (Sila et al., 2013). In this phase, the models were internally validated by the leave-one-out (LOO) cross-validation method. The quality of the PLSR models was assessed using the coefficient of multiple determination r_c^2 and the root mean squared error of calibration (RMSEC), *i.e.* the residuals of the calibration data. Likewise, the results of the cross validation has been characterized by r_{cv}^2, the root mean squared error of cross-validation (RMSECV)(Mevik et al., 2004). The *validation phase* corresponded to outer tests with a validation data set of 47 samples separated from the calibration set. It consists of applying the model calibrated in the previous phase to the validation set in order to predict the two indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR}. The predictive ability of the model is evaluated by the coefficient of determination r_p^2, the root mean squared error of prediction (RMSEP), the ratio of performance to deviation (RPD), calculated as the ratio of the standard deviation of the reference data to the RMSEP (Schimleck et al., 2003), and the bias, calculated as the difference of the mean of the predicted values versus the mean of the true values (Bellon-Maurel et al., 2010). The value of the bias should be close to 0 for accurate calibration.

Wavelength selection

Following the recommendations of Schwanninger et al. (2011a), the spectral range was reduced to improve the model's performance. The principle adopted consisted in retaining regions where differences between decay and the *mean intact* spectra were considered high. For this purpose, a process in two-step process was developed. Firstly, the standard deviation (SD) of absorbances abs_{diff}^{i} among the different S_{diff} spectra was calculated for each wavelength. Only the wavelengths corresponding to SD larger than a threshold value SD_{lim} were kept in the PLSR. Secondly, an iterative test was developed to determine the best wavelength range, *i.e.* those that minimize RMSEP. Thus, different thresholds were tested by varying SD_{lim} from 0 to the optimal SD_{lim}, which corresponded to the lower RMSEP. Furthermore, the laboratory climate was not full-controlled and dried-wood samples are very hydrophilic. Thus, the wavelengths associated with water (5150 to 5220 cm^{-1}, 5051 cm^{-1}, 7073 cm^{-1}) were removed from the analysis, even if

they corresponded to wavelengths associated with OH-bonds of wood compounds (Schwanninger et al., 2011a). OH-bonds are nevertheless related to other wavelengths, in particular those from 4620 to 4890 cm^{-1}, where spectra variations due to fungi were observed (Sandak et al., 2013).

2.3 Results and discussion

The aim of this study was to quantify the level of decay of silver fir strips degraded by a fungal community using NIRS. For this purpose, reference indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR} were defined from MOE and MOR measured in the intact and decayed states. The intact wooden strips were buried in a greenhouse for a period of 44-505 days. After the decay process, the evidence of fungal activity was visually observed at the surface of the samples. Mycelium was noted on all samples with variable intensities in terms of spatial distribution (Fig. 2.3). Small cracks were present on the most severely decayed samples. The slicing of samples made it possible to visually ascertain that discolourations were present inside the wood to a variable extent. It was assumed that fungi penetrated wood a short time after inoculation.

(a) (b)

FIGURE 2.3 – (a) Mycelium observed on the surface of a sample degraded for 73 days. The tape measure is in centimetre. (b) The mycelium may have a higly variable spatial extent. Sample degraded for 112 days.

2.3.1 Mechanical degradation indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR}

For the 109 samples of the calibration set, the mean MOE was 8211 MPa (*i.e* N/mm^2) (SD,951 MPa ; Table 2.1). The mean MOR, calculated from 29 of the intact samples, was 41.9 MPa (SD,7.0 MPa). The mean MC was 106%, always greater than 30%. For the 47 samples of the validation set, the mean MOE was 8172 MPa (SD,829 MPa). The mean MC was 113%. For decayed samples, the mean MOE was respectively 3889 MPa and 2966 MPa (SD, 2191 MPa and 2486 MPa) for the calibration and validation sets, respectively. The mean MOR was 30.1 MPa and 23.9 MPa (SD, 14.2 MPa and 17.1 MPa), respectively, for the calibration and validation sets. For the last series (*i.e.* 505 degradation days, 25 samples), the MOE and MOR were set at 0 MPa because the samples were too degraded to be tested using bending tests and could easily be broken by hand. The MOE and MOR were correlated in the intact and decayed states (Fig. 2.4). Indeed, an increase in MOE induces an increase in MOR. Assuming a linear relationship between these two variables gives coefficients of determination r^2 of 0.72 and 0.86 respectively.

TABLE 2.1 – Physical and mechanical measurements and indicators of the level of decay. Range and standard deviation (SD).

	Calibration set. n=109				Validation set. n=47			
Wood property	Mean	Min.	Max.	SD	Mean	Min.	Max.	SD
Intact samples								
Moisture content (%)	106	32	179	44	113	35	181	47
MOE_{intact} (MPa)	8211	5672	10275	951	8172	5792	9460	829
MOR_{intact} (MPa)*	41.9	28.3	56.6	7.0	-	-	-	-
Decayed samples								
Moisture content (%)	104	42	175	37	106	47	170	35
MOE_{decay} (MPa)	3889	0	9001	2191	2966	0	6905	2486
MOR_{decay} (MPa)	29.8	0	53.3	14.2	23.9	0	49.9	17.1
Indicators								
Dw_{MOE} (-)	0.52	0.06	1	0.27	0.64	0.13	1	0.30
Dw_{MOR} (-)	0.29	-0.27	1	0.34	0.43	-0.19	1	0.42

* : Measured for 29 intact samples.

The MOE and MOR measurements in decayed conditions were skewed by the heterogeneity of fungal decay visually observed in the cross-section given that equations 2.2 and 2.3 were defined assuming an isotropic material. It gave coherent values from a decay-assessment perspective however. Thus, the degradation process tested in the greenhouse provided a large data set of 156 Dw_{MOE} and Dw_{MOR} values (Fig. 2.5). Regarding Dw_{MOR}, 28 negative values ranging from -0.27 to 0 (mean of negative Dw_{MOR} : -0.09) were observed as the MOR of decayed samples was compared to a mean MOR of intact samples. This is in particular the consequence of the MOR's variability rated at 9 MPa (SD for silver fir - Tropix 7). From a mechanical point of view, both indicators have different meanings and appear to be complementary in the context of timber structure design and monitoring. Dw_{MOE} is related to the bending stiffness and therefore linked to wooden beam deformation. Dw_{MOE} could therefore be used to assess a capacity of deformation before rupture. Dw_{MOR} is related to the bending strength and thus to the material rupture.

2.3.2 Near-infrared spectra

Spectrum exploration using PCA performed with all wavenumbers showed a separation between intact and decayed NIRS-samples (Fig. 2.7a). The first component (PC1) loadings (Fig. 2.7b) were characterized by three main peaks (around 4502, 5361 and 7577 cm^{-1}) corresponding to wavenumbers where *baseline-corrected* absorbances are extremely low (Fig. 2.6). These three peaks were also observed on the second component (PC2) loadings (4995, 5331 and 5390, 7553 and 7658 cm^{-1}). The PC2 pointed to a lesser extent to five other wavenumbers : 4142, 4870, 5022, 5770, 9045 cm^{-1}. PCA performed only on decayed NIRS-samples showed a graduation of Dw_{MOE} (Fig. 2.8a) or Dw_{MOR} (Fig. 2.8b) visible along PC1 axes.

The *mean intact* and *decayed* spectra followed the same pattern but *decayed* spectra had lower *baseline-corrected* absorbance values on the whole NIR spectral range (4000-10,000 cm^{-1}) (Fig. 2.6).

The findings of this study confirm that NIRS spectra contain relevant information regarding the microbial activity in wood, even at the early stage. The first feature highlighted by PCA (Fig. 2.7a) is a difference between the spectra of intact and decayed samples, whatever the duration of decay. This is also observed on the spectrum plot (Fig. 2.9). The loss in *baseline-corrected*

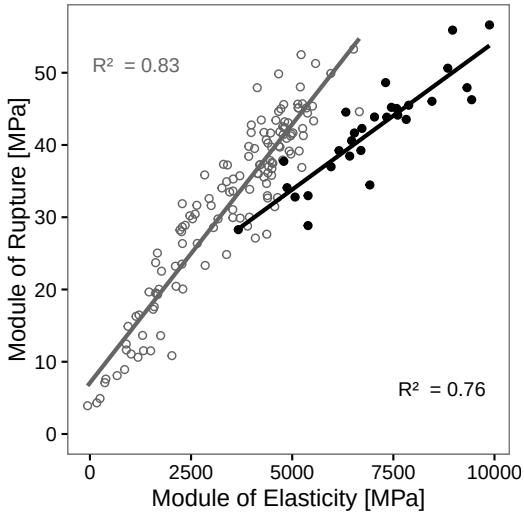

FIGURE 2.4 – Relationship between the MOE and MOR in intact (black points) and decayed (grey points) states.

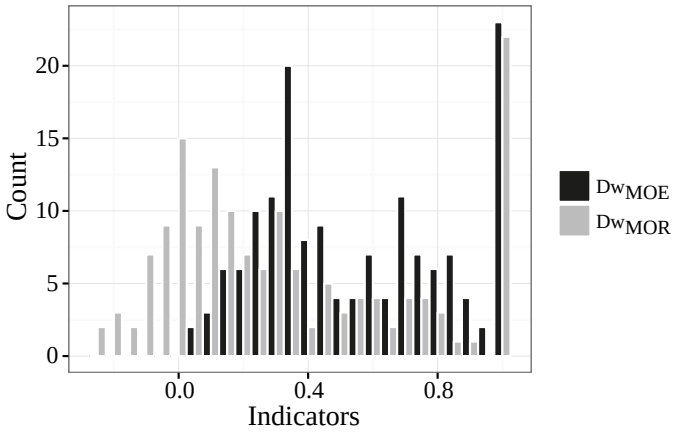

FIGURE 2.5 – Distribution of the *mechanical degradation* indicators Dw_{MOE} (dark) and Dw_{MOR} *(grey)*.

absorbance of decayed spectra compared to the intact spectra is visible in regions associated with cellulose (peaks 5865 and 6727 cm^{-1}) or lignin (peaks, 6875 and 5972 cm^{-1}) (Schwanninger et al., 2011a). Similar observations have been described with different wood species decayed by brown or white rots (Fackler et al., 2007a; Sandak et al., 2013), remembering that soft rot may be involved in our experiment given that the samples were subjected to a microbial community. This constant difference between spectra confirms the value of calculating a differential spectrum that extracts the meaningful spectral information. PCA of decayed NIRS-samples (Fig. 2.8) also distinguishes strongly decayed samples ($Dw_{MOE} > 0.75$ and $Dw_{MOR} > 0.75$) from samples that are less decayed along the PC1 axis. PCA is, however, limited for further investigation because of an aggregation of less decayed NIRS-samples. PCA loadings (Fig. 2.7b) reveal no specific wavelength except one associated with OH-bonds (peak, 5021 cm^{-1}) and others where *baseline-corrected* absorbance is low (peaks, 4502, 5361, 7577 and 9036 cm^{-1}).

The differential spectra provide evidence of some spectral regions where differences between the mean intact spectrum and decayed spectra are of interest (Fig.2.11). Nevertheless, these regions are distributed all along the NIR range. PLSR performed on the whole NIR range should be sufficient to assess decay, as other studies did (Stirling et al., 2007; Leinonen et al., 2008;

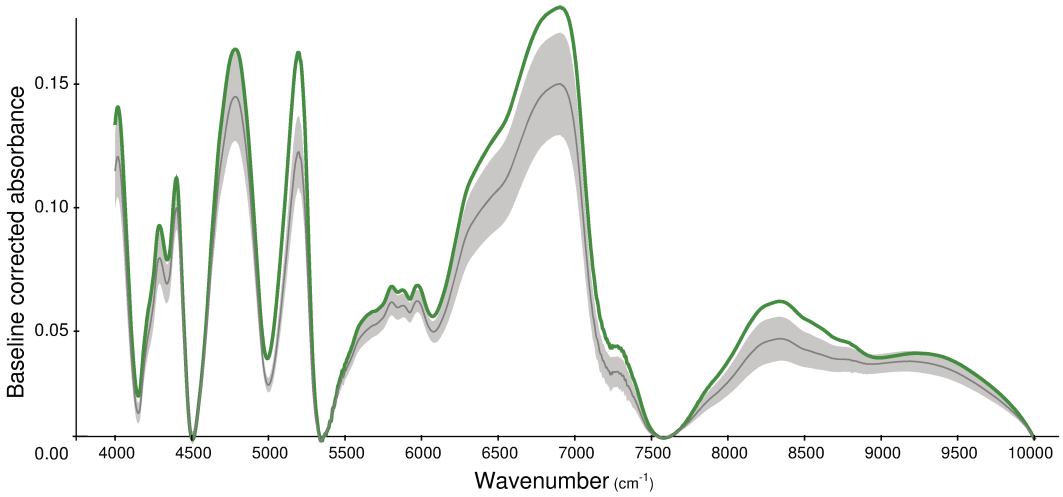

FIGURE 2.6 – Mean intact spectrum (green thick line) and the mean decayed spectra (grey line) with the ribbon that represents the absorbance standard deviation.

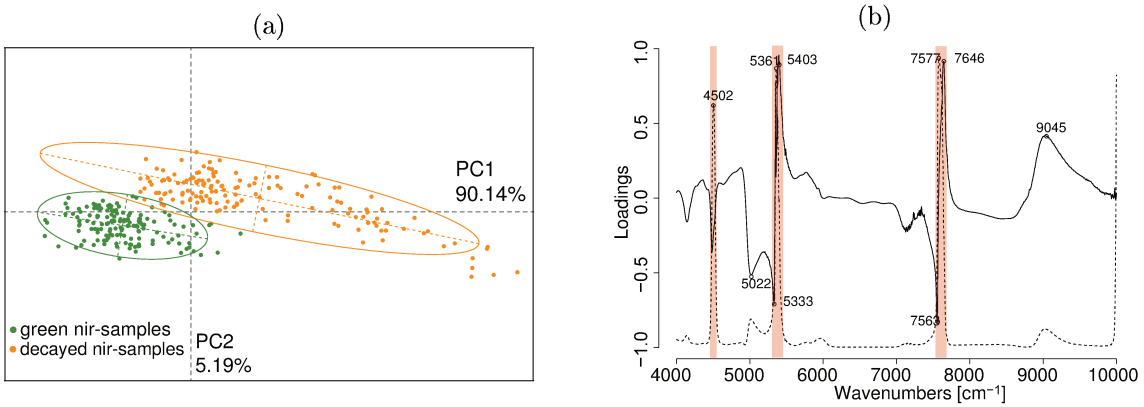

FIGURE 2.7 – (a) Principal component analysis of the baseline-corrected spectra of intact and decayed samples. The ellipses graphically summarize the point clouds. (b) Loadings of the first two principal components (dashed and black lines, respectively). The red ribbons correspond to ranges where *baseline-corrected* absorbance is null.

Green et al., 2012). But this solution would not be optimal according to Nadler et al. (2005) and Cecillon et al. (2008)'s suggestions that prescribe wavelength range reduction to decrease the root mean square error of PLSR. This motivated the development of the wavelength selection method presented in this study.

2.3.3 Prediction of mechanical degradation indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR} using the PLSR of differential spectra

Wavelength selection. The optimal SD values to determine wavenumbers ranges optimizing the PLSR are 0.0062 (Dw_{MOE}) and 0.0055 (Dw_{MOR}) (Fig. 2.10). Figure 2.11 presents the different spectral ranges kept for the PLSR. In both cases, six similar ranges were selected. Amongst the six regions identified, regions 2, 3, 4 and 5 of both models (Fig. 2.11) had similarities to those obtained by other research on decay effects on wood spectra. Fackler et al. (2007c) found the best regression for weight loss of brown rotted beech wood in the NIR region (7235-6106 cm^{-1} and 5384-4150 cm^{-1}). They reported that this model was not applicable for white rot fungi.

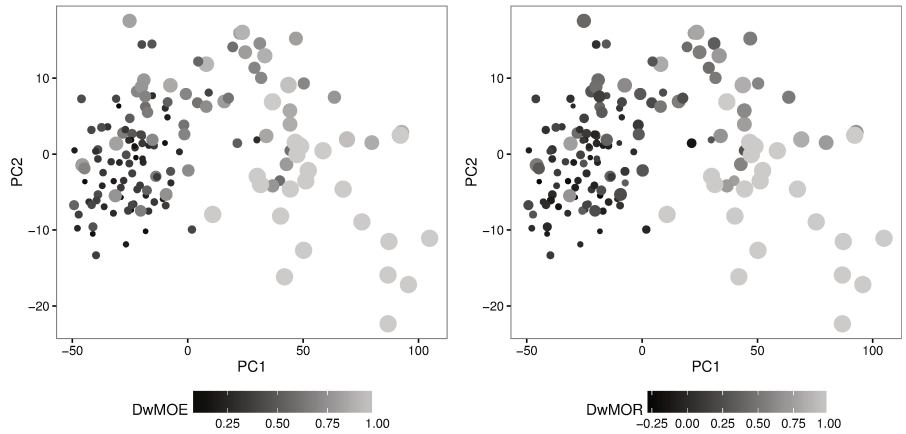

FIGURE 2.8 – Principal component analysis of the baseline-corrected spectra of decayed samples. Colors and sizes are a function of the level of decay according to Dw_{MOE}(a) and Dw_{MOR} (b)

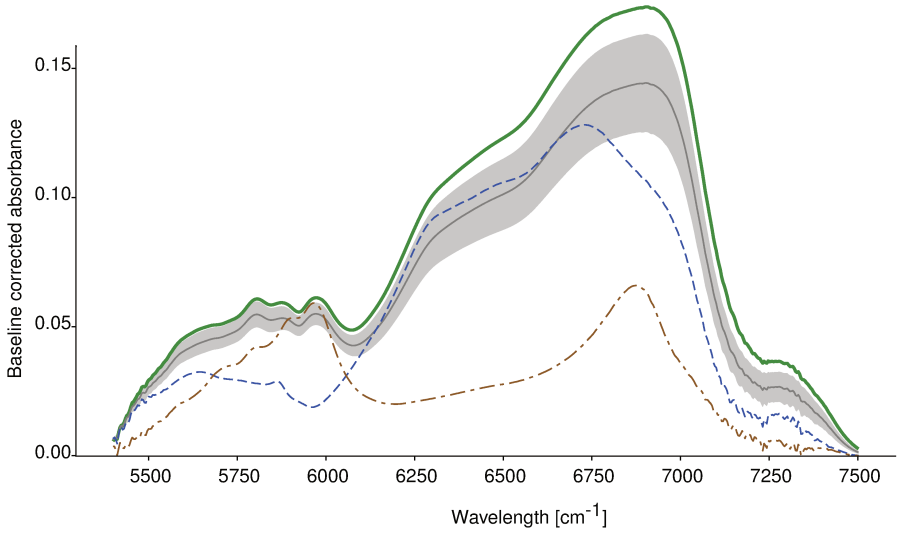

FIGURE 2.9 – Mean spectra of intact (green thick line) and decayed (dark gray line) silver fir samples. The ribbon corresponds to the standard deviation of decayed sample absorbance. The cellulose spectrum is in blue (dashed line) and the lignin kraft spectrum in brown (dotted dashed line).

(Ishizuka et al., 2012) retained 4050-5000 cm^{-1} and 5800-6800 cm^{-1} for PLSR to predict lignin and cellulose contents. The main difference between the two studies and the results presented herein remains in the (5800-6000 cm^{-1}) region associated with lignin and identified as being important in case of white rot. This range was not included in region 5, which starts at 6163 and 6144 cm^{-1} for Dw_{MOE} and Dw_{MOR}, respectively. We concluded that lignin might be less affected than polysaccharides by the fungal community involved. In natural conditions, the composition of the fungal community changes over time and depends on early established and long-lived species (Ottoson, 2013). Thus, further investigations of the method on various fungal communities in natural conditions would be highly valuable.

PLSR models. With these spectral ranges, two PLSR models were developed from differential spectra S_{diff} to predict Dw_{MOE} or Dw_{MOR}. The results obtained after the LOO validation were significant with RMSECV of 0.16 for both indicators and r_v^2 of 0.63 and 0.77 for Dw_{MOE} and Dw_{MOR} prediction, respectively (Table 2.2). These models applied to the validation set confirm

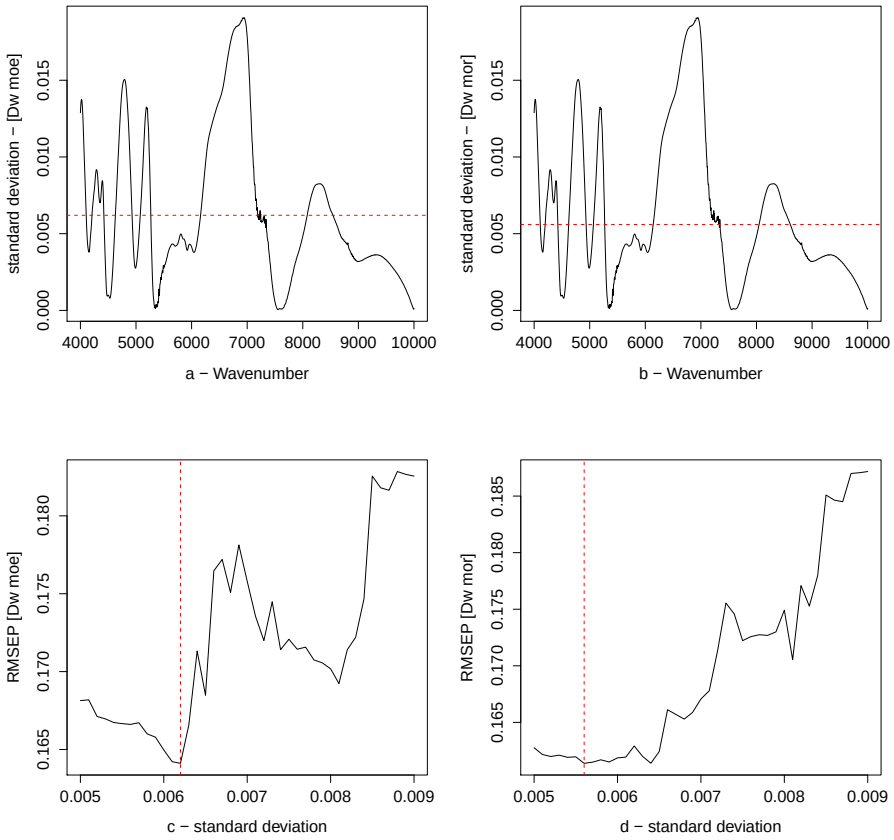

FIGURE 2.10 – Standard deviation of the differential spectra S_{diff} with the optimal SD_{lim} (red dashed lines) for PLSR with Dw_{MOE} (a), and with Dw_{MOR} (b). RMSEP variation is a function of SD_{lim} for Dw_{MOE} (c) and for Dw_{MOR} (d). The red dashed lines correspond to the optimal SD_{lim}, *i.e.* where RMSEP is minimal.

the consistency of the results : to predict Dw_{MOE} and Dw_{MOR}, RMSEP was 0.15 and 0.13, r_p^2 was 0.79 and 0.91, RPD was 2.0 and 3.2, and the bias was 0.032 and 0.036, respectively. The relationships between measured and NIR-predicted values for both indicators and their associated prediction residuals are shown in Fig. 2.12.

TABLE 2.2 – Main model characteristics developed for predicting indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR}.

	Calibration phase - n=109						Validation phase - n=47			
	Calibration			LOO cross-validation			Prediction			
Mechanical indicator	NF	r_c^2	RMSEC	NF	r_v^2	RMSECV	r_p^2	RMSEP	RPD	Bias
Dw_{MOE}	11	0.75	0.14	11	0.64	0.16	0.79	0.15	2.0	0.032
Dw_{MOR}	11	0.85	0.13	11	0.77	0.16	0.91	0.13	3.2	0.036

Notes : NF : number of factors, RMSEC : Root mean squared error of calibration, RMSEC : Root mean squared error of cross validation, RMSEP : Root mean squared error of prediction, RPD : relative percent difference ratio of SD to RMSEP, Bias : the difference of the mean of the predicted versus the mean of the true values.

Our results support previous research (Tsuchikawa et al., 2013) that reported a statistical link between NIRS spectra and mechanical properties using PLSR. However, while most studies work with intact wood, our models establish relationships between NIRS differential spectra S_{diff} and losses in MOE and MOR of decayed wood (Table 2.2). Green et al. (2010b) already

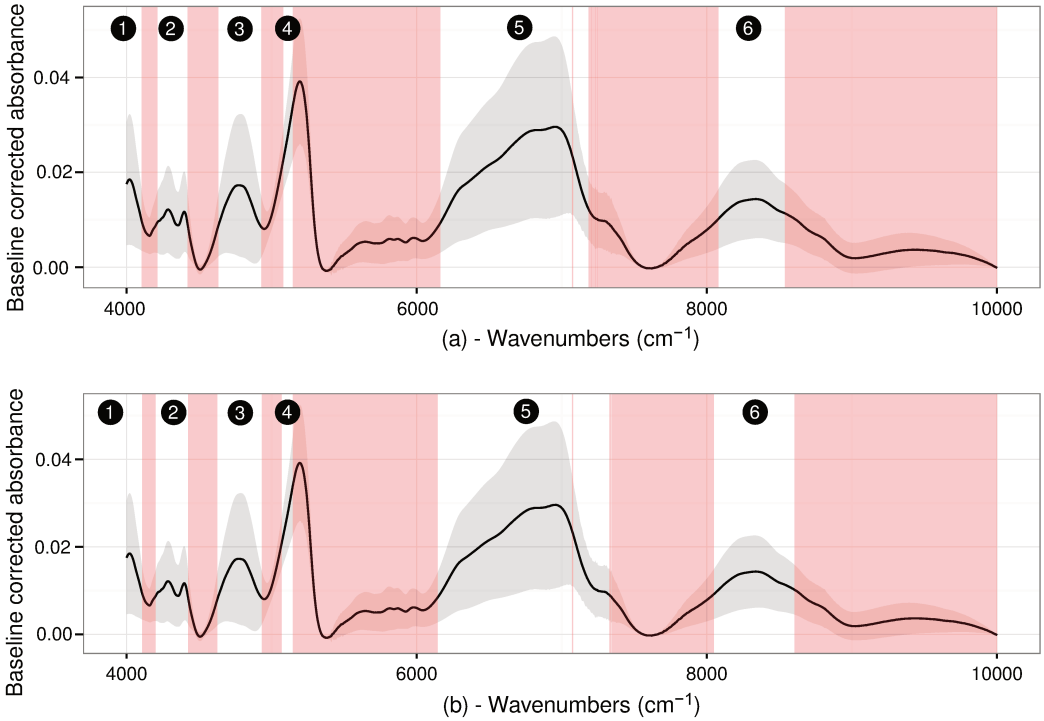

FIGURE 2.11 – Mean spectrum and standard deviation of the differential spectra S_{diff}. The red ribbons show the excluded wavenumbers for PLSR. (a) Dw_{MOE} prediction, range 1 : 3900-4104 cm^{-1}, range 2 : 4211-4420 cm^{-1}, range 3 : 4632-4929 cm^{-1}, range 4 : 5079-5145 cm^{-1}, range 5 : 6163-7243 cm^{-1}, range 6 : 8080-8539 cm^{-1}. (b) Dw_{MOR} prediction. range 1 : 3900-4107 cm^{-1}, range 2 : 4200-4423 cm^{-1}, range 3 : 4624-4933 cm^{-1}, range 4 : 5068-5145 cm^{-1}, range 5 : 6144-7343 cm^{-1}, range 6 : 8079-8604 cm^{-1}.

used NIRS and PLSR to predict the level of decay in wood measured by compression strength in particular. They obtained appreciable results with r_p^2 of 0.69 and RPD of 2.61 (model with raw spectra). While this study showed that NIRS could predict wood decay, it used *Gloeophyllum trabeum*(brown rot type) to inoculate samples. Our study shows similar results (r_p^2 0.79 and RPD 2.0 for Dw_{MOE} prediction. r_p^2 0.91 and RPD 3.2 for Dw_{MOR} prediction) for predicting the level of decay in silver fir wooden strips inoculated with a microbial community.

Finally, from a practical standpoint, these methods may be applied to real structures by means of core collection (Noetzli et al., 2008). Spectral acquisition of cores could be directly acquired at different parts of the cores or on milled cores (Schimleck, 2008). Cores 5 mm in diameter have very limited mechanical damage against the diameter of the logs generally used in ecological engineering structures (diameter above 150 mm) and are easy to reduce into powder. This would give practitioners quantitative information about the level of decay of parts located by their expertise. However, the method needs to be tested previously on beams similar to those used in ecological engineering structures, *i.e.* wooden logs. The *mean intact* spectrum of silver fir should also be enriched by spectra from other locations to ensure that it covers the heterogeneity of the species.

2.4 Conclusion

The main purpose of this study was to predict degradation indicators of silver fir wooden strips decayed by a microbial community using NIRS. Two indicatorsof the level of decay , Dw_{MOE} and Dw_{MOR}, were developed allowing an accurate evaluation of the level of decay in terms

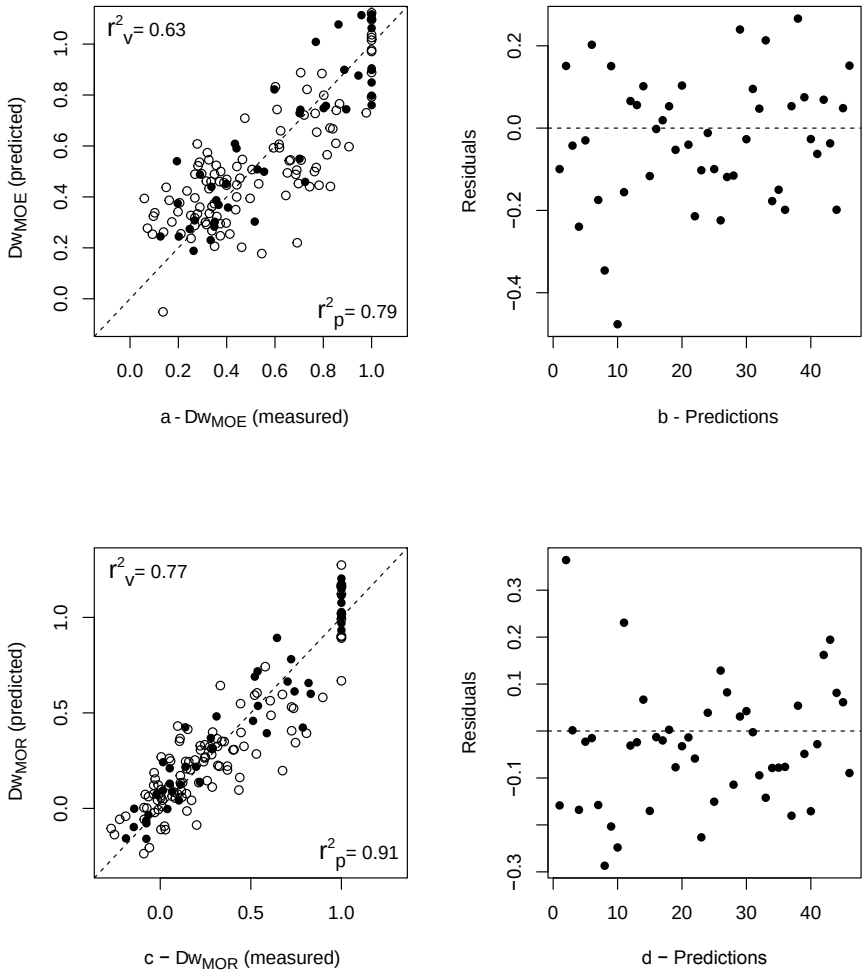

FIGURE 2.12 – Comparison between measured and predicted values for Dw_{MOE} (a) and Dw_{MOR} (c). The empty dots indicate the calibration set and the filled dots indicate the validation set. Prediction residuals Dw_{MOE} (b) and Dw_{MOR} (d) of for the validation set.

of mechanical properties. These indicators were related to the near infra-red spectra seen as estimators of the chemical compounds. The analysis of the NIRS spectra of intact and decayed milled samples confirmed the NIRS sensitivity to decay even under semi-controlled conditions. This sensitivity is observable over the full spectral range and non-attributable to one specific chemical compound (*i.e.* lignin, cellulose or hemicellulose). Based on these observations, two models were developed from spectra to predict Dw_{MOE} and Dw_{MOR} using PLSR. Predicted and measured values were highly correlated with r_p^2 values of 0.79 (Dw_{MOE}) and 0.91 (Dw_{MOR}). These models can provide useful tools for the rapid screening of wood residual properties of structural members. In terms of structure design and monitoring, Dw_{MOE} and Dw_{MOR} are complementary investigating wooden elements of an outdoor timber structure.

Acknowledgement

This work has been financed within the framework of projects SEDALP (Interreg Alpine space program. 2013-2015) and Arc Environnement (Rhône Alpes Region. France)

Chapitre 3

Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin par spectroscopie proche infrarouge

Assessing the level of decay of small-diameter silver fir logs degraded under semi-controlled conditions using near-infrared spectroscopy.

Barré J.B., Bourrier F., Bertrand D., Rey F.

Article in preparation for submission at *International Biodeterioration & Biodegradation.*

Abstract Logs are often used to build ecological engineering structures of natural hazards mitigation. Their service life is limited due to wood decay that requires periodic assessments. However, a lack of minimally or non-invasive methods to assess the level of decay of the logs has been deplored by practitioners. For that purpose, a study has found promising results to assess the level of decay of silver fir (*Abies alba*) wooden strips degraded in semi-controlled conditions using near infra-red spectroscopy (NIRS). The method is based on two prediction models of two mechanical indicators of the level of decay (Dw_{MOE} and Dw_{MOR}). The objective of this study is to generalize the method which was developed by taking into account the variability of silver fir in a limited extent. First, 103 silver fir small-diameter logs were decayed in a greenhouse for 138 to 788 days. Secondly, in accordance with the method, spectra were transformed by a baseline correction and *differential spectra* were calculated from the difference of a *mean intact spectrum* and the spectra of decayed samples. 125 samples of intact silver fir from 5 different provenances were collected to establish the mean intact spectrum. Thirdly, prediction models of normalized losses in MOE (Dw_{MOE}) and in MOR (Dw_{MOR}) were developed using partial least square regression (PLSR). Validation statistics achieved R^2_p values of 0.77 and 0.70, RMSEP of 0.13 to 0.17, and RPD ranging from 2.12 to 1.84. The results have shown that differential spectra give significant information about spectral regions of interest for decay quantification even with high intra-specific variability in the mean intact spectrum. The models of prediction developed from differential spectra were relevant for screening purposes.

Keywords Modulus of elasticity, Partial least squares regression, Differential spectrum

3.1 Introduction

Ecological engineering structures may be built to mitigate natural hazards such as superficial landslides or soil erosion. Their designs are based on a living part, plants, that will ensure the protection function when they will reach their ripeness. Meanwhile, the protection function is ensured by an inert part, often made of timber logs. Logs are taken on site or specially forwarded if there is no local resource. Logs undergo microbial attack in a short time after installation. As a consequence, the wood composed of cellulose, hemicellulose and lignin is gradually getting MOE weaker (ref.). The degradation of the lignocellulosic matrix causes actually loss in mechanical properties. Thus, the management of these structures requires specific attention from practitioners regarding structural integrity in relation to the level of decay. Tools and methodologies were developed to help practitioners in the diagnostic process (Rickli et al., 2014; Noetzli et al., 2008). But none of them may assess the decrease in mechanical properties due to microbial activity. The mechanical properties are both the quantities of interest in the structural behaviour (CEN, 2005) and a relevant indicator of the level of decay compared to mass loss (Curling et al., 2002b; Przewloka et al., 2008). However, few methodologies are suited to measure the mechanical properties non-destructively and in the field.

The Near Infra-Red Spectroscopy (NIRS) reveals a great potential to assess wood properties(Tsuchikawa, 2007; Tsuchikawa et al., 2015). In particular, (Kelley et al., 2004) have developed models to predict the modulus of elasticity (MOE) and the modulus of rupture (MOR) from NIR spectra of six clear softwood species. They obtained models with 20% of root mean square of prediction (RMSEP) that is in the variability range of MOE and MOR. Likewise, Fujimoto et al. (2007) developed two models to predict MOE and MOR for hybrid larch. Surprisingly, the best prediction results were obtained with the dataset including the largest variability of density. NIRS was also successfully used to characterize the degradation phenomena in wooden materials. Fackler et al. (2007b) have assessed the effects of fungal decay of brown and white rot types separately on spruce and beech samples. They observed changes in spectra and faced them to band assignments of wood compounds. Thus, changes were observed for both species between 6750 and 6230 $cm^{-}1$ assigned to polysaccharides content. For spruce, changes in lignin content was estimated within the wavenumber region from 6020 to 5770 $cm^{-}1$. Sandak et al. (2013) have monitored decay by white and brown rots in controlled conditions using NIRS. They have developed a prediction model of mass loss to assess decay of unknown samples. Moreover, studies were devoted to assess the level of decay using NIRS but taking account of mechanical indicators as reference measurements of decay. Green et al. (2010b) proposed to assess the level of decay by basing the reference measurements on the reduction of transverse compression strength. It was concluded that the method is adapted for screening purposes (R^2_p=0.69 and RPD = 2,61). Furthermore, Barré et al. (In press) have based their method on two reference indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR} measured from MOE and MOR in intact and decayed states. They obtained promising results to assess the level of decay of wooden strips degraded in semi-controlled conditions.

More specifically, their method proposed to calculate a *differential* spectrum which is the difference between a *mean intact* spectrum and the spectrum of a decayed silver fir sample. The mean spectrum was the average of the spectra of all intact silver fir samples used to develop these models. The assessment method is based on the prediction of normalized losses in module of elasticity (MOE) and module of rupture (MOR) from differential spectra. However, the *mean intact* spectrum was calculated from samples of a single log. The results have to be confirmed with sampling of various geographic locations in order to take into account the intra-specific variability (Sandak et al., 2011) (George et al., 2015). Moreover, the authors used squared silver fir samples of limited dimensions (30*30*500 mm) to facilitate mechanical properties measurements against

those with rough logs.

It was therefore the purpose of this study to generalize the method developed by Barré et al. (In press) while remaining in semi-controlled conditions. The objectives were (i) to validate the calculation of differential spectra with a mean intact spectrum integrating a geographical variability in the silver firs sampling and (ii) to assess the level of decay of small-diameter silver fir logs using NIRS to predict reference indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR}.

3.2 Materials and Methods

Intact silver fir samples

Intact silver fir samples were collected from five different provenances of the French Northern Alps located in Bons-en Chablais (1,100 m above sea level), Thônes (930 m above sea level), Allevard (1,400 m above sea level), Livet-et-Gavet(1,400 m above sea level) and Lagarde-en-oisans(1,100 m above sea level) (Fig. 3.1). 125 silver fir were coring by an increment borer of 5 mm in diameter that limits injuries. They were sampled on the downstream side of healthy trees in order to avoid potential injuries due to rockfalls. The trees had a diameter comprised between 26 and 75 cm and did not show apparent pathology. ()

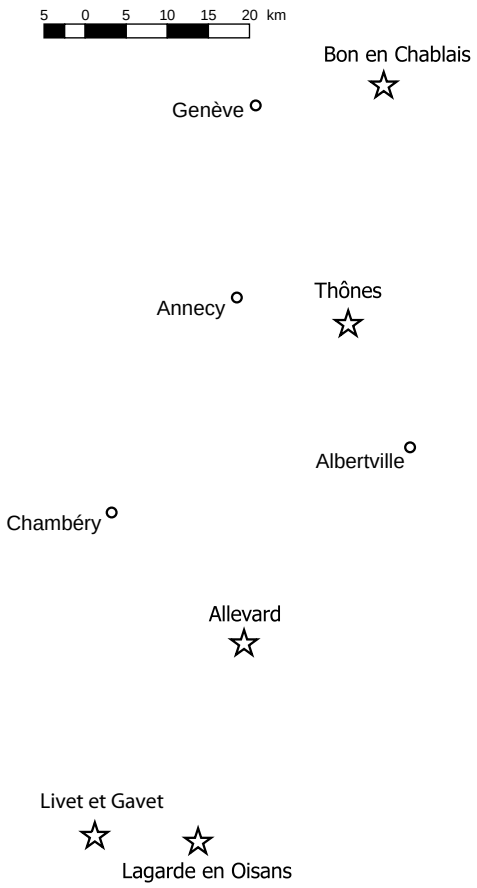

FIGURE 3.1 – Location of the 5 forest plots in the French Northern Alps.

(a) (b) (c)

FIGURE 3.2 – Successive steps of samples preparation in the greenhouse.(a) The logs laid on the ground. (b) The logs covered by woody debris. (c) The whole covered by a local-soil layer.

Decayed silver fir samples

129 small-diameter logs of *Abies alba* were harvested in a silver fir forest located in Lagarde-en-Oisans (Isère - French Northern Alps) at an altitude of 1,300 m above sea level. The logs were cut at 170 cm in length and delimbing. As the stems have variable diameters along the longitudinal axe, the given diameter is the average of three measurements taken at the top, middle and bottom of the logs. The retained-logs diameter was comprised between 6 and 10 cm. 100 logs were retained for the decay process. The degradation process took place in a greenhouse as described in Barré et al. (In press) between April, 2014 and October, 2015. The logs were laid on the ground and covered by a first layer of woody debris and a second of local soil (Fig 3.2). The logs were divided in four sets that were removed after 138, 347, 655 and 788 days. Once out of the greenhouse, samples were submitted to the mechanical test.

Mechanical properties measurements

The mechanical properties were measured by a four-points bending test following the recommendations of EN 14251 :2003 standard (CEN, 2003). The speed of the loading was 10 mm/min. The modulus of elasticity MOE was calculated according to :

$$MOE = \frac{F}{d}\frac{3aL^2 - 4a^3}{48I_G} \tag{3.1}$$

where F the applied force, L the length of the support span, d the displacement of the hydraulic actuator, a the distance between one support and the nearest head-load, and I_G the moment of inertia of the cross section.

MOR is defined from the maximum load supported by the sample using equation 3.2 (CEN, 2003).

$$MOR = \frac{8F_{max}(L-l)}{\pi d^3} \tag{3.2}$$

where F_{max} the maximum applied force, L the length of the support span, l the distance between the 2 points of load application, d the sample diameter.

From these two properties, we defined two mechanical indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR}. They are considered as reference values used to built the prediction models. Dw_{MOE} is the normalized loss in MOE of the same sample between intact and decayed states (Eq. 3.3).

$$Dw_{MOE} = \frac{MOE_i - MOE_d}{MOE_i} \tag{3.3}$$

where MOE_i and MOE_d are the MOE of one sample in intact and decayed states, respectively.

Dw_{MOR} is the normalized loss in MOR. Thus, MOR cannot be evaluated in intact and decayed states for the same sample as samples have to be tested until rupture to measure MOR. MOR of 29 remaining logs not involved in the decay process were measured and averaged into one value MOR^*_i. Dw_{MOR} was next calculated for each sample according to equation 3.4.

$$Dw_{MOR} = \frac{MOR^*_i - MOR_d}{MOR^*_i} \tag{3.4}$$

where MOR^*_i the mean MOR of 29 additional samples in intact states, MOR_d the MOR of the sample in decayed states.

NIR spectra

Following the mechanical tests, two slices were sampled for each log. One part of 10 cm-width was reserved for NIRS measurement, a second of 5 cm for moisture content measurement (Equ. 3.5).

$$MC = [(W_h - W_0)/W_0] * 100 \tag{3.5}$$

where W_h is the wet slice weight, W_0 is the oven-dry slice weight.

In the laboratory, the intact and decayed samples devoted to NIRS were dried at 40°C and ground into powder of 0.25 mm grain size in a Retsch ZM 200 mill. The grinding limits the side effect of decay heterogeneity in the cross-section. NIR spectra were acquired by a Thermo Scientific Antaris 2 FT-NIR analyser. The instrument records the absorption in the spectral region [3999, 10001 cm^{-1}] at a resolution of 4 cm^{-1}. Each spectrum is the average of thirty two scans and is plotted as absorbance versus wavenumbers. The data post-treatment was managed in R software (R Core Team, 2013) using *hyperSpec* package (Beleites et al., 2012). Spectra were straightened by a baseline correction with the *baseline* package (Liland et al., 2014) to avoid side effects of the particles size. Next this spectra post-treatment, spectra values correspond to *baseline corrected* absorbances. Spectra of intact and decayed samples were respectively named *intact* and *decayed* spectra. For *intact* spectra, the influence of geographical origins was checked with the principal component analysis (PCA) performed by *ade4* package (Dray et al., 2004). Likewise, intact and decayed spectra were compared by PCA.

PLS regression model for the prediction of the level of decay

Spectra were managed to highlight differences between *intact* and *decayed* spectra. These differences were already observed by Green et al. (2010b) and Stirling et al. (2007). They correspond to decrease in absorbance for wavenumbers associated to cellulose, hemicellulose or lignin. These decreases were quantified by the calculation of *differential* spectra. *Differential* spectra were defined as the difference between the *mean intact* spectrum, average of all *intact* spectra and each decayed spectrum.

The models of prediction were built from partial least square regressions (PLS) as recommended in Wold et al. (2001). The spectral data set was split into one calibration set of 69 samples and one validation set of 29 samples by the Kennard-Stone algorithm from the *soil.spec* package (Sila et al., 2013). PLS was calibrated and, next, cross-validated using the leave-one-out (LOO) procedure with the calibration set. Then, the models was tested with the validation set. In order to improve the PLS regressions, an optimization of the wavenumbers range was performed. First, the wavenumbers associated to water (5150 to 5220 cm^{-1}, 5051 cm^{-1}, 7073 cm^{-1}) (Schwanninger et al., 2011a) were removed of the analysis as anhydrous samples can rehydrate in a very short time in a non-controlled atmosphere. Secondly, only wavenumbers, where *differential*

spectra were positive, were retained. Thirdly, among these wavenumbers, an iterative test were developed to find the optimal range, *i.e.* those that give the best prediction performance.

The performances of calibration were analysed with the coefficients of determination R_c^2 for calibration and R_c^2v for cross-validation, the root mean squared error of calibration (RMSEC) and the root mean squared error of cross-validation (RMSECV) (Mevik et al., 2004). The prediction performances were analysed with the coefficient of determination R_p^2 for prediction, the root mean squared error of prediction (RMSEP), the ratio of performance to deviation (RPD), calculated as the ratio of the standard deviation of the reference data to the RMSEP (Schimleck et al., 2003).

3.3 Results

3.3.1 Mean intact spectrum and differential spectra

PCA performed on *intact* spectra shows grouped samples (Fig. 3.3a). It revealed no distinction between samples function of geographical origin. Furthermore, PCA performed on *intact* and *decayed* spectra shows one group of intact samples and a second, MOE staggered, of decayed samples (Fig. 3.3b).

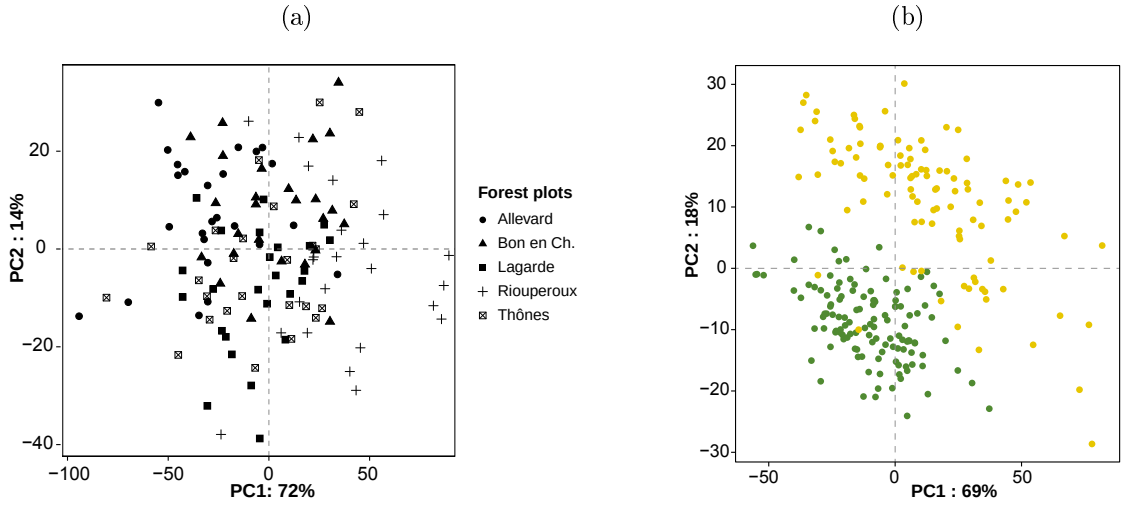

FIGURE 3.3 – (a) PCA of all *intact* spectra. (b) PCA of *intact* spectra (green dots) and *decayed* spectra (yellow dots).

Differential spectra show huge variations and alternate between positive and negative values (Fig. 3.4). DS are strictly positive in 5 regions : 4269-4304 cm^{-1} (region 1), 4312-4331 cm^{-1}(region 2), 4350-4404 cm^{-1} (region 3), 4547-4855 cm^{-1} (region 4) and 5523-5561 cm^{-1} (region 5).

3.3.2 Assessment of the level of decay using NIRS

Indicators of reference Dw_{MOE} and Dw_{MOR} from mechanical properties

Prior to mechanical measurement, the MC was checked. All Intact samples had MC above the Fibre Saturation Point (FSP) (148% in average). For the decayed samples, 6 of them had the MC under FSP. The mean MC was 39%. Next, the MOE values of intact samples (MOE_{intact}) were comprised between 5406 MPa and 12266 MPa (Table 3.1). The mean value was 8817 MPa for the 69 samples of the calibration set and 8345 MPa for the 29 samples of the validation set. The MOE of decayed samples (MOE_{decay}) were significantly lower than those of intact one (Fig. 3.5a) according Wilcoxon test (p-value of 2.7e-16). In the same way, the MOR_{intact} (mean value

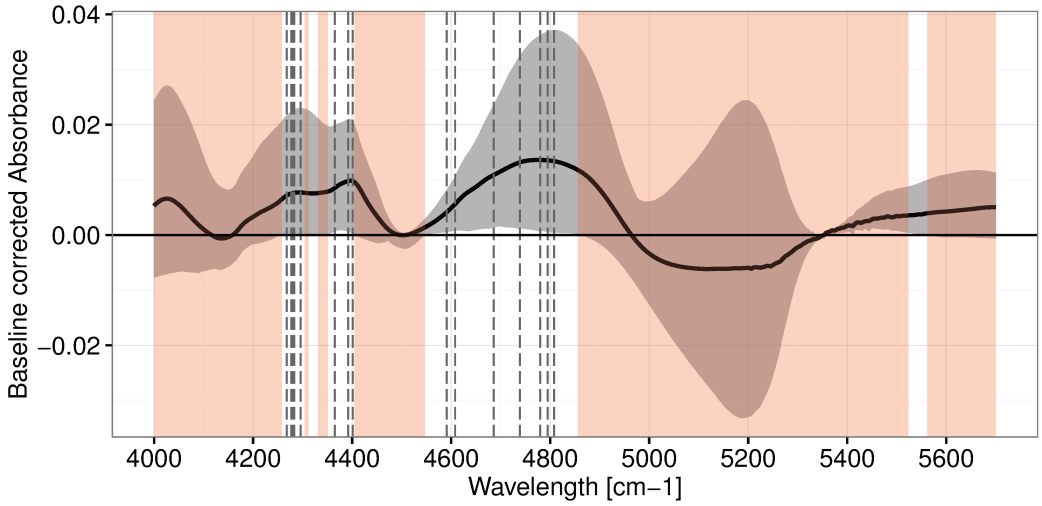

FIGURE 3.4 – Differential spectra between 4000 and 5800 cm^{-1}. The bold line corresponds to the mean, the ribbon to the minimum and maximum values. The clear parts correspond to regions where the differential spectra are strictly positive : region 1 : 4258-4304 cm^{-1}, region 2 : 4312-4331 cm^{-1}, region 3 : 4350-4404 cm^{-1} , region 4 : 4547-4855 cm^{-1}, region 5 : 5523-5561 cm^{-1}. The dashed lines identify the wavenumbers associated to wood components according to (Schwanninger et al., 2011a). : 4268 cm^{-1} (C), 4277 cm^{-1}(C), 4280 cm^{-1}(L), 4283 cm^{-1}(C/H), 4296cm^{-1} (H), 4365 cm^{-1} (C), 4392 cm^{-1} (C), 4401 cm^{-1} (H), 4591 cm^{-1} (C/H), 4608 cm^{-1} (C/H) 4686 cm^{-1} (H), 4739 cm^{-1} (C),4780 cm^{-1} (C), 4795 cm^{-1} (C/H) ;4808 cm^{-1} (C). C : Cellulose. H : Hemicellulose. L : Lignin.

of 51.8 MPa) is significantly higher than the MOR_{decay} (Fig. 3.5b). The mean value was 31.4 MPa for the calibration set and 27.4 MPa for the validation set.

Dw_{MOE} is non-uniformly comprised between 0 and 1 (Fig. 3.6a). 39% of the logs had Dw_{MOE} comprised between 0 and 0.2 and 10% above 0.8 . The mean value of Dw_{MOE} is of 0.34 for the calibration set and of 0.42 for the validation set. Dw_{MOR} is in average higher than Dw_{MOE} (Fig. 3.6b). The mean value of Dw_{MOR} is of 0.47 for the calibration set and of 0.57 for the validation set.

Decay-extent assessment by means of PLS regression models

Models of prediction were developed for three different wavenumbers ranges. The first range took into account the five regions where the differential spectra were positive (regions 1 to 5). The second retains only regions 1, 3 and 4 where wood compounds were identified according to (Schwanninger et al., 2011a). The last one was obtained by maximizing the prediction performances and corresponds to regions 1,3 and part of regions 4 (4570 to 4674 cm^{-1}). Calibrations obtained with Dw_{MOE} from different ranges are similar. R^2_v was of 0.52 and RMSECV ranging from 0.19 (regions 1 to 5 with 8 factors and optimal regions with 7 factors) to 0.16 (regions 1,3 and 4 with 7 factors) (Table 3.2). Identical observations were made for calibrations obtained with Dw_{MOR}. R^2_v was of 0.54 and RMSECV of 0.20. Predictions of Dw_{MOE} had coefficient of determination R^2_p ranging from 0.72 (regions 1 to 5 with 8 factors) to 0.77 (optimal regions with 7 factors). They had ratios of performance to deviation RPD ranging from 1.92 (regions 1 to 5) to 2.12 (optimal regions). RMSEP ranging from 0.15 (regions 1 to 5) to 0.13 (optimal regions). Same trends were observed for predictions of Dw_{MOR}. R^2_p varied from 0.63 (regions 1 to 5 with 8 factors) to 0.70 (optimal regions with 7 factors). RPD varied from 1.66 (regions 1 to 5) to 1.84 (optimal regions).

TABLE 3.1 – Physical and mechanical measurements of silver fir samples. Range and standard deviation (SD).

	Calibration set. n=69				Prediction set. n=29			
Wood property	Mean	Min.	Max.	SD	Mean	Min.	Max.	SD
Intact samples								
Moisture content (%)	148	95	203	28	142	26	185	38
MOE_{intact} (MPa)	8817	5406	12266	1654	8345	5491	11216	1687
MOR_{intact} (MPa)*	51.8	38	68.4	5.9				
Decayed samples								
Moisture content (%)	39	27	69	10	32	26	46	6
MOE_{decay} (MPa)	5867	0	10760	2746	5474	0	10161	2689
MOR_{decay} (MPa)	31.4	0	57.1	14.8	27.4	0	49.1	16.7
Decayed samples Dw_{MOE} (-)	0.34	0	0.99	0.29	0.42	0.16	0.87	0.28
Dw_{MOR} (-)	0.47	-0.10	0.98	0.30	0.57	0	0.96	0.32

* : Measured for 29 intact samples.

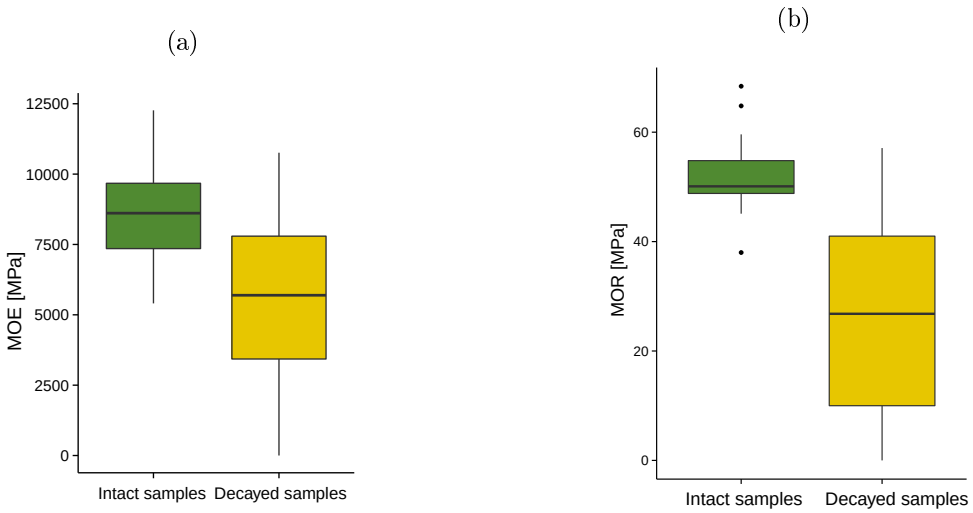

FIGURE 3.5 – MOE (a) and MOR (b) measured for intact and decayed samples

3.4 Discussion

3.4.1 Mean intact spectrum and differential spectra

As mentioned earlier, the results of Sandak et al. (2011) suggest that the mean intact spectrum had to be calculated from samples of several locations in order to take into account the species geographical variability. Generally, PCA performed on *baseline corrected* spectra of intact samples did not reveal this geographical variability (Fig. 3.3a). This confirms the interest of the method proposed by Barré et al. (In press), that bases the decay assessment on the comparison of a decayed sample with a reference spectrum of the studied specie in intact state. Moreover, the results confirm the pertinence of calculating the differential spectra. The analysis reveals actually five regions where decayed samples had significant reductions of *baseline corrected* absorbances, *i.e.* where differential spectra have positive values (Fig. 3.4). Amongst them, the regions 1, 3 and 4 correspond to CH, CH_2 and OH functional groups of cellulose and hemicellulose. These regions are close to those taken into account in other decayed wood studies (Green et al., 2010b; Stirling

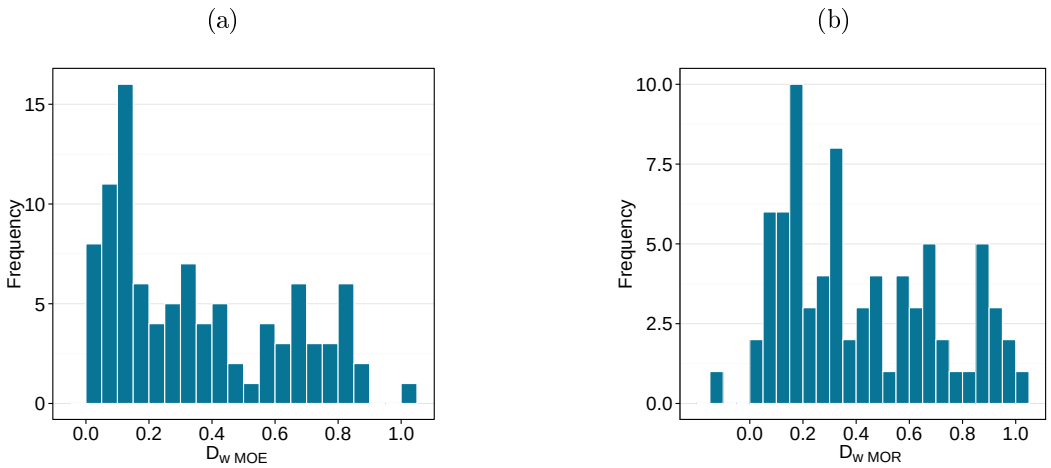

FIGURE 3.6 – Histogram of the indicators Dw_{MOE} (a) and Dw_{MOR} (b).

TABLE 3.2 – Main models characteristics developed for indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR} prediction.

	NF	Calibration. n=66		LOO validation		Prediction. n=26		
Wavelength ranges		R_c^2	RMSEC	R_v^2	RMSECV	R_p^2	RMSEP	RPD
Dw_{MOE}								
full spectral range	4	0.59	0.17	0.40	0.21	0.68	0.16	1.78
Regions 1 to 5	8	0.69	0.15	0.52	0.19	0.72	0.15	1.92
Regions 1,3 and 4	7	0.66	0.16	0.52	0.16	0.75	0.14	1.96
optimal regions	7	0.67	0.15	0.52	0.19	0.77	0.13	2.12
Dw_{MOR}								
full spectral range	4	0.60	0.19	0.45	0.22	0.43	0.23	1.34
Regions 1 to 5	8	0.69	0.16	0.54	0.20	0.63	0.19	1.66
Regions 1,3 and 4	8	0.68	0.17	0.54	0.20	0.68	0.18	1.80
optimal regions	7	0.67	0.17	0.56	0.20	0.70	0.17	1.84

Note : NF : number of factors, RMSEC : Root mean squared error of calibration, RMSECV : Root mean squared error of cross validation, RMSEP : Root mean squared error of prediction, RPD : relative percent difference ratio of RMSEP to standard deviation of Dw_{MOE}. region 1 : 4269 to 4304 cm^{-1}, region 2 : 4312 to 4331 cm^{-1}, region 3 : 4350 to 4404 cm^{-1}, region 4 : 547 to 4855 cm^{-1} and region 5 : 5523 to 5561 cm^{-1}. Optimal regions : regions 1,3 and part of regions 4 (4570 to 4674 cm^{-1}).

et al., 2007). Only regions 2 and 5 were not associated to particular compound. Compared to spectral regions obtained by Barré et al. (In press), the regions found in our study were more limited. In particular, the results did not bring forward the wavenumbers associated to lignin. Lignin degradation might be too limited or the semi-controlled conditions have not allowed the development of white-rot type fungi, the only fungi able to degrade lignin. As a result, the method based on the calculation of differential spectra allows to directly identifying the wavenumbers regions of interest regardless the knowledge of decay type. The influence of the microbial-community composition on NIR spectra need to be explored in order to generalize the method to all degradations conditions. This requires in particular experiments in natural conditions. Finally, the results confirm that NIRS is sensitive enough to detect chemical changes induced by microbial community in the same degradation range as those observed in concerned timber structures. The differential spectrum is calculable even for little decayed samples, *i.e.*

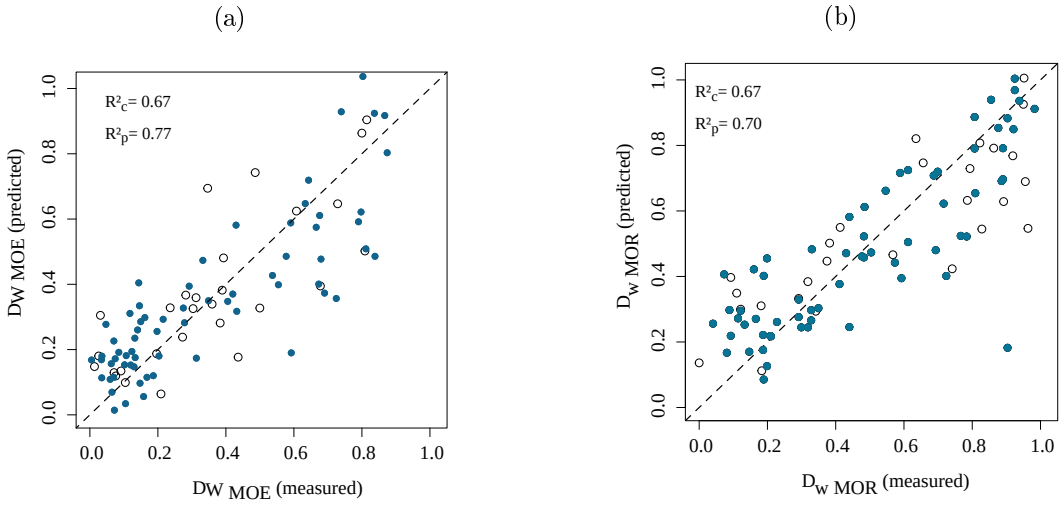

FIGURE 3.7 – (a) Measured Dw_{MOE} compared to predicted Dw_{MOE}. (b) Measured Dw_{MOR} compared to predicted Dw_{MOR}. The filled dots correspond to the calibration phase and the empty dots to the validation phase

when Dw_{MOE} is close from 0 (Fig. 3.6a).

3.4.2 Assessment of the level of decay using NIRS

The assessment of the level of decay is based on prediction models of the indicators of reference Dw_{MOE} and Dw_{MOR}. They shows significant statistics and are in line with Green et al. (2010b). The root mean square errors of prediction (RMSEP) obtained in our study ($RMSEP = 0.13$ for Dw_{MOE} and $RMSEP = 0.17$ for Dw_{MOR}) are also analogous to thus obtained by Barré et al. (In press) ($RMSEP = 0.15$ for Dw_{MOE} and $RMSEP = 0.13$ for Dw_{MOR}) although we have introduced variability in the mean intact spectrum and in decayed samples.

The results confirm also the necessity to pay attention for the wavenumbers selection used for the PLS regression in order to reduce RMSEP, as it is recommended in Cecillon et al. (2008). Prediction obtained from the full spectral range (4000 to 10000 cm^{-1}) had the weakest performances (Table 3.2). Next, the removal of regions 2 and 5 in PLS regression do not change the performance compared to PLS with the five regions. This observation and the fact that they are not mentioned in Schwanninger et al. (2011a) suggest that these two regions are not of major interest for decay investigation. Secondly, we found the strongest results by selecting the wavenumbers comprised between 4258 to 4304 cm^{-1} (region 1), 4350 to 4404 cm^{-1} (region 3) and 4570 to 4674 cm^{-1} (part of region 4) (Fig. 3.4). Thus, the generalization of this decay assessment method shows that it could be suited to real structures. A sampling by coring may be considered for that purpose. Nevertheless, the spectral regions retained in the PLS influence the prediction performances. They depend in a large extent on the composition of microbial community involved in the degradation process. The generalization of the method requires investigations about influence of microbial communities on spectra in natural conditions.

3.5 Conclusion

This study confirms the relevancy of the differential spectrum to highlight effects of microbial activity on samples even increasing the geographical variability of sampling for the mean intact spectrum. The wavelengths associated to positive values of differential spectra were mainly associated to polysaccharides (cellulose and hemicellulose). Furthermore, this study corroborates

that the level of decay of logs degraded by a microbial community can be assessed using NIRS and prediction models of reference indicators Dw_{MOE} and Dw_{MOR}. Reasonable prediction (RMSEP =0.13, RPD = 2.12) was obtained for Dw_{MOE} by carefully selecting an optimal spectral range (4269 to 4304 cm^{-1} + 4350 to 4404 cm^{-1} + 4570 to 4674 cm^{-1}). This screening method gave promising results in semi-controlled conditions and need to be extended to experiments in natural conditions in order to evaluate the effects of several microbial communities. If confirmed, the method could provide quantitative measures of the level of decay only from cores levied on selected parts of the timber structure.

Chapitre 4

Synthèse

Dans cette partie, nous avons cherché à évaluer le niveau de dégradation de rondins de sapin blanc par spectroscopie proche infra-rouge. Pour cela, deux expérimentations en conditions semi-contrôlées ont été mises en place. La première a permis de développer une méthodologie à partir d'un jeu d'échantillons dont la variabilité était volontairement limitée (échantillons de section parfaitement constante en provenance d'un seul arbre) (Chapitre II.2) et la seconde de généraliser cette méthodologie sur un jeu d'échantillons intégrant une plus grande variabilité (rondins issus de 100 arbres) (Chapitre II.3). Ces deux études permettent au final de proposer une méthode d'évaluation du niveau de dégradation par SPIR en deux étapes. La première étape détermine le traitement des spectres nécessaires aux calculs des *spectres différentiels*. La seconde étape consiste à appliquer aux spectres différentiels les modèles de prédiction des indicateurs de référence Dw_{MOE} et Dw_{MOR}.

Le type des traitements des spectres. Les traitements retenus pour mettre en avant les effets de la dégradation sur les spectres ont permis de développer la notion de spectre différentiel. Le spectre différentiel est obtenu par la différence entre deux spectres. Le premier spectre, appelé *spectre moyen intact*, correspond à la moyenne des spectres obtenus à partir d'échantillons de sapin intact. Le second spectre correspond à celui de l'échantillon dégradé analysé. Grâce aux spectres différentiels, nous avons pu identifier les longueurs d'onde sensibles à la dégradation microbienne obtenue sous serre (chapitre II.2).

Les modèles de prédiction. L'évaluation du niveau de dégradation mécanique repose sur deux modèles de prédiction spécifiques à chacun des indicateurs de référence Dw_{MOE} et Dw_{MOR}. Le niveau de dégradation évalué à partir des spectres différentiels et comparé à Dw_{MOE} donne un coefficient de détermination r_p^2 de 0.79 et une racine de l'erreur quadratique moyenne de prédiction (REQMP) (Root mean square erreur of prediction - RMSEP) de 0.15. De même, le niveau de dégradation évalué à partir des spectres différentiels et comparé à Dw_{MOR} donne un coefficient de détermination r_p^2 de 0.91 et REQMP de 0.13.(chapitre II.2).

La généralisation des résultats. L'augmentation de la variabilité du jeu de données a permis de confirmer la faisabilité des spectres différentiels (chapitre II.3). Toutefois, les performances de prédiction des indicateurs de référence s'érodent avec l'augmentation de la variabilité ($r_p^2 = 0.77$ et $REQMP = 0.13$ pour la prédiction de Dw_{MOE} et $r_p^2 = 0.70$ et $REQMP = 0.17$ pour la prédiction de Dw_{MOR}) (chapitre II.3).

La méthode proposée a été développée en conditions semi-contrôlées afin d'accélérer le processus de dégradation. Ces conditions ont impacté la composition de la communauté microbienne

et son évolution dans le temps. Il en résulte un processus de dégradation pouvant favoriser une communauté microbienne et, par conséquent, un ou plusieurs types de pourritures. Ainsi, afin de poursuivre le travail de généralisation entamé au chapitre II.3, la méthode proposée doit être appliquée sur des rondins dégradés en conditions naturelles (Partie IV).

Troisième partie

Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par analyse vibratoire

Chapitre 1

Introduction

Contexte et objectifs

La dégradation du bois par une communauté microbienne se traduit notamment par une réduction de certaines de ses propriétés mécaniques. La décomposition de la matrice lignocellulosique entraine, entre autres, des pertes d'élasticité quantifiables par la mesure du module d'élasticité (MOE). La mesure du MOE peut ainsi permettre de quantifier directement, à partir de sa mesure, le niveau de dégradation d'une pièce de bois (Winandy et al., 1993; Przewloka et al., 2008). Cependant cette mesure, conformément aux normes, est destructive et requiert des dispositifs expérimentaux contraignants qui ne sont pas adaptés au diagnostic d'ouvrages *in situ*. Des méthodes de mesure non destructive ont ainsi été développées afin d'évaluer rapidement cette grandeur (Cavalli et al., 2013; Ross, 2015). Parmi celles-ci, l'analyse vibratoire a été choisie dans le cadre de ce travail de thèse. Cette méthode, couplée aux théories d'Euler-Bernoulli et Timoshenko (Brancheriau et al., 2002b), a largement démontré sa capacité à mesurer MOE pour des poutres en bois calibrées (*i.e.* de section constante circulaire ou prismatique) (Green et al., 2004; Yang et al., 2015). En revanche, la littérature scientifique est mince quant à son utilisation avec des rondins ou des grumes dont la géométrie intègre des imperfections(Wang et al., 2002). Effectivement, les théories d'Euler-Bernoulli et Timoshenko font généralement l'hypothèse d'une poutre droite de section constante le long de l'axe longitudinal. Or, l'assimilation d'un rondin à une telle poutre peut s'avérer être une hypothèse forte en raison notamment de la forme géométrique des rondins, de la courbure initiale de la fibre moyenne, de la conicité du rondin ou de la forme de la section transversale. Par ailleurs, parmi les autres propriétés du bois affectées par la dégradation microbienne, le taux d'amortissement ξ peut constituer une mesure complémentaire pour évaluer le niveau de dégradation (Ouis, 2000). ξ, qui caractérise l'énergie dissipée par le rondin soumis aux vibrations (Woodhouse, 1998), est aussi accessible à partir de la réponse vibratoire du rondin. Or, celle ci étant potentiellement affectée par les imperfections géométriques, la mesure de ξ peut également être influencée.

Pour cette seconde partie, la problématique est de savoir si le niveau de dégradation de rondins de bois, de sapin blanc dans le cadre de ce travail de thèse, dégradés en conditions semi-contrôlées, peut être évalué à partir de l'analyse vibratoire.

L'objectif est de proposer une méthode d'évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées basée sur l'analyse vibratoire. Dans un premier temps, il s'agit d'évaluer les effets de la dégradation microbienne sur la mesure de MOE et de ξ pour des rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlés et de proposer des indicateurs potentiels du niveau de dégradation basés sur MOE et ξ (Chapitre III.2). Dans un second temps, il s'agit d'évaluer le niveau de dégradation de rondins à partir d'un des indicateurs,Dw_{E_n}, définis au chapitre précédent.Pour cela, l'influence de trois types d'imperfections géométriques

sur les fréquences f_n et les modules E_n est évaluée à l'aide de simulations numériques. Enfin, les niveaux de dégradation évalués par Dw_{E_n} sont comparés à ceux obtenus avec l'indicateur de référence Dw_{MOE} (Chapitre III.3).

Démarche expérimentale

La première étude (Chapitre III.2) vise à évaluer les effets de la dégradation microbienne sur deux propriétés mécaniques, MOE et ξ, ainsi que sur deux indicateurs construits à partir de ces grandeurs, pour des rondins de sapin dégradés en conditions semi-contrôlées en utilisant l'analyse vibratoire. Les mesures par analyse vibratoire ont été effectuées sur 55 rondins de sapin (diamètre moyen de 8 cm pour une longueur de 155 cm) à l'état intact (*i.e.* non dégradé) puis après dégradation sous serre. Pour la mesure vibratoire, le rondin est placé sur des bandes de caoutchouc très souples fixées à un bâti afin de reproduire les conditions d'appui libre-libre. L'acquisition des données est réalisée au moyen d'un accéléromètre piézoélectrique. Le traitement numérique du signal d'accélération permet d'obtenir les fréquences de chaque mode de vibration par transformée de Fourier. Le module d'élasticité est calculé à partir de la théorie d'Euler-Bernoulli (E_n) ou de la théorie de Timoshenko (E_{timo}). D'autre part, le taux d'amortissement ξ_n est calculé pour chacun des trois premiers modes de vibration par une méthode d'ajustement de courbes appliquée au signal filtré mode à mode. À partir des trois grandeurs E_n, E_{timo} et ξ_n, trois indicateurs Dw_{E_n}, $Dw_{E_{timo}}$ et Dw_{ξ_n} sont proposés pour évaluer le niveau de dégradation mécanique.

La seconde étude (Chapitre III.3) vise à apprécier la capacité de l'analyse vibratoire, *via* l'indicateur Dw_{E_n}, à évaluer le niveau de dégradation en présence d'imperfections géométriques relatives aux rondins. Le jeu de données expérimentales est identique à celui de l'étude précédente (Chapitre III.2). Dans un premier temps, l'influence de trois types d'imperfections géométriques sur la mesure vibratoire est étudiée par analyse modale sur un rondin idéalisé (cylindre de diamètre 10 cm et de longueur 155 cm) modélisé par éléments finis sous le logiciel ABAQUS CAE 6.13. Pour chaque mode de vibration, les influences de la courbure initiale de la fibre neutre, de la conicité de la tige et du caractère elliptique de la section sont quantifiées indépendamment l'une de l'autre par analyse de la différence normalisée entre la fréquence de vibration d'un rondin parfaitement droit et cylindrique et celle d'un rondin ayant une imperfection géométrique. Dans un second temps, l'évaluation du niveau de dégradation par l'indicateur Dw_{E_n} est appréciée par comparaison avec un indicateur de référence Dw_{MOE}. Cet indicateur est défini comme le taux de perte en MOE d'un rondin entre ses états intact et dégradé. MOE est mesuré à partir d'un essai de flexion quasi-statique quatre points.

Partie III

Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par analyse vibratoire

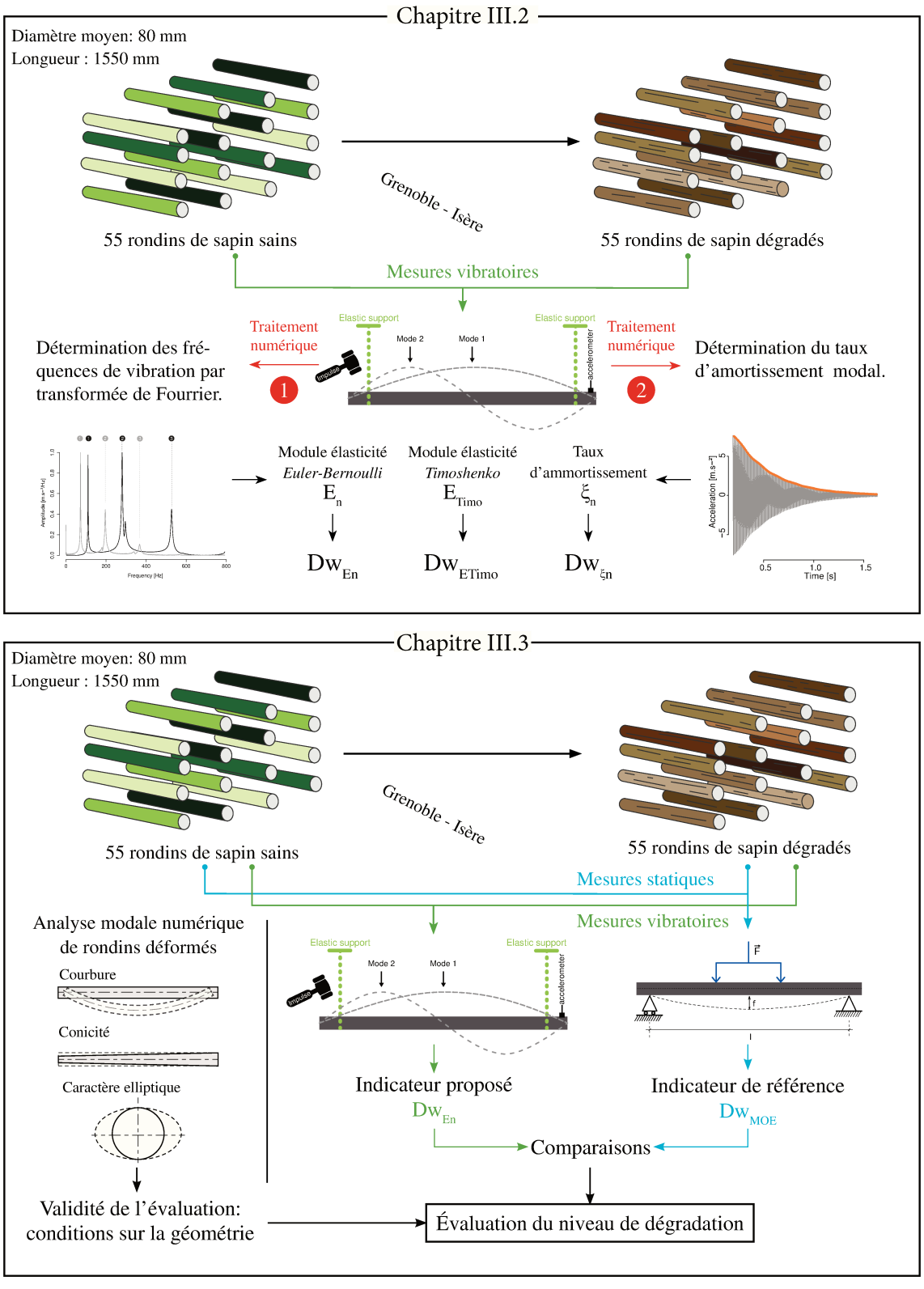

FIGURE 1.1

Chapitre 2

Effets de la dégradation microbienne sur l'élasticité et l'amortissement de rondins de sapin blanc mesurés par analyse vibratoire

Effects of fungal decay on elasticity and damping of small-diameter silver fir logs assessed by the vibrational resonant method.

Barré J.B., Bertrand D., Bourrier F., Brancheriau L., Rey F.

Article submitted for publication in *Wood Science and Technology*.

Abstract A number of studies have shown the ability of the vibration resonance method (VRM) to measure the modulus of elasticity (MOE) and damping ratio (ξ) of calibrated wooden samples of various dimensions. This method based on free vibrations was also studied to assess decay in small stakes. Nevertheless, a need for investigations was identified in order to apply the method on intact or decayed logs. Both decay and geometrical imperfections brought heterogeneity not taken into account by VRM. The aim of this study was to examine the effects of fungal decay on these two mechanical properties of small-diameter silver fir logs using VRM. 55 small-diameter logs were monitored over a decay process taking place in a greenhouse located near Grenoble (France). MOE and ξ were measured at intact and decayed states. The results showed the reliability of the measurements of both properties. ξ was found to be independent of moisture content for wood above the fibre saturation point. The results validated the loss of MOE and the gain in ξ due to fungal activity. Thus, indicators based on MOE and ξ were proposed and compared to quantify the level of decay. Indicators calculated from the first mode of vibration appeared to be relevant to that purpose. Future work is needed to validate the level of decay assessed by means of these indicators.

Keywords decayed wood, damping ratio, dynamic modulus of elasticity, modal analysis

2.1 Introduction

Natural hazards such as erosion or small landslides may be mitigated by ecological engineering structures built from a wooden logs framework. These timber structures are mostly made of local softwoods such as, in the French Alps, larch, Douglas fir, pine or silver fir. Built in

ground contact without any wood preservatives, they undergo microbial degradation since their construction start. The microbial activity is well known to have dramatic effects on wood mechanical properties such as the Modulus Of Elasticity (MOE) and the Modulus Of Rutpure (MOR) (Curling et al., 2002a), two properties of interest for the structural design (CEN, 2005). The intensity of this decay caused by the microbial community depends on, *inter alia*, wood specie, wood moisture content and temperature (Zabel et al., 1992). But the two last parameters fluctuate significantly geographically and in time (Brischke et al., 2008a). As a consequence, practitioners meet difficulties in quantifying the level of decay of logs. They use non-destructive methods which have been developed to appraise structures (Cruz et al., 2015; Tannert et al., 2013; Riggio et al., 2013). However, few of them assess the remaining mechanical properties and, in particular, MOR that represents the remaining load capacities of the logs. The non-destructive method have moreover to be suited to constraints such as energetically self-sufficient in case of *in-situ* measurements, few influenced by moisture content (MC) of wood especially when it is above the fibre saturation point (FSP) and, finally, as well applicable on little decayed as severely decayed logs including some cracks. For that purpose, researches have studied methods as time domain reflectrometry water content measurements or based on species composition and population structures of basidiomycetes in wood (Previati et al., 2012; Noetzli et al., 2008). Others developed methods allowing to overcome them as methods based on near infra-red spectroscopy (Barré et al., In press; Sandak et al., 2015a). However, none of them assesses impact of decay on the mechanical properties in a cost-effective way. This brings to light the Vibration Resonance Method (VRM), another common non-destructive method.

The vibration resonance method is currently used for mechanical grading of intact (non-attacked) timber beams (Stapel et al., 2013). The method is fast and non-destructive. It consists of recording the displacement of a freely supported beam subjected to longitudinal or transversal vibrations. From this measurement, the Euler-Bernoulli or Timoshenko beam theories allow to calculate the modulus of elasticity (MOE). VRM allows admittedly to only measure MOE. MOE is however the best single variable for MOR prediction (Hanhijärvi et al., 2005). The VRM has initially been elaborated to calculate MOE for beams of regular cross section and homogeneous material. Studies have however shown its relevancy by comparison with static bending techniques for timber beam including geometric or material imperfections. Wang et al. (2002) found a strong correlation (R^2=0.85 for Jack pine and 0.95 for Red pine) between MOE obtained by transverse vibration (E_{tv}) and by static bending technique (MOE_s) for logs (3.7 m in length and MC above FSP), *i.e.* a piece of wood which has not been shaped by hewing or sawing. The logs diameter was comprised between 11.9 and 27.9 cm. This result has been confirmed by Green et al. (2006) who obtained high correlation (R^2=0.88) for perfectly round large timber beams (diameter of 22.8 cm, length of 500 cm and MC of 15.5%). Finally, for wood above its fibre saturation point (FSP) and compare to other methods based on sound or ultrasound propagation, the VRM measures MOE without being influenced by the moisture content as MOE remains constant above FSP (Machek et al., 2001a; Barrett et al., 2009).

Furthermore, VRM has been studied to investigate influence of decay on bending property. Machek et al. (1998),Grinda et al. (2005) and Alfredsen et al. (2006) confirm VRM is a relevant method to quantify decay in wood. Nevertheless, these studies consider small rectangular stakes with a maximum of 500 mm in length and 50 mm in height. The small sample size limits the number of defects, which are naturally present in wood and influence the measure of MOE. They differ importantly from the beams used in ecological engineering timber structures (logs of diameter from 10 to 30 cm). Moreover, regarding decayed wood and VRM, researches have been mainly focused on effects on MOE as it could be easily compared to static measurements. But VRM measures another mechanical property, the damping, potentially affected by decay, and has been few studied for that purpose.

The damping characterizes the ability of a structure to dissipate mechanical energy when it is subjected to cyclic loading. Its origin is associated to three classes of mechanisms related to the material, the boundaries conditions and the surrounding fluid (Woodhouse, 1998). In wood science, this energy dissipation is frequently quantified by the logarithmic decrement δ_{log} or the damping ratio ξ, which are both frequency dependant and related together by the following relation when $\xi \ll 1$ (Brancheriau, 2002, p.119):

$$\delta_{log} \approx 2\pi\xi \tag{2.1}$$

For dissipative linear structures with a single degree-of-freedom (SDOF system), which corresponds to the simplest vibrating mechanical system, the calculation of ξ has been largely studied in case of free vibration (De Silva, 2005). However, the log on its elastic supports is a multiple degree-of-freedom system (MDOF system) that possesses several vibration modes. The analysis of this system is facilitated by considering the MDOF system as a superposition of SDOF systems (Ouis, 2000). The vibratory response of the log is then studied for each vibration mode separately in order to determine the damping characteristics (Brancheriau, 2002).

Labonnote et al. (2013) itemised values of ξ in the scientific literature from 1950 for several intact wood species. Species investigated in the different studies were mainly softwoods with moisture content (MC) under fibre saturation point (FSP). The values are between 0.0022 and 0.0068. The differences are due to diversities of specie and anatomical orientations, and the experimental conditions. Under FSP, MC has a significant effect on ξ (Obataya et al., 1998; Yeh et al., 1971) as it is well known for other mechanical properties. ξ increases with a MC rise. But, ξ behaviour has not been studied when MC rises above FSP. Regarding the effects of decay on damping, Ouis (1999) noted also no significant research. Dunlop (1983) raised that decay lead to an increase in the damping of longitudinal acoustic waves. Ouis (2000) confirms this fact using a room acoustical technique to detect decay in logs. Bucur (2006) introduced the damping coefficient as an indicator of micro structural modifications but without mentioning the decay.

The aim of this study was to assess the decay effect of silver fir logs, chosen of small-diameter for practical reason (155 cm in length, 6 to 10 cm in diameter), on the damping and MOE measured by free transverse vibrations. An experiment has been set up in order to decay the small-diameter logs in a wide range. Their mechanical properties have been measured by VRM before and after the decay process. First, the validity of E_{tv} and ξ measurements is discussed by taking into account the geometric and material imperfections of the logs. Then, the effect of decay on each of the properties is analysed. Finally, a combined analysis of MOE and ξ is proposed to consider the effect of decay.

2.2 Materials and Methods

Preparation of samples

55 small-diameter logs of silver fir (*Abies alba*) have been taken from an alpine forest located in Lagarde-en-Oisans (Isère - France). The logs were 155 cm in length and had a mean diameter of 7.4 cm (Fig. 3.3), in order to obtain a ratio length/diameter around 18 according to the standard EN 14251 requirement (CEN, 2003). For each log, the diameter corresponds to a mean diameter obtained from measurements at both extremities and in the middle.

Degradation process

(a) (b) (c)

FIGURE 2.1 – Successive steps of samples preparation in the greenhouse : (a) The small-diameter logs laid on the ground ; (b) The small-diameter logs covered by woody debris ; (c) The whole covered by a local-soil layer.

The degradation process has been set up in a greenhouse to accelerate the decay kinetic. The 55 logs were buried in the greenhouse under a first layer of woody debris picked up in a silver fir forest and a second one of local soil layer (Fig.2.1). The logs moisture content was kept above FSP by a regular watering. As a consequence, the moisture content of decayed samples, *i.e.* samples after the degradation process, was not controlled and might vary from one sample to the other. The samples have been taken in 4 series, after 138, 347, 655 and 788 days of degradation. As the study was focused only on the level of decay, no distinction between samples according to their series was done. The kinetic of decay might actually change inside the greenhouse according to the logs position.

MOE measurement of intact or decayed small-diameter logs

The mechanical properties of the intact and decayed samples have been estimated by dynamic measurements. The boundaries conditions of the beam on the test bench (Fig. 2.2a) allowed to reproduce free-free vibrations thanks to rubber bands supports. The supports were sufficiently elastic to neglect the effect of supports position on MOE measurement. Thus, the small-diameter logs were positioned with an overhang of 10 centimetres at each extremity. A vertical impulse initiated the vibrations at 5 cm from one extremity. The vertical vibrational response was acquired at 5 cm from the other extremity with the piezoelectric accelerometer Deltraton type 4397 from Brüel & Kjr magnetised on a screw (Fig. 2.2b). The accelerometer was powered by Deltraton Power Supply WB 1372 and its signal converted by the analogue-to-digital converter PicoScope 4224 from Pico Technology. The digital signal was recorded with a sampling frequency of 20 kHz and an acquisition duration of 1.638 seconds. The frequency resolution was of 0.6Hz.

The signal processing has been developed with R software (R Core Team, 2013) and the *signal* package (signal developers, 2015). The natural frequencies were determined by the Fast Fourier Transform (FFT) of the signal. The frequencies of the first three vibration modes were recorded and used to calculate MOE values.

MOE has been calculated based both on the Euler-Bernoulli and Timoshenko models. Euler-Bernoulli theory neglects the distortion caused by shear and the effects of the elastic supports. It gives the analytical expression of MOE for beams with a high length (l) to depth (h) ratio (l/h>20 according to Brancheriau et al. (2002b)) :

$$E_n = 4\pi^2 \rho S L^4 \frac{f_n^2}{I X_n} \tag{2.2}$$

with E_n the MOE calculated for mode n, I the moment of inertia, ρ the specific gravity at the sample MC, S area of the cross section, L the beam length, f_n the natural frequency and X_n

(a) (b)

FIGURE 2.2 – (a) small-diameter log prepared on the test bench for the dynamic test. (b) Accelerometer installed on the small-diameter log.

specific coefficient : $X_1 = 500.5467, X_2 = 3803.14, X_3 = 14619.72$.

E_n was respectively noted E_n^s and E_n^d for intact and decayed states. The normalized loss in E_n of a sample is defined for the mode n by :

$$D_{w.E_n} = \frac{E_n^s - E_n^d}{E_n^s} \tag{2.3}$$

The Timoshenko theory takes into account the rotational inertia and the strain caused by shear. The effects of the elastic supports are still neglected. The modulus of elasticity is given for natural frequency n by the solution of Bordonné (Brancheriau et al., 2002b):

$$\frac{E_{timo}}{\rho} - \frac{E_{timo}}{KG}\left[\alpha F_2(m_n) 4\pi^2 \frac{SL^4}{I}\frac{f_n^2}{X_n}\right] = 4\pi^2 \frac{SL^4}{I}\frac{f_n^2}{X_n}\left[1 + \alpha F_1(m_n)\right] \tag{2.4}$$

with E the MOE, G the shear modulus, I the moment of inertia, ρ the specific gravity, S the area of the cross section, L the beam length, f_n the natural frequency, $X_n = m_n^4$, K the shear correction factor, m_n the solution of the equation $cos(m_n)ch(m_n) = 1$ and

$$F_1(m_n) = \theta^2(m_n) + 6\theta(m_n) \tag{2.5}$$

$$F_2(m_n) = \theta^2(m_n) - 2\theta(m_n) \tag{2.6}$$

$$\theta(m_n) = m_n \frac{tan(m_n)tanh(m_n)}{tan(m_n) - tanh(m_n)} \tag{2.7}$$

E_{timo} is respectively noted E_{timo}^s and E_{timo}^d for intact and decayed states. The normalized loss in E_{timo} of a sample is defined for the mode n by :

$$D_{w.E_{timo}} = \frac{E_{timo}^s - E_{timo}^d}{E_{timo}^s} \tag{2.8}$$

Damping ratio ξ measurement of intact or decayed small-diameter logs

It was assumed that the small-diameter log behaved like an underdamped system submitted to viscously damped free vibrations. This system with multiple degrees-of-freedom have several modes of vibration and can be assimilated to a superposition of dissipative linear structures with single degree-of-freedom (SDOF system) associated to each mode (Brancheriau, 2002, p.120). Thus, for each mode, the raw acceleration signal was filtered in spectral domain by a pass-band Tchebychev filter centred on the retained mode (Fig. 2.5a). As a result, the filtered acceleration

signal in temporal domain decreased exponentially overtime (Thomson et al., 1998) and its outer envelope a_{max} was temporally governed by equation 2.9 for the pulsation ω_n (Fig.2.5b).

$$a_{max}(t) = Ae^{-\xi_n \omega_n t} \tag{2.9}$$

where n is the number of the mode, ξ_n is the damping ratio, A is a constant and ω_n the fundamental pulsation.

ξ was estimated by a curve-fitting method. The natural logarithm of $a_{max}(t)$ was represented by a line, which characteristics were calculated by linear regression. ξ was the ratio between the slope of the regression line and the fundamental pulsation ω_n. ξ_n^i and ξ_n^d were respectively the damping ratio of a sample in intact and decayed states. The normalized gain in ξ of a sample was defined by :

$$D_{w.\xi_n} = \frac{\xi_n^d - \xi_n^i}{\xi_n^d} \tag{2.10}$$

Comparison $D_{w.\xi_n}$ versus $D_{w.E_n}$ and versus $D_{w.E_{timo}}$

$D_{w.\xi_n}$, $D_{w.E_n}$ and $D_{w.E_{timo}}$ were first graphically compared with boxplots, that summarize the minimum and maximum of dataset, the quartiles, the median and, if it the case, the outliers. The relationships between $D_{w.\xi_n}$ versus $D_{w.E_n}$ and versus $D_{w.E_{timo}}$ were tested by linear regression and quantified through the coefficient of determination r^2.

2.3 Results

MOE measurement of intact or decayed small-diameter logs

For intact and most of decayed samples, the first three modes were always identified. The third mode was not identified for 12 decayed samples (Table 3.3). Furthermore, depending on the log, the identification of the natural frequency on the FFT might be disturbed by peaks very close to the main one (see peak 2 on Fig.2.3). In this case, the retained value was the higher peak. The FFT of intact and decayed samples, which MC were different, differed mainly by positive or negative frequency shifts for a considered mode. The peaks intensities were also affected. The natural frequencies of intact and decayed samples, although different for a same sample, were in the same range : the differences of their mean values were lower than 11Hz *i.e.* 3% of the frequency value (Table 3.3). The standard deviations (SD) were significantly higher for the decayed samples (mode 1 : SD_d=$SD_s + 10Hz$, mode 2 : SD_d=$SD_s + 21Hz$, mode 3 : SD_d=$SD_s + 22Hz$).

For the intact samples, the mean of E_n decreased from 9231 MPa (mode 1) to 8392 MPa (mode 2) and to 7508 MPa (mode 3) (Table 3.3). E_{timo} was of 9657 MPa in average. For the decayed samples, the modulus were significantly lower (Fig.2.4). The mean of E_n were of 4625 MPa, 4378 MPa and 3784 MPa for respectively mode 1, mode 2 and mode 3. The mean of E_{timo} was of 4728 MPa. The Wilcoxon Signed-Rank test applied to intact and decayed E_n for each mode gave significantly low p-value of 1.13e-10, 1.67e-10 and 2.27e-13 for mode 1,2 and 3. For E_{timo}, the p-value was of 3.61e-10.

Damping ratio ξ measurement of intact or decayed small-diameter logs

For a considered mode, the presence of multi-peaks indicated that the signal was compound by several slightly different frequencies. As a result, the signal damping presented oscillations

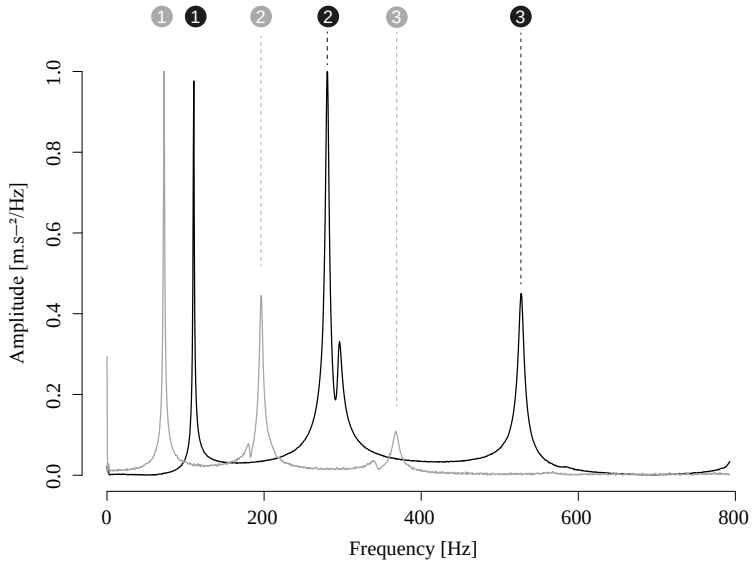

FIGURE 2.3 – FFT of the same sample at intact (black line) and decayed (grey line) states. The three first modes were identified.

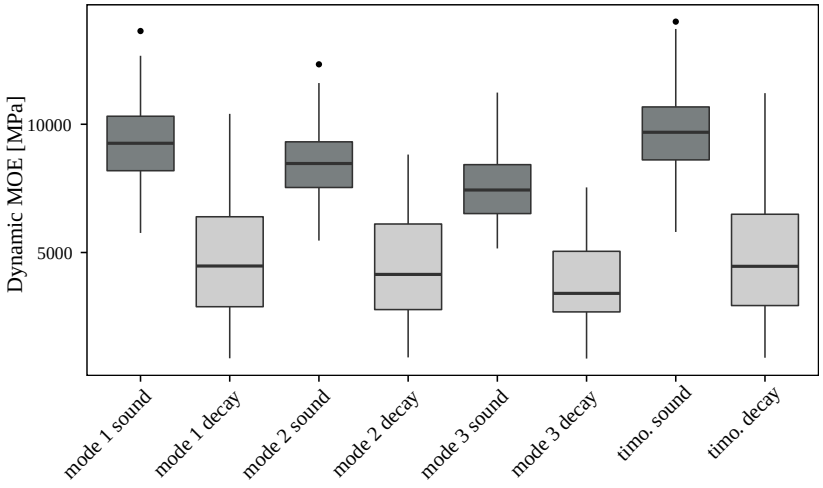

FIGURE 2.4 – Dynamic MOE of intact (black) and decayed samples (grey).

TABLE 2.1 – Physical and mechanical measurements of silver fir samples. Range and standard deviation (SD).

	Intact samples					**Decayed samples**				
	Mean	Min.	Max.	SD	N_e	Mean	Min.	Max.	SD	N_e
MC (%)	147	43	197	30	108	37	26	67	9	55
Freq 1 (Hz)	85	48	128	16	108	84	39	154	26	55
Freq 2 (Hz)	223	128	324	40	108	226	110	392	61	54
Freq 3 (Hz)	412	236	574	69	108	401	199	587	91	43
E_1 (MPa)	9 231	5 762	13 634	1 568	108	4 625	876	10 405	2 201	55
E_2 (MPa)	8 392	5 464	12 336	1 353	108	4 378	911	8 818	1 888	54
E_3 (MPa)	7 507	5 158	11 235	1 186	108	3 784	864	7 538	1 507	43
E_{timo} (MPa)	9 658	5 801	14 001	1 781	80	4 728	898	11 213	2 282	52
ξ_1 (-)	0.0050	0.0037	0.0076	0.0007	108	0.0086	0.0045	0.0189	0.0033	55
ξ_2 (-)	0.0053	0.0040	0.0078	0.0006	108	0.0096	0.0036	0.0191	0.0036	54
ξ_3 (-)	0.0057	0.0042	0.0080	0.0006	108	0.0110	0.0017	0.0207	0.0038	43

Freq n the natural frequency of mode n, E_n the MOE calculated from Euler Bernoulli model for mode n, E_{timo} the MOE calculated from Timoshenko model, ξ_n the damping ratio of mode n, N_e the number of samples

(Fig.2.5a) depending of the samples and the modes. As the damping did not follow an exponential law, the natural logarithm of $a_{max}(t)$ was noisy (Fig. 2.5b). However, the coefficients of determination R^2 were high for all modes (Fig.2.6). For modes 1, 2 and 3 of intact samples, respectively, 73%, 83% and 74% of R^2 were higher than 0.95. For modes 1, 2 and 3 of decayed samples, 73%, 89% and 74% of R^2 were higher than 0.95. Mode 2 R^2 were the highest with an average of 0.98 compare to 0.96 for other modes. Furthermore, we observed that the damping ratio (DR) increases with the mode order. The increase from one mode to the other was higher for decayed samples : in average, 11.5% compared to the 6.5% for intact samples. No correlation has been found between MC and ξ_n whatever the mode (Fig. 2.7).

The mean of ξ^d was significantly higher than the mean of ξ^i (Fig.2.8 and Table 3.3) : 0.0050 for ξ_1^i and 0.0086 for ξ_1^d, 0.0053 for ξ_2^i and 0.0096 for ξ_2^d, 0.0057 for ξ_3^i and 0.0110 for ξ_3^d. The coefficient of variation represented respectively 14%, 11% and 11% of ξ_1^i, ξ_2^i and ξ_3^i. It was lower than SD of ξ^d, that represents 38%, 38% and 35% of ξ_1^d, ξ_2^d and ξ_3^d. The Wilcoxon Signed-Rank test applied to intact and decayed ξ gave significantly low p-value of $1.07 \times 10e^{-06}$, 2.9×10^{-11} and 1.7×10^{-07} for mode 1, 2 and 3.

Comparison $D_{w.\xi_n}$ versus $D_{w.E_n}$ and versus $D_{w.E_{timo}}$

For all modes, $D_{w.E_n}$ and $D_{w.E_{timo}}$ were in the same range (Fig. 2.9). We noticed $D_{w.\xi_1}$ has a lower mean value (0.30) than $D_{w.E_1}$ (0.45) or than $D_{w.E_{timo}}$ (0.50). Similar observations have been done for the two other modes. The comparison between $D_{w.\xi_n}$ and $D_{w.E_n}$ showed a strong relationship in mode 1 ($R^2_{m1} = 0.72$) and weaker for the others ($R^2_{m2} = 0.55$, $R^2_{m3} = 0.55$) (Fig.2.10). In mode 1, the analytical expression of the regression line was $y = 0.93x - 0.13$. We noticed the constant shift of 0.13 between $D_{w.\xi_1}$ and $D_{w.E_1}$. The comparison with $D_{w.E_{timo}}$ did not reach the same level. The correlation coefficient was at most of 0.57 (mode 1) (Fig.2.11).

2.4 Discussion

As outlined in introduction, some studies showed that VRM is effective to measure MOE on intact logs. Others tested VRM to assess MOE of small squared small-diameter logs in wood decay

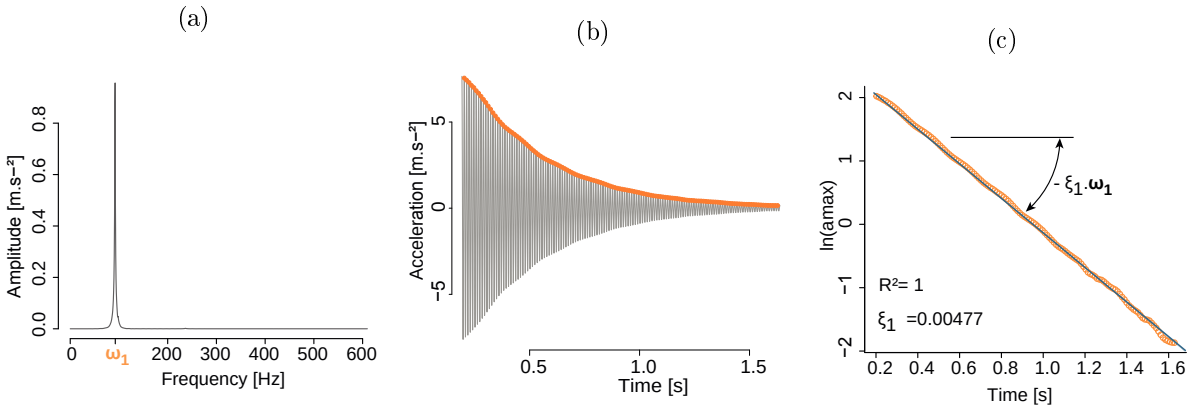

FIGURE 2.5 – Successive steps of the signal numerical treatment for ξ calculation. Example is given for mode 1. (a) FFT of the raw signal filtered by a pass-band filter centred on ω_1 (92.2 Hz). (b) first mode filtered acceleration (grey curve) and the maxima $a_{max}(t)$ (orange dots). (c) Natural logarithm of the maxima $ln(a_{max}(t))$ with its linear regression. The slope of this regression divided by the pulsation ω_1 allows to calculate ξ_1.

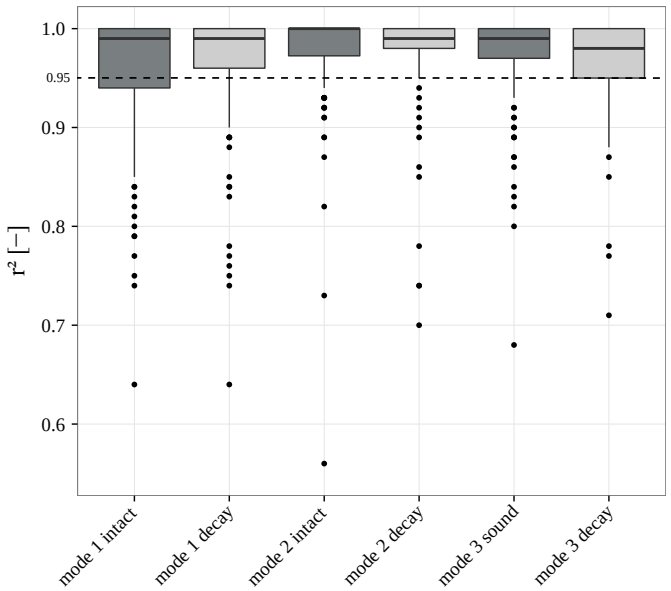

FIGURE 2.6 – Coefficient of determination R^2 of damping ratio ξ_n calculation for intact and decayed samples.

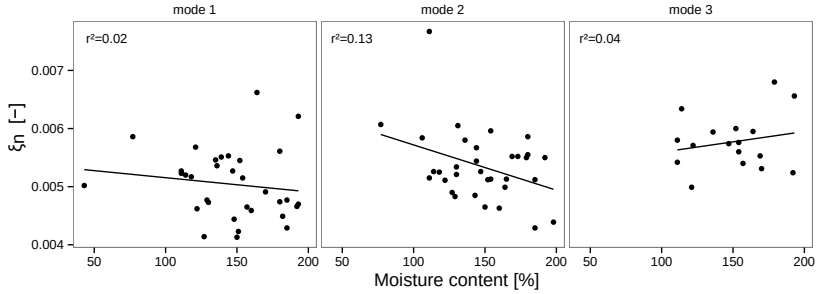

FIGURE 2.7 – Damping ratio ξ_n of the intact samples function of moisture content.

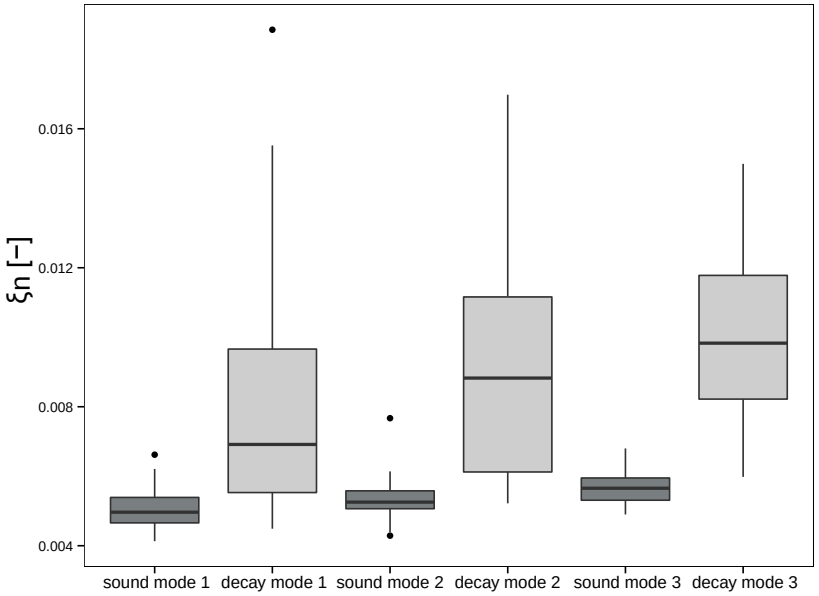

FIGURE 2.8 – Damping ratio ξ_n of intact and decayed samples calculated for the first three modes of vibration.

testing. However, more work was needed to test the effects of decay on elastic and damping properties of small-diameter logs measured by VRM. We found significant differences between MOE and ξ measured on silver fir small-diameter logs before and after the decay process. Moreover, the normalized loss of MOE and ξ were surprisingly proportional.

Reliability of MOE and ξ measurements of intact small-diameter logs

Effect of geometric imperfections. For a clear circular wooden beam loaded in a vertical plan, vibrations occur in this plan. Since the logs had not straight neutral fibre and the applied impulse was not strictly vertical, out-of-plane vibrations modes were activated as it can be deduced from the presence of multi-peaks in the FFT (Fig.2.3 peak 2). Considering the vertical loading of the log, it was assumed that the most energetic peak belongs to the vertical vibrations. The out-of-plane vibrations modes had limited consequences on the MOE measurement. Coherent values of MOE at green state were obtained according to references yielded by the literature (table 2.2). E_{timo} (9658 MPa) and E_1 (9231 MPa) were between those measured for 4 fresh logs by Lundström et al. (2008) (11500 Mpa in averaged) and those indicated by Niklas et al.

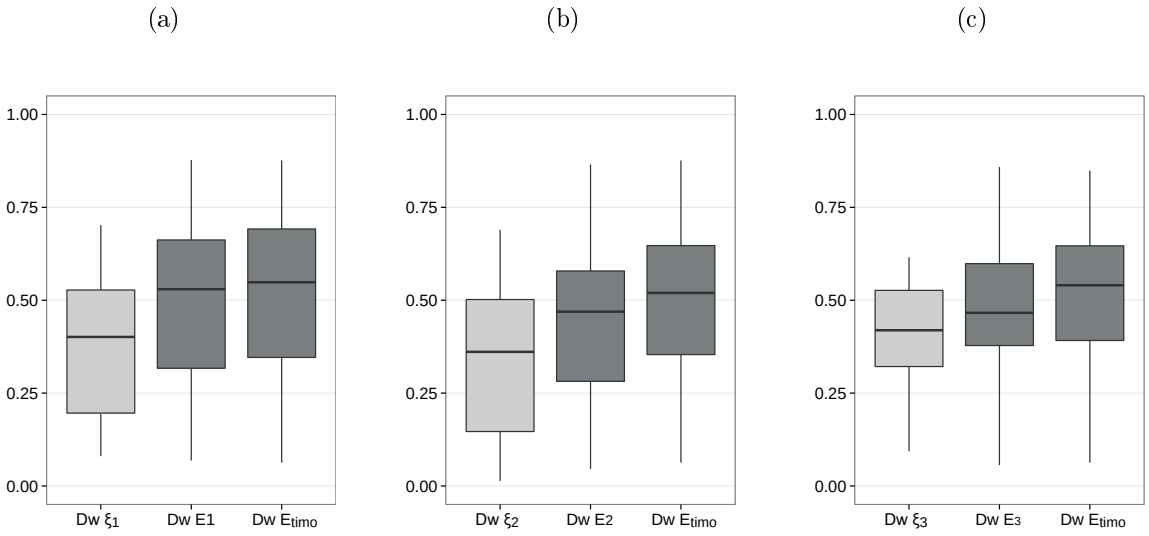

FIGURE 2.9 – Indicators D_w for mode 1 (a), mode 2 (b) and mode 3 (c)

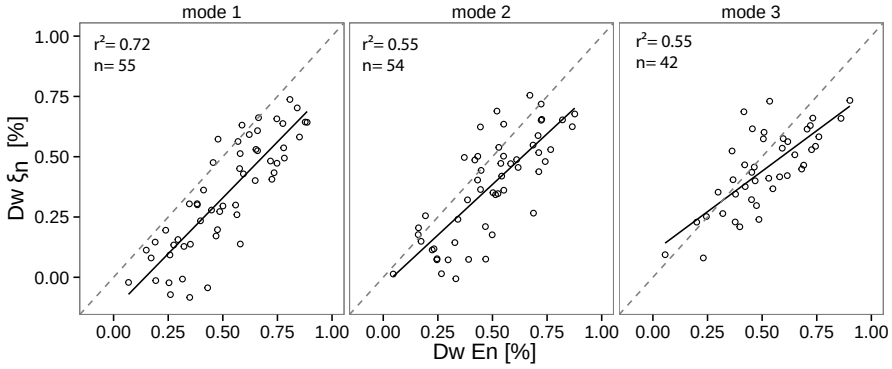

FIGURE 2.10 – Relation between $D_{w.E_n}$ and $D_{w.\xi_n}$.

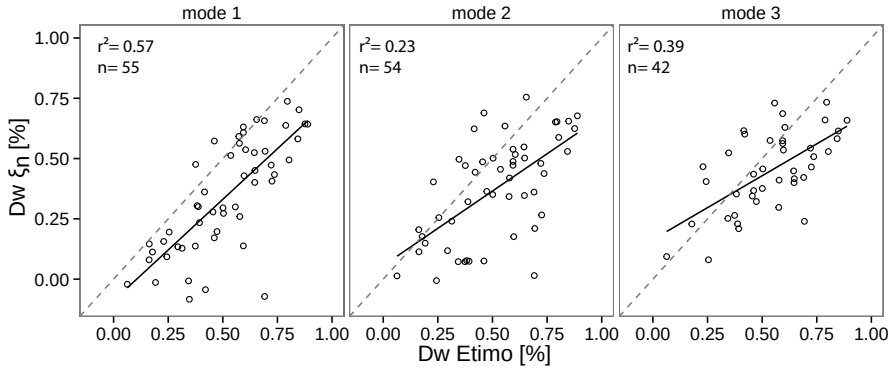

FIGURE 2.11 – Relation between $D_{w.E_{timo}}$ and $D_{w.\xi_n}$.

TABLE 2.2 – Comparison between MOE measured at green state (MC > FSP) and at 12% of moisture content for common softwoods. Variation corresponds to normalized difference between both MOE.

	MOE [MPa]		**Variation**
	12%	Green	[%]
Silver Fir	14300[2]	-	-
-	12500[3]	-	-
-	10515[4]	-	-
Mean	*12438*	-	-
Silver Fir	12438	8100[5]	-34
-	12438	11500[6]	-8
-	12438	9658[7]	-22
-	12438	9231[8]	-26
Stika Spruce	11200[1]	9400[1]	-16
Pacific silver Fir	11300[1]	9300[1]	-17.7
Western Larch	14300[1]	11400[1]	-20.3
Douglas Fir	13600[1]	11100[1]	-18
Mean	-	-	*-18*

[1] : from Kretschmann (2010), [2] : from Cirad (2015), [3] : from Haines et al. (1996), [4] : from Verkasalo et al. (2002),[5] : from Niklas et al. (2010), [6] : from Lundström et al. (2008), [7] : cf E_{timo} table 3.3, [8] : cf E_1 table 3.3

(2010)(8100 MPa). Another comparison is also possible with values of MOE measured at 12% of MC, *i.e.* MC prescribed by standards. MOE difference between measurements at green and 12% states is about 18% for common softwoods (Table 2.2). We established the same comparison taking a mean MOE of 12438 MPa at 12% of MC. Finally, MOE normalized difference between both MC was coherent for both theories. It was of 22% for E_{timo}, 26% for E_1 (see details in table 2.2). Furthermore, the influence of out-of-plane modes on ξ_n measurements remained limited. The damping was affected in varying proportions by out-of-plane modes. The more the amplitude of the secondary peaks were high, the greater the acceleration damping deviated from an exponential decrease (Fig. 2.5a). However, the quality of ξ_n measurement was high according to the determination coefficients values, especially for the second mode (Fig. 2.6).

Effect of moisture content. For wood above FSP, ξ_n was found to be independent of MC. No correlation has been found between MC and ξ (Fig. 2.7). As a consequence, the difference of MC of a log between measurements done before and after the decay process did not prevent the comparison between ξ_n^i and ξ_n^d.

Effects of decay on MOE and ξ measurements of small-diameter logs

For a given mode, a shift distinguishes natural frequencies of intact and decayed states (Fig.2.3). According to equation 2.2, two factors explain this shift : the loss in MOE induced by decay and the variations in logs mass as the MC was not controlled in the greenhouse. Thus the natural frequencies do not give themselves relevant information on decay. The calculation of E_{timo} and E_n allows to overcome the mass variations.

Regardless of the mode, a significant effect of decay on E_n or E_{timo} has been noted (Fig. 2.4). The VRM has measured the decrease in MOE due to decay even for small-diameter logs decayed by a microbial community. On that basis, it is proposed to define $D_{w.E_n}$ and $D_{w.E_{timo}}$ as references to quantify the effect of decay on the small-diameter logs. Thus, defined as normalized differences, these two indicators limit the consequences of simplifying assumptions related to the

small-diameter logs characteristics such as consideration of a mean diameter.

These results confirm that the damping ratio increases when wood is submitted to fungal activity. ξ_n^i and ξ_n^d remained actually comparable as the frequency dependence of ξ_n is limited for frequencies under 1000 Hz (Gibson, 1989; Holz, 1996).

Comparison $D_{w.\xi_n}$ versus $D_{w.E_n}$ and versus $D_{w.E_{timo}}$

As shown above, the effect of decay on ξ_n^i, E_n and E_{timo} was measurable by VRM. The ξ_n^i and MOE values gave inherently information about the level of decay thanks to significant properties variations between intact and decayed states. But the variability of these properties is so high for silver fir that we limit the argument to this study. To avoid the adverse effects of the variability, the analysis of decay with $D_{w.\xi_n}$ and $D_{w.E_n}$ is more adapted. And what is more interesting with these indicators is that they varied proportionally. This relationship was especially strong in mode 1 between $D_{w.E_1}$ and $D_{w.\xi_1}$ ($R^2 = 0.72$) (Fig. 2.10). Thus, even if the second mode of vibrations was better for ξ calculation, the first mode was more relevant to asses decay in small-diameter logs. In a performance point of view, $D_{w.\xi_1}$ underestimated the decay by 0.13% against $D_{w.E_1}$. $D_{w.\xi_1}$ could be an alternative to quantify decay instead of $D_{w.E_1}$ when neither the mass nor the geometrical characteristics of samples are known. This result raises however the question of the frequency influence on the relationship as the best results have been obtained with quite low frequencies ($48Hz < Freq1 < 128Hz$). Further investigations must be conducted to assess if the results are still significant for small-diameter logs vibrating at different ranges of frequency .

2.5 Conclusion

This study aims to investigate the potential of a non-destructive method to assess the level of decay in wooden small-diameter logs. The effect of fungal activity on the module of elasticity (MOE) and the damping ratio ξ of silver fir small-diameter logs was investigated using the vibration resonance method (VRM). Experiments confirm that VRM measures coherent MOE values with both Euler-Bernoulli and Timoshenko theories despite geometric and material imperfections. The study also points out that the moisture content (MC) has no influence on ξ for wood MC above the fibre saturation point.

In addition, the study shows the significant effect of the fungal activity on MOE and ξ assess by VRM. MOE decreases and ξ increases when wood is subjected to decay. Besides, the study highlights that their normalized variations $D_{w.\xi_n}$, $D_{w.E_n}$ and $D_{w.E_{timo}}$ change proportionally, especially for $D_{w.\xi_1}$, $D_{w.E_1}$ (first mode of vibrations : $R^2 = 0.72$). This initial work confirmed VRM as an effective method to quantify the level of decay in logs. Furthermore, $D_{w.\xi_n}$ is promising for logs whose neither the mass nor the geometric characteristics are known. Researches dedicated to the influence of the first-mode frequency value and the logs size are of interest to confirm the potential of the method.

Chapitre 3

Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc par analyse vibratoire

Assessing the level of decay of small-diameter silver fir logs degraded under semi-controlled conditions using a vibration resonance method.

Barré J.B., Bertrand D., Bourrier F., Rey F.

Article in preparation for submission at *Annals of Forest Science*.

Abstract Logs are often used to build ecological engineering structures devoted to natural-hazards mitigation. Logs are connected together and form a framework anchored on the ground. In these conditions of use, the microbial activity decomposes wood and the mechanical properties of logs decrease over time. Thus, periodic assessment of their levels of decay is needed to appraise the service life of structures. The Vibration Resonance Method (VRM), usually used to quantify the module of elasticity of straight wooden beams was identified as relevant for that purpose. Indeed, Barré et al. (Sub.) have shown that VRM allows measuring an indicator Dw_{E_n} calculated from the dynamic modulus of elasticity E_n at the nth vibrations frequency. Dw_{E_n} may be used to assess the level of decay from a macroscopic point of view, *i.e.* at the scale of the log. The aim of this study is to assess the level of decay of small-diameters silver fir logs with geometrical singularities from the indicator Dw_{E_n}. First, the influence of three geometrical imperfections (initial curvature, tapering and roundness) on quantities measured by VRM, were assessed by means of modal analysis using finite element simulations under ABAQUS environment. It emerges that the influence on the frequencies is maximum for the first order and that the intensity of the imperfections must be limited to contain the measurement error of E_n. Thus, limits in the intensity of geometric imperfections have been proposed to ensure a maximum error on the E_1 measurement of 5% ($\alpha_c < 0.061$, $\alpha_t < 0.35$ and $\alpha_r < 0.095$). The experimental logs respected these limits, thus allowing the implementation of measurements by vibration analysis. Secondly, the indicator Dw_{E_n} measured on 55 logs degraded in semi-controlled conditions was compared to the indicator of reference Dw_{MOE} measured under static conditions by four-points bending tests.

Finally, the assessment of levels of decay with Dw_{E_1} (related to the first frequency) and Dw_{E_2} (related to the second frequency) exhibited reliable results compared to Dw_{MOE} ($r^2 = 0.84$ and $r^2 = 0.83$ respectively). Given the least influence of geometric imperfections on f_2 than on f_1, the indicator Dw_{E_2} is recommended for logs with pronounced imperfections. Finally,

recommendations on how to use the method on real structures were proposed.

Keywords Non-destructive method, Modulus of Elasticity, Modal analysis, Wood decay assessment

3.1 Introduction

The ecological engineering works devoted to natural hazard mitigation generally include an inert part often made of wood. The timber structure, *i.e.* the wooden part, is made from a logs framework in ground contact. The organic nature of the material therefore involves deteriorations by saproxilic agents. Amongst them, the microbial community is the most virulent and its activity leads to wood decay. This requires regular appraisals by practitioners to monitor the service life of structures. These appraisals are mainly based on an expert opinion and local measurements of wood density or hardness. They lead to qualitative and non-reproducible assessments. Thus, methods were developed to quantitatively assess the level of decay. Romano et al. (2016) used the ultrasonic tomography to assess degradation of wood elements used in soil bioengineering structures. However, the assessment obtained with this method was weakly correlated with the modulus of elasticity (MOE), one of the mechanical properties used for the design of timber structures according to the Eurocode 5 (CEN, 2005). The correlation with the MOE is all the more important that MOE is an accurate indicator of the level of decay (Wilcox, 1978; Machek et al., 1997; Przewloka et al., 2008). However, its measurement according to the standard EN 408 (CEN, 2003) requires laboratory conditions. Thus, the issue is to quantify MOE variations due to the microbial activity by means of either a method which give measurments correlated to MOE variations or a method that allows to directly measure the MOE in the field. Barré et al. (In press) proposed to assess the level of decay by predicting mechanical indicators, based on the MOE in particular, using near infra-red spectroscopy and multivariate statistics. Nevertheless, these measurements remain at a local scale and should be performed in several locations to assess an entire log. For measurements at a global scale, the Vibration Resonance Method (VRM) has a great potential. Moreover, in a comparison between several nondestructive evaluation techniques for assessing the MOE of small-diameter logs, Wang et al. (2002) concluded that VRM is less sensitive to geometrical imperfections of the logs than the stress wave method, another common non-destructive technique.

VRM consists of measuring the acceleration of a point on a beam subjected to free transversal vibrations and assessing mechanical properties and the dynamic modulus of elasticity (DMOE) in particular. VRM was first used to measure DMOE of wooden straight beam (Haines et al., 1996; Halabe et al., 1997; Verkasalo et al., 2002) based on Euler-Bernoulli and Timoshenko beam theories (Brancheriau et al., 2002b). VRM has also been tested to evaluate DMOE of logs. Wang et al. (2002) obtained accurate measurements of DMOE compared to MOE measured by static bending test ($r^2 = 0.95$ for Red pine and $r^2 = 0.85$ for Jack pine). They noted however that VRM is sensitive to geometrical imperfections of logs. It has been confirmed by Green et al. (2008) who found weaker, but still significant, correlations for tapered logs of Douglas-fir ($r^2 = 0.54$) and Pondesora pine ($r^2 = 0.66$). Theses results show the influence of geometrical imperfections of logs on the VRM measurements without quantifying it. Regarding decay assessment, VRM is acknowledged as a relevant method to assess the level of decay of small stakes(Machek et al., 1997; Grinda et al., 2005; Alfredsen et al., 2006). Barré et al. (Sub.) identified three potential indicators (Dw_{E_n}, $Dw_{E_{timo}}$ and Dw_{ξ_n}) to assess the level of decay of small-diameter logs. They analysed 55 silver fir logs placed in a greenhouse in ground contact, *i.e.* in semi-controlled conditions, to accelerate the decay kinetic. Dw_{E_n} corresponds to the normalized loss in DMOE between intact and decayed states calculated from n^{th} vibration mode and the Euler-Bernoulli theory.

Likewise, $Dw_{E_{timo}}$ corresponds to the normalized loss in DMOE between intact and decayed states calculated from the Timoshenko theory. They also noticed that the damping ratio ξ_n also measured by VRM, was sensitive to microbial decay. ξ_n characterizes the energy dissipation of the log during the vibration process (Woodhouse, 1998). Dw_{ξ_n} corresponds to the normalized loss in damping ratio between intact and decayed states. In this study, $Dw_{E_{timo}}$ was not taken into account because the E_{timo} value is potentially more affected by material heterogeneity induced by microbial degradation. The calculation of E_{timo} is based on a couple of vibration frequencies (Hearmon, 1958) in contrast to those of E_n for which a single frequency is required. However, the influence of material heterogeneity on the vibratory response varies with frequency (Olsson et al., 2011). This results in an E_{timo} estimation error detrimental for the assessment of the level of decay. Moreover, the calculation of Dw_{xi} was judged too sensitive to the geometric imperfections of logs. Finally, it is proposed to evaluate the level of decay from the the indicator Dw_{E_n}.

The aim of this study is to assess the level of decay of small-diameters silver fir logs with geometrical imperfections degraded in semi-controlled conditions from the indicator Dw_{E_n} proposed by Barré et al. (Sub.). For that purpose, the applicability of the vibration analysis in the presence of geometric imperfections must be verified. Thus, the influences of three types of geometrical imperfections on frequencies and the dynamic modulus of elasticity were assessed by means of modal analysis using finite element analysis. VRM was carried out on logs degraded under semi-controlled conditions in order to evaluate the level of degradation with the indicator Dw_{E_n}. Evaluation by VRM was finally compared with with the reference indicators Dw_{MOE} measured by four points bending tests under quasi-static conditions.

3.2 Materials and methods

3.2.1 Silver fir samples and the degradation process

55 small-diameters logs of silver fir (*Abies alba*) were harvested in Lagarde-en-oisans (Isère - France). They were 160 cm in length and a mean diameter comprised between 6 and 11 cm. The mean diameter is an average of the diameters measured at the top, middle and bottom of the logs. For each log, a slice of 5 cm was sampled for measuring the moisture content (MC). MC was calculated from the normalized difference between the wet weight (W_h) and the oven-dry weight (W_0) of the samples (Equ. 2.1). W_0 was measured after sample drying till weight stabilization at 103.5°C.

$$MC = [(W_h - W_0)/W_0] * 100 \tag{3.1}$$

The degradation process was done in a greenhouse, located in Saint-Martin-d'-Hères (Isère - France), in order to reduce the degradation duration. The logs were buried horizontally under two layers, a lower one of silver fir woody debris to bring a microbial community profiled for silver fir decay and an upper one of local soil to reduce variations in moisture content. The experiments have occurred from April, 2014 to October, 2015. The logs were removed in 4 series after respectively 138, 347, 655 and 788 days.

3.2.2 Calculation of the dynamic modulus of elasticity

VRM consists of measuring the dynamic modulus of elasticity (DMOE) from experimental modal analysis. The log was placed on a test bench and supported by two rubber bands to reproduce the free vibrations (Barré et al., Sub.). The log was loaded by a vertical impulse at 5cm of one extremity whereas the induced vibrations were recorded at 5 cm of the other extremity by a piezoelectric accelerometer Deltraton (type 4397 - Brüel & Kjr) magnetised on a screw.

The accelerometer was powered by Deltraton Power Supply WB 1372 and its signal converted by the analogue-to-digital converter PicoScope 4224 from Pico Technology. The digital signal was recorded and treated with R software (R Core Team, 2013) and the *signal* package (signal developers, 2015). The numerical treatment of the signal identified the first three frequencies using the Fast Fourrier Transform (FFT).

The Euler-Bernoulli theory proposed a solution to calculate MOE for straight beam of constant inertia (Brancheriau et al., 2002b):

$$E_n = 4\pi^2 \rho S L^4 \frac{f_n^2}{I X_n} \tag{3.2}$$

with E_n the DMOE calculated for mode n, I the moment of inertia, ρ the specific gravity given at the sample MC, S area of the cross section, L the beam length, f_n the natural frequency and X_n a non-dimensional parameter. For free-free boundary conditions : $X_1 = 500.5467, X_2 = 3803.14, X_3 = 14619.72$.

For the calculation of DMOE, the log is assimilated to an equivalent beam with straight neutral fibre and constant inertia. Its diameter corresponds to the mean diameter of the log and the same length and specific gravity as the log are used. The value obtained under this assumption is called E_n.

3.2.3 Influences of three types of geometrical imperfections

Geometrical imperfections of small-diameter logs

Three geometrical imperfection types (initial curvature, tapering and roundness) were identified on small-diameter logs. For each type, a parameter was defined to characterise the intensity of the imperfection.

The *initial curvature* describes the shape of the neutral fibre varying from a straight-line to a circular arc (Fig. 3.1a). α_c quantifies the initial curvature variations according to equation 3.3.

$$\alpha_c = \frac{\pi}{L(2-\pi)}(l - L), l \in [L/2, L] \tag{3.3}$$

with L the length of the sample neutral fibre, l the distance between both extremities in case of initial curvature. The initial curvature can be also quantified in the middle of the sample by the initial deflection δ. When $\alpha_c = 0$ (or $\delta = 0$), the log corresponds to a perfect straight cylinder.

The *tapering* describes the tapered shape of logs (Fig. 3.1b). α_t quantifies the tapering variations according to equation 3.4. When $\alpha_t = 0$, the log corresponds to a perfect straight cylinder.

$$\alpha_t = \frac{d - D}{d + D}, d \in [D, 2D] \tag{3.4}$$

The *roundness* describes the elliptical character of the cross-section (Fig. 3.1c). α_r quantifies the roundness variations according to equation 3.5.

$$\alpha_r = 2\frac{D_e - d}{D_e}, D_e \in [d, 2d] \tag{3.5}$$

The modal analysis was performed for roundness developed according to two directions called *direction 1* when the ellipse is horizontal and *direction 2* when the ellipse is vertical. When $\alpha_r = 0$, the log corresponds to a perfect straight cylinder.

The influence of each imperfection was obtained for different intensities of imperfection. For each intensity, the first four frequencies of vibrations were calculated by modal analysis.

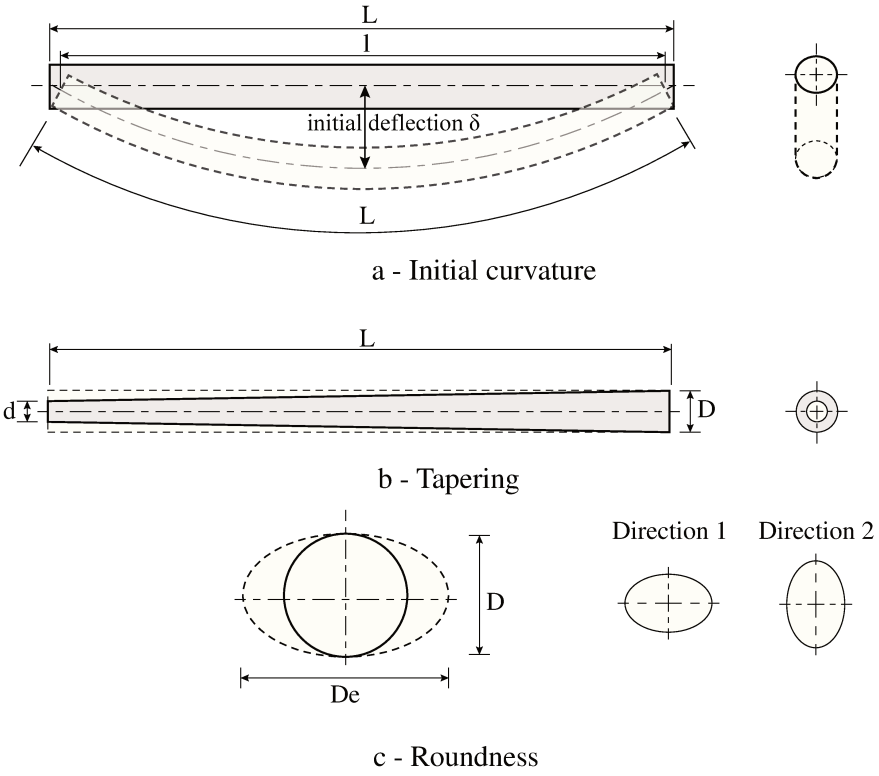

FIGURE 3.1 – The three geometrical imperfections of logs taken into account in the parametric study. For the roundness, the directions 1 and 2 indicate the direction in which modal analysis was performed.

TABLE 3.1 – Wood elastic properties of the modelled log in the modal analysis from Guitard (1987).

Property	value
ρ $[kg/m^3)]$	430
E_r [MPa]	910
E_t [MPa]	490
E_l [MPa]	13800
G_{rt} [MPa]	30
G_{tl} [MPa]	710
G_{rl} [MPa]	730
ν_{rt} [-]	0.558
ν_{tl} [-]	0.019
ν_{rl} [-]	0.030

Frequencies of vibration calculated from modal analysis

The modal analysis gives the vibration response of a structure. It characterizes each vibration mode by its frequency, its modal damping and its modal shape. The vibration response depends on the geometry, material properties and boundary conditions of the structure. In this study, the modal analysis was carried out using Finite Element (FE) analysis under ABAQUS standard (version 6.13). An idealized log of 155 cm in length and 10 cm in diameter according to the dimensions of the experimental logs was modelled using three-dimensional FE of C3D20 type, *i.e.* a second order hexahedron with 20 nodes. The FE average size was 1.67 cm. The material was supposed elastic and orthotropic (Table 3.1).

The results of the modal analysis were reported as the normalized difference of frequencies Δf_n between the idealized log ($\alpha_c = 0$, $\alpha_t = 0$ and $\alpha_r = 0$, *i.e.* straight and cylindrical) and the distorted log. For the experimental data set, the modal analysis has allowed assessing the maximum Δf_n relating to maximum values of parameters α_c, α_t or α_r, previously measured on each experimental log.

Effects of geometrical imperfections on DMOE

Considering the maximum values of the geometrical imperfections measured on all experimental logs, a maximum valuation error on E_n was estimated. For that purpose, the maximum frequency difference Δf_n between the log with the maximum geometrical imperfection and an equivalent log without geometrical imperfection is used. This maximum frequency difference is estimated from the numerical simulations. The valuation error of E_n was assessed by equation 3.6.

$$\varepsilon_{E_n} = \frac{E_n - E_n^*}{E_n^*} = 2\Delta f_n + \Delta f_n^2 \tag{3.6}$$

with E_n the DMOE of the equivalent beam with geometrical imperfections and E_n^* the DMOE of the straight log without geometrical imperfections.

3.2.4 Assessing the level of decay from the indicator Dw_{E_n} and comparison with the indicator of reference Dw_{MOE}

Calculation of Dw_{E_n} using Vibration Resonance Method (VRM)

To obtain Dw_{E_n}, the log is measured twice, once at intact state and a second time in the degraded state. For both measurements, the log is positioned identically on the test bench. E_n was respectively noted E_n^i and E_n^d for intact and decayed states. The normalized loss in E_n (Dw_{E_n}) of a sample is the first indicator of the level of decay measured by VRM. It is defined for the mode n by equation 3.7.

$$Dw_{E_n} = \frac{E_n^i - E_n^d}{E_n^i} \tag{3.7}$$

Calculation of Dw_{MOE} using quasi-static bending tests

The modulus of elasticity (MOE) was measured by 4-points bending tests according to the prescriptions of EN 408 :2003 standard (CEN, 2003). The rate of movement of the loading head was 10 mm/s. The displacement of the log was measured at mid-span by a Linear Variable Differential Transformer (LVDT) sensor. This configuration allowed calculating a global modulus of elasticity according to equation 3.8.

$$MOE = \frac{a}{48I}\frac{F_2 - F_1}{w_2 - w_1}(3L^2 - 4a^2) \tag{3.8}$$

where

a the distance between a loading position and the nearest support,

$I = \dfrac{\pi d^4}{64}$ is the moment of intertia,

$F_2 - F_1$ is an increment of load in the linear portion of the load-deformation curve,

$w_2 - w_1$ is the increment of displacement corresponding to $F_2 - F_1$,

L the distance between supports.

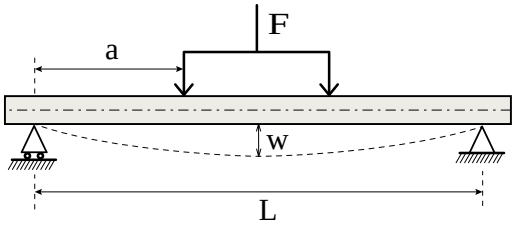

FIGURE 3.2 – Four points bending test.

The reference indicator of the level of decay Dw_{MOE} was calculated from a first measurement of MOE at intact state and a second at decayed state and defined according to equ. 3.9.

$$Dw_{MOE} = \frac{MOE_i - MOE_d}{MOE_i} \tag{3.9}$$

where $\mathrm{MOE_i}$ and $\mathrm{MOE_d}$ are MOE of one sample at intact and decayed states, respectively.

3.3 Results

3.3.1 Influences of three types of geometrical imperfections

The initial curvature influences frequencies (Fig.3.4). The first frequency (f_1) is more sensitive to the initial curvature than the others. For $\alpha_c = 3.8\%$, *i.e.* an initial deflection of 10 mm, the

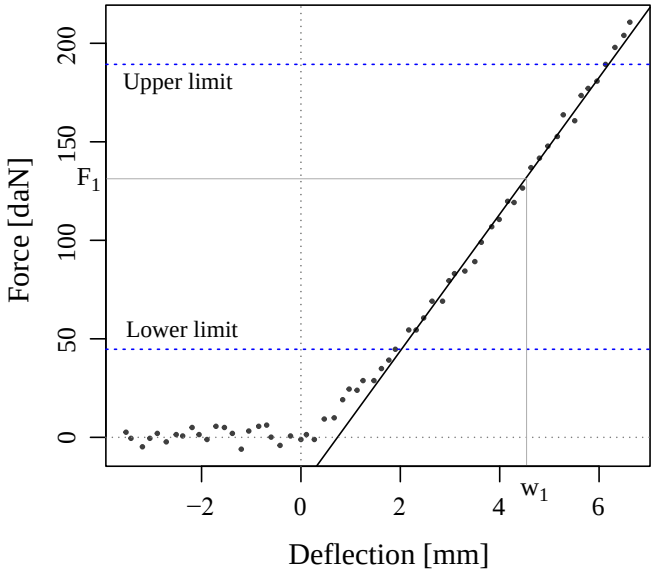

FIGURE 3.3 – Force-deflection curve of a four points bending test. The horizontal dotted lines correspond to the lower and upper limits taken into account for the MOE calculation.

variation of frequency is limited to 1.4%. The roundness influences frequencies whether the ellipse was set horizontally (direction 1) or vertically (direction 2) (Fig. 3.6). f_1 is more affected than the other frequencies. The tapering influence increases slowly for $\alpha_t \in [0, 0.5]$ (variation below 5%) (Fig. 3.5). For $\alpha_t > 0.5$, it is different according to the vibration mode. Δf_1 rise to 17.5% whereas it has a slight effect on Δf_2. The tapering increases Δf_1 and decreases Δf_3.

The three types of geometric imperfections were measured for each experimental log and their maximum values were used to calculate the frequency variations Δf_n and the errors of DMOE evaluations ϵ_{E_n} for the first three vibration frequencies (Table 3.2). Of all types and frequencies combined, the maximum ϵ_{E_n} was identified in the first mode of roundness type and was 4.9 %.

TABLE 3.2 – Maximum variation frequency Δf_n and resulting error ε_{E_n} for logs of the experimental dataset.

imperfection type	Δf_1	ϵ_{E_1}	Δf_2	ϵ_{E_2}	Δf_3	ϵ_{E_3}
Initial curvature : α_c=3.28	1.4%	2.6%	0.8%	2.1%	0.5%	1.2%
Tapering : α_t=0.25	2.0%	3.9%	0.1%	1.6%	1.0%	2.8%
Roundness : α_f=0.1	2.5%	4.9%	2.1%	4.2%	1.8%	3.6%

3.3.2 Assessing the level of decay from the indicator Dw_{E_n} and comparison with the indicator of reference Dw_{MOE}

The mean MOE measured at intact state by static bending test was 8774 MPa and the standard deviation (SD) 1688 MPa. The variation coefficient of intact samples was of 19%. The mean MOE measured at decayed state was 5491 MPa and SD 1688 MPa. The table 3.3 presents the results of decay-extent assessment by the indicator of reference Dw_{MOE} and the indicator Dw_{E_n} measured by VRM.

The comparison of the level of decay indicators Dw_{MOE} and Dw_{E_n} gave high coefficients of determination especially for the modes 1 ($r^2 = 0.84$) and 2 ($r^2 = 0.83$) (Fig. 3.7). For mode 3,

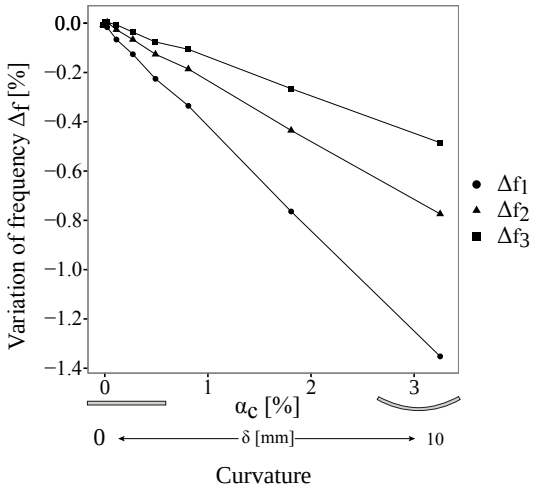

FIGURE 3.4 – Influence of log initial curvature on the first four frequencies of vibration.

TABLE 3.3 – Indicators of the level of decay. The reference indicator Dw_{MOE} and the indicator Dw_{E_n} calculated for the first three modes of vibration. Range and standard deviation (SD). N_e is the number of samples

	Mean	Min.	Max.	SD	N_e
Dw_{MOE} [-]	0.57	0	0.79	0.25	45
Dw_{E_1} [-]	0.50	0.07	0.88	0.20	45
Dw_{E_2} [-]	0.46	0.05	0.87	0.19	44
Dw_{E_3} [-]	0.40	0.06	0.90	0.17	34

the coefficient of determination is 0.68.

3.4 Discussion

3.4.1 Influences of three types of geometrical imperfections

VRM considers samples as straight cylindrical beams and disregards geometrical imperfections in equation 3.2. The influence of these imperfections on vibration frequencies was quantified by modal analysis to evaluate the consequences of this simplifying assumption. This numerical approach takes into account each imperfection separately and considers them as perfect, i.e. numerical models have vertical symmetry plane passing through its longitudinal axe. As a consequence, out of plane vibration modes have not been noticed as it was the case with real logs by Barré et al. (Sub.). For each imperfection type, the fundamental frequency f_1 is the most influenced frequency beside f_2 and f_3. This result confirms in particular that the Timoshenko theory is less appropriate than that of Euler-Bernoulli to perform measurements on logs with geometric imperfections.

Thus, the initial curvature, the tapering and the roundness may be acceptable depending on their intensities. The imperfections measured on experimental logs provide for that purpose first indications as they led to a maximum error ε_{E_n} of 4.9% (Table 3.2). Furthermore, complementary indications may be given by fixing an acceptable error ε_{E_n} and determining the corresponding parameters α_c, α_t and α_r by means of results of modal analysis. The inversion of ε_{E_n} expression (Equ. 3.6) allowed calculating Δf_n corresponding to the maximum desired ε_{E_n}. Thus, considering

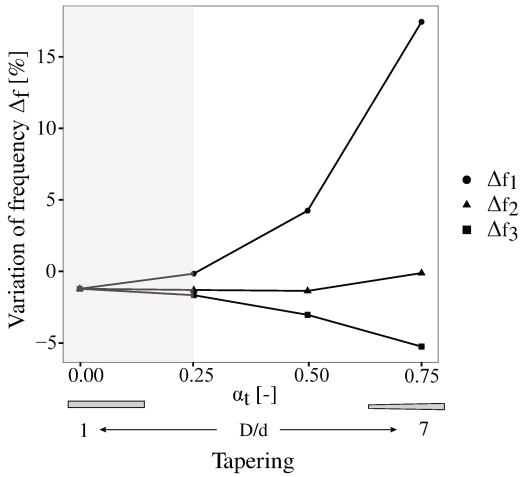

FIGURE 3.5 – Influence of log tapering on the first four frequencies of vibration. The grey ribbon corresponds to the range of tapering measured on the logs of the experimentation.

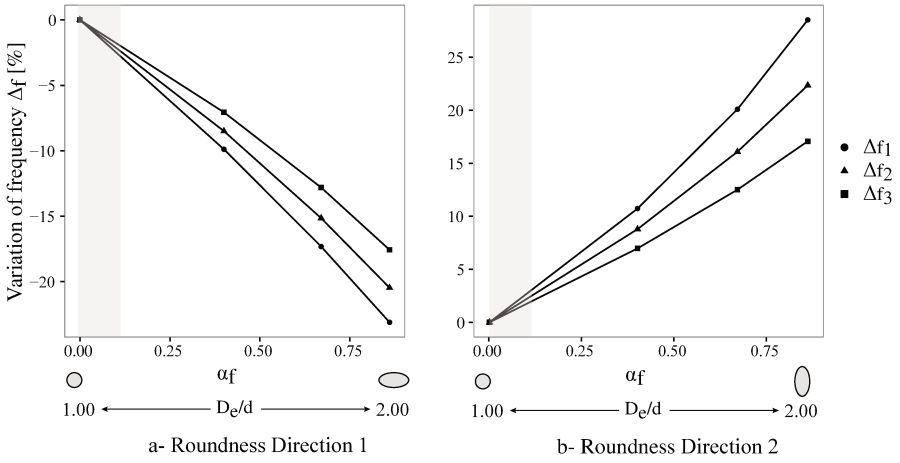

FIGURE 3.6 – Influence of the roundness of the cross-section on the first four frequencies of vibration. The grey ribbon corresponds to the range of roundness measured on the logs of the experimentation.

ε_{E_n} at most 5%, Δf_n should be at most 2,47%. Therefore, the initial curvature, tapering and roundness should be respectively at most 6.13% for α_c, 3.5% for α_t and 9.5% for α_r considering calculation with f_1.

The error ε_{E_n} has however limited consequences for the indicator Dw_{E_n}. We assumed actually that Δf was not influenced by decay as long as the log geometry is not modified by decay. The vibrations frequencies change between intact and decayed states because of change in mechanical properties and in MC, which leads to a change in the logs mass. But the variation of frequencies due to geometry imperfections may be considered the same at intact state Δf_i and decayed state Δf_d ($\Delta f_i \simeq \Delta f_d$) as long as the log is positioned in the strictly same way on the test bench between both measurements. Thus, the definition Dw_{E_n} by normalized difference allows to limit largely the effects of the geometrical imperfections. These results confirm the interest of assessing the level of decay from the indicator Dw_{E_n} instead of using E_n directly.

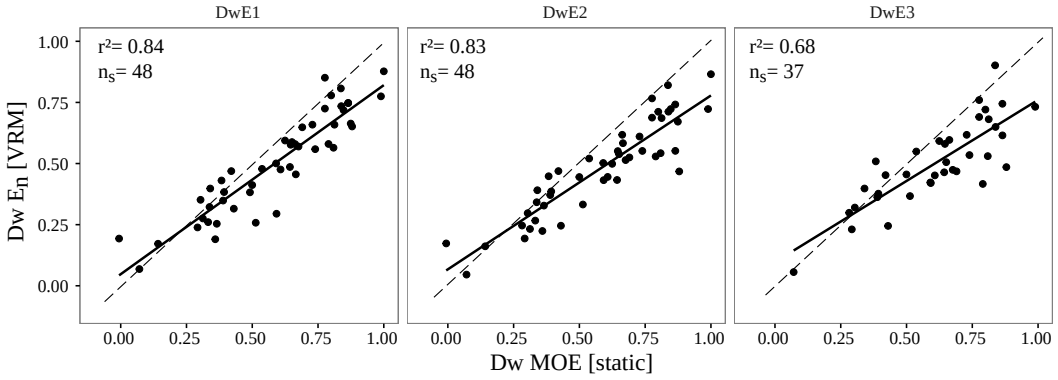

FIGURE 3.7 – Comparison of indicators of the level of decay Dw_{MOE} and Dw_{E_n} assessed by static method (Dw_{MOE}) and VRM (Dw_{E_n}). The black lines correspond to regression lines. The dashed lines correspond to the line of equality and n_s to the number of samples.

3.4.2 Assessing the level of decay from the indicator Dw_{E_n} and comparison with the indicator of reference Dw_{MOE}

The assessment with Dw_{E_n} is closed to those obtained with Dw_{MOE} for the first two modes of vibration (Fig. 3.7). Moreover, the first two modes have been systematically identified, while mode three may in some cases be too attenuated. Thus, we proposed to assess the level of decay with results of mode 1 or mode 2 depending of the intensity of the geometrical imperfections. As f_2 is less sensitive to geometric imperfections, it should be used when the geometry of the log reaches the recommended limits of imperfections ($\alpha_c < 0.061$, $\alpha_t < 0.35$ and $\alpha_r < 0.095$).

The appraisal of structures of ecological engineering may be considered by VRM. VRM is a fast and energy self-sufficient technique. It needs however a proper methodology to consider VRM as a non-destructive method. Thus, in order to assess the level of decay of logs of real structures with VRM, we proposed to perform measurements on *control samples*. Control samples correspond to pieces collected in the same logs used to build the structure to have a similar durability. They would be incorporated at several locations of the structure throughout the construction but would not have structural function. They would be easily removable in order to perform the monitoring. The geometrical characteristics of the control samples should respect the recommendations discussed previously regarding the geometrical imperfections

3.5 Conclusion

VRM provides a quantity Dw_{E_n} identified by Barré et al. (Sub.) as of interest for decay-extent assessment of small-diameter silver fir logs. The influence of geometrical imperfections on vibration frequencies was assessed by modal analysis. Three main imperfections were identified on the experimental logs and quantified by three parameters α_c, α_t and α_r for, respectively, the initial curvature, the tapering and the roundness. It was shown that the natural frequency f_1 is most affected by imperfections than frequencies of other modes. The imperfections of experimental logs led to frequency variations at most 2.5% and an error of E_n at most 4.9%. Furthermore, the analytical definition of Dw_{E_n} allows to limit largely the effects of the geometrical imperfections while logs are monitored in exactly the same position on the test bench between intact and decayed states.

The comparison of Dw_{E_n} with the reference indicators Dw_{MOE} have shown that Dw_{E_1} and Dw_{E_2} are relevant indicators of the level of decay. Dw_{E_2} is of interest when logs have a high

tapering as it affects f_2 to a lesser extent.

Finally, the use of VRM may be considered to monitor logs states of real structures. This requires first to confirm results with logs decayed in natural conditions. It needs secondly to create *control samples* that should be easily removed of the structure. The control samples would be monitored all along the service life of the structure to inform the practitioner on the residual properties of logs. He should however take into account the large variability of the level of decay within a structure when positioning the control samples.

acknowledgements This work was financed within the framework of Arc Environnement (Rhône Alpes Region. France)

Chapitre 4

Synthèse

Dans cette partie, nous avons cherché à évaluer le niveau de dégradation mécanique de rondins de sapin blanc, dégradé en conditions semi-contrôlées, au moyen de l'analyse vibratoire. Pour cela, une expérimentation en conditions semi-contrôlées a été mise en place. Elle a permis de produire un jeu de données issu de 55 rondins de sapin à différents niveaux de dégradation. À partir de ces données, les effets de la dégradation sur deux grandeurs mécaniques (le module d'élasticité et le taux d'amortissement) et sur trois indicateurs qui en sont issus (Dw_{E_n}, $Dw_{E_{timo}}$ et Dw_{ξ_n}) ont été évalués au moyen de l'analyse vibratoire (Chapitre III.2). Ensuite, l'influence de la courbure de la fibre neutre, de la conicité de la tige et du caractère elliptique de la section a été étudiée afin de déterminer des intensités d'imperfections acceptables. L'indicateur Dw_{E_n} a ensuite été comparé à un indicateur de référence Dw_{MOE}, établi dans des conditions de test quasi-statique, montrant l'aptitude de l'analyse vibratoire à évaluer du niveau de dégradation d'un rondin dégradé en conditions semi-contrôlées (Chapitre III.3). Ces deux études permettent au final de proposer une méthode d'évaluation du niveau de dégradation d'un rondin par analyse vibratoire. L'applicabilité de cette méthode repose notamment sur des restrictions quant à l'intensité des imperfections géométriques des rondins, le choix des indicateurs Dw_{E_1} ou Dw_{E_2} et une méthodologie adaptée au contexte des ouvrages de protection en bois.

Les imperfections géométriques.

Les imperfections géométriques ont une faible influence sur les indicateurs de par leur définition, et ce, tant que les rondins sont mesurés dans la même position à l'état intact et à l'état dégradé. Toutefois, les mesures expérimentales sur les rondins ont montré l'apparition de modes de vibration hors plan attribués aux imperfections géométriques. Ces modes bruitent la réponse vibratoire et perturbent l'identification des fréquences de vibrations ainsi que la détermination du taux d'amortissement. Il est donc nécessaire de limiter l'intensité des imperfections géométriques. L'analyse modale par éléments finis a permis de calculer leur intensité maximale pour limiter l'erreur d'estimation du module d'élasticité E_1 à 5%. Ainsi, la courbure initiale de la fibre neutre α_c doit être inférieure à 0.061, la conicité de la tige α_t à 0.35 et, pour la section transversale, un caractère elliptique α_f inférieur à 0.095. Enfin, ces analyses ont montré que les imperfections géométriques ont une influence qui décroit avec l'ordre des modes.

Les indicateurs du niveau de dégradation.

Parmi les indicateurs initialement envisagés pour évaluer le niveau de dégradation par analyse vibratoire, les meilleurs résultats ont été obtenus avec Dw_{E_1} et Dw_{E_2}, basés sur les modules d'élasticité d'Euler-Bernoulli calculés pour les premier (E_1) et deuxième modes (E_2) de vibration.

Leur comparaison avec l'indicateur Dw_{MOE} donne un coefficient de détermination r^2 de 0.84 avec Dw_{E_1} et de 0.83 avec Dw_{E_2}.

Méthodologie pour appliquer la méthode à des éléments constitutifs d'un ouvrage de protection en bois.

La méthode par analyse vibratoire requiert des conditions d'appui libre-libre qui ne correspondent pas à celles des rondins en place dans un ouvrage. L'alternative consiste alors à effectuer les mesures sur des échantillons de contrôle aux caractéristiques identiques à celles des rondins de l'ouvrage. Ces échantillons doivent être positionnés à des emplacements accessibles une fois l'ouvrage terminé et disposés de manière à pouvoir les extraire facilement. Enfin, la géométrie de ces échantillons doit faire l'objet d'une attention particulière pour qu'ils respectent les limites sur les imperfections géométriques. Dans ces conditions, il est envisageable de suivre, dans le temps, le niveau de dégradation de la structure bois par analyse vibratoire de manière non destructive via les échantillons de contrôle.

Quatrième partie

Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin dégradés en conditions naturelles par SPIR et analyse vibratoire

Chapitre 1

Introduction

Les méthodes présentées en partie II et III de ce mémoire ont été développées en conditions semi-contrôlées afin d'accélérer le processus de dégradation. Ces conditions ont eu pour conséquence une perturbation de la communauté microbienne tant au niveau de sa composition que de son activité. D'après les spectres proches infrarouges obtenus sur les échantillons dégradés en conditions semi-contrôlées, la communauté microbienne a eu un impact essentiellement sur les polysaccharides (cellulose et hémicellulose), la lignine ayant été peu affectée. Ceci laisse supposer que la dégradation a été majoritairement réalisée par des champignons de type pourriture brune. Or, les différents types de pourriture affectent le MOE et le MOR de manière différente, traduisant des rôles propres à chaque composant chimique dans l'origine des propriétés mécaniques du matériau. Par ailleurs, les rondins ont été totalement enfouis dans la serre sous une couche de sol de 5 cm pour limiter l'hétérogénéité de la dégradation dans la section transversale. Il serait utile de tester une disposition plus proche de celles rencontrées sur les ouvrages de protection, notamment celle ou seule une face est en contact du sol alors que l'autre est à l'air libre.

Ainsi, il est nécessaire de tester les méthodes par SPIR et analyse vibratoire dans des conditions similaires à celle des ouvrages de protection en bois et de confronter les évaluations réalisées par ces méthodes.

L'objectif de cette partie est d'évaluer le niveau de dégradation de rondins de sapin dégradés en conditions naturelles par SPIR et analyse vibratoire. Le premier sous-objectif est de vérifier l'applicabilité des méthodes sur des rondins dégradés en conditions naturelles et en contact partiel avec le sol. Le second sous-objectif est de comparer les niveaux de dégradation obtenus à partir des 2 méthodes, tout en considérant qu'elles évaluent le niveau de dégradation à des échelles différentes.

Démarche expérimentale

60 rondins de sapin blanc, aux caractéristiques identiques à celles utilisées pour les expérimentations en conditions semi-contrôlées, ont été répartis sur quatre sites expérimentaux situés dans la vallée du Grésivaudan en Isère (France). Les sites retenus se différencient par leur altitude, leur exposition, la présence ou non de végétation haute (couvert forestier) et la présence ou non d'un cours d'eau à moins de deux mètres des échantillons. Ces différences étaient destinées à faire varier les conditions de température et d'humidité au niveau du sol. Par ailleurs, les méthodes d'évaluation ont été appliquées selon les méthodologies décrites précédemment. Dans cette partie, le niveau de dégradation obtenu par la méthode SPIR, appelé Dw_{nirs}, correspond à la prédiction de l'indicateur Dw_{MOE}. Celui obtenu par analyse vibratoire correspond à l'indicateur Dw_{E1}. Afin de faciliter la comparaison entre les indicateurs Dw_{nirs} et Dw_{E1} et atténuer leurs écarts, dus notamment à la différence d'échelle d'investigation, 4 classes de dégradation ont été définies.

À l'issue des évaluations, chaque échantillon a été affecté à une classe de dégradation pour la méthode par SPIR et à une autre pour la méthode par analyse vibratoire. La comparaison entre les méthodes a été effectuée notamment au moyen d'un tableau de contingence.

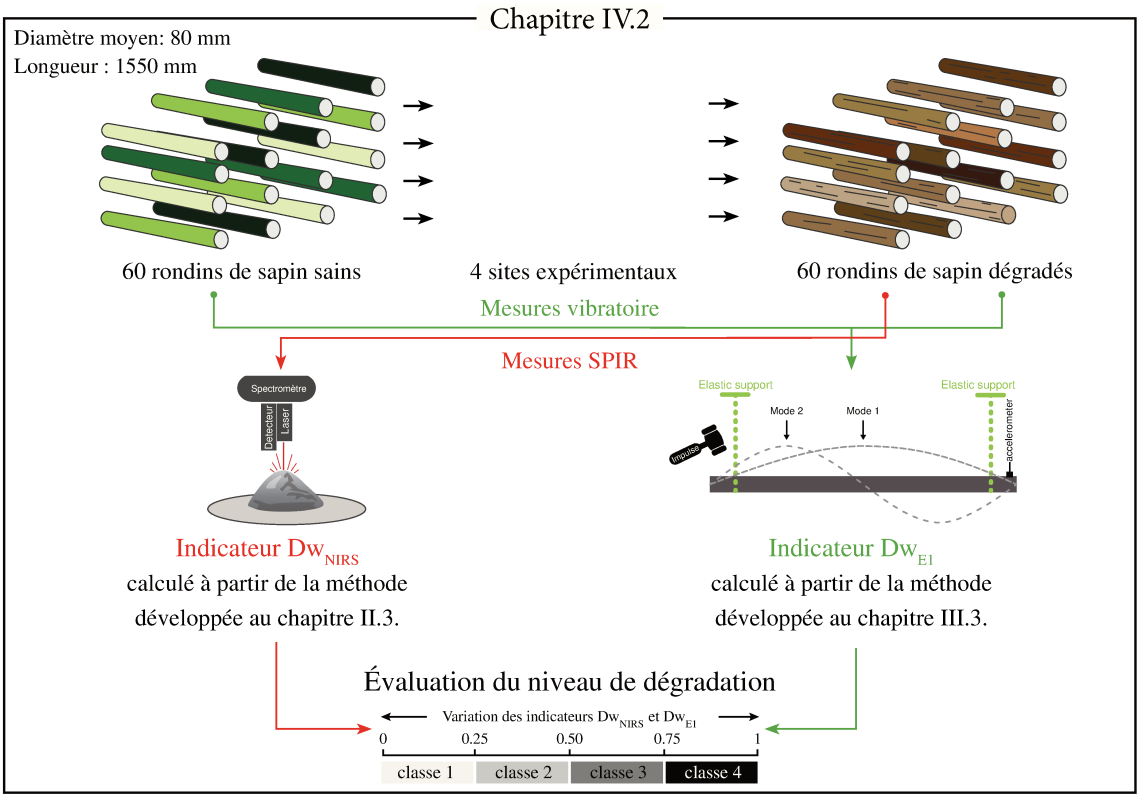

FIGURE 1.1

Chapitre 2

Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin dégradés en conditions naturelles par SPIR et analyse vibratoire

Assessment of the level of decay of small-diameter silver fir logs degraded in natural conditions in the French Northern Alps using NIRS based and vibration resonance methods.

Barré J.B., Bourrier F., Bertrand D., Thévenon M.F., Rey F.

Article in preparation for submission to *Ecological engineering*.

Abstract Bioengineering structures devoted to natural hazards mitigation often require the implementation of vegetation and inert-materials, mainly timber logs. The latter have to ensure the protection function of the structure until the crop development of the plants is sufficient. The structural use of raw wood, i.e. without wood preservatives treatment, in severe decay conditions is specific to these techniques. It raises practical and scientific issues regarding wood-decay assessment for structures management but also for studies related to design improvements. In this study, two assessment methods of the level of decay - Near Infra-Red Spectroscopy (NIRS) method and Vibration Resonance Method (VRM) - developed on logs degraded in semi-controlled conditions were applied and compared. These methods are based on mechanical definition of the level of decay by means of the normalized loss in modulus of elasticity between intact and decayed states. The level of decay of 60 silver fir small-diameter logs degraded in natural conditions in the French Northern Alps were assessed by both methods. The samples had been put on the ground in four different sites near alpine torrents. Thus, the degradation process was supposed to take place in aerobic conditions. The level of decay of each method has been restored in the form of a classification varying from class 1 for the less decayed logs to class 4. As a result, both methods allowed assessing the effects of the microbial activity on the logs. The levels of decay were mainly of classes 1 and 2 in both cases but in various extent depending on the method. Finally, both methods might be used for the assessment of the level of decay of logs decayed.

Keywords classification, microbial community, silver fir, near infra-red spectroscopy, vibration resonance method, modulus of elasticity

2.1 Introduction

One of the multiple objectives of ecological engineering, viewed as the design of projects using and/or acting for nature (Rey, 2017), is the mitigation of natural hazards such as shallow landslides (Mao et al., 2012) and soil erosion (Rey, 2009). As ecological engineering solutions, bioengineering structures are composed of a living part made of plants. An inert part is usually added so that plants could reach their maturity and resist to constraints and forces imposed by environment (Tardío et al., 2016). This often involves a timber logs assembly made of local species (Zeh, 2007). Developing these bioengineering structures is an opportunity to take advantage of the biodegradability of wood (Kail et al., 2007). Nevertheless, there is a lack of knowledges slowing down the prescription of this kind of structures. One of the main points, which has been highlighted by practitioners, is the assessment of the structures characteristics on time and the level of decay of logs in particular. The logs suffer actually from wood decomposers.

Wood decomposition is the consequence of the action of the saproxilic community, composed of insects, their larvae and the microbial community, which are naturally present in soils (Stokland et al., 2012). The decay is a particular case of wood decomposition and is the consequence of the microbial activity (Zabel et al., 1992). In this context, the microbial activity is mainly the result of the fungal or bacterial activity depending on the aerobic conditions. Fungi decay the wood in aerobic conditions while bacteria decay the wood in anaerobic conditions. For bioengineering structures, the wood in ground contact and not immersed, is not saturated in water and offers the suitable aerobic conditions to fungal growth (Noetzli et al., 2008). In this conditions, fungi depolymerize wood chemical compounds (lignin, cellulose and hemicellulose) and transform the wood at the microscopic and macroscopic scales. This leads to decreases in mechanical properties and density, including the Modulus Of Elasticity (MOE) (Wilcox, 1978). Based on the changes in wood properties, methods were developed to assess the level of decay of wood (Zabel et al., 1992).

A lot of efforts have been dedicated to assess the level of decay of wood in structural uses to predict the residual service life of structures. However, ecological engineering structures bring new challenges as they are made of logs with natural geometric imperfections compared to sawn timbers. Moreover, logs are directly in ground contact and in extremely variable moisture conditions. In the context of bioengineering structures, the assessment of the level of decay is mainly based on visual inspections of the entire structure and of each logs, as it may be done on other timber structures (Feio et al., 2015). The visual inspection is to identify and localize the most damaged parts. The practitioner may also complete its inspection by a fungi identification (Noetzli et al., 2008; Rickli et al., 2014) and a residual logs cross-section evaluation. The visual investigation is quantitative and rests mostly on the practitioner experience. Thus, the visual investigation is generally coupled with Non-Destructive Techniques (NDT) (Kasal et al., 2011) or Semi-Destructive Techniques (SDT) (Noetzli et al., 2008; Rickli et al., 2014; Akita, 2015) to quantitatively assess the remaining wood properties. Amongst SDT, the resistance drilling is a common technique that measures the needed energy of drilling (Rinn et al., 1996). The resistance drilling allows detecting changes in density and is suited for bioengineering structures investigation (Ceraldi et al., 2001). Amongst NDT in the context of bioengineering structures, Romano et al. (2016) studied the decay assessment by means of ultrasonic tomography that consists in measuring the transit time of an ultrasonic wave trough the wood sample. However, they did not find any evident and robust correlation between NDT and standard static bending tests measuring mechanical properties. Previati et al. (2012) monitored decay levels of logs using their water content measured by time domain reflectometry usually used for soil water content. But the measurements have not been compared with the remaining mechanical properties of logs.

Recently, two other methods were developed byBarré et al. (In prep.[b]) and Barré et al. (In prep.[a]) to assess the level of decay of small-diameters silver fir (*Abies alba*) logs degraded in semi-controlled conditions. Barré et al. (In prep.[b]) used *Near Infra-Red Spectroscopy (NIRS)* to assess the level of decay. This method is based on a prediction model of a reference indicator Dw_{MOE} using post-treated spectra. Dw_{MOE} was defined as the normalized loss in MOE of logs measured by static bending test between intact and decayed states. Dw_{MOE} is ranging from 0 to 1. The second method of assessment of the level of decay has been proposed by Barré et al. (In prep.[a]), who developed two indicators Dw_{E_n} and Dw_{ξ_n} calculated from measurements obtained by the *Vibration Resonance Method (VRM)*. VRM allows actually to measure two mechanical properties, the Dynamic Modulus Of Elasticity (DMOE) and the damping ratio ξ that are both sensitive to the effects of wood decay. The authors obtained in particular a coefficient of determination of $R^2 = 0.84$ between the assessment by Dw_{E_n}, calculated for the fist mode of vibration, and those obtained with Dw_{MOE}.

Both methods differ depending on the investigation scale in particular. NIRS based method assesses decay at a local scale from cores sampled on the log whereas VRM is considered a global-scale method as it assesses decay for the entire log. Both methods were developed with a degradation process taking place in a greenhouse to improve the decay kinetic. These semi-controlled conditions may have influenced the microbial-community composition and its development with potential effects on the level of decay (Wal et al., 2015) and the nature of degraded compounds (Zabel et al., 1992). The extent of decay in logs might also be influenced by the logs layout in the greenhouse as they were buried under a 5cm soil layer. Furthermore, the soil type has a great influence on the level of decay (Brischke et al., 2008a) especially due to the variability of water-holding capacity between soil type (Rahman et al., 2007).

The aim of this study was to assess the level of decay of small-diameter silver fir logs degraded in natural conditions using the NIRS based method and VRM, developed by Barré et al. (In prep.[b]) and Barré et al. (In prep.[a]) in semi-controlled conditions. First, it was necessary to check the applicability of the methods on logs degraded in natural conditions, *i.e.* in ground contact near alpine torrents. The applicability was checked by observing the decay in the logs cross-section, the moisture content and the effects of microbial activity on wood components. Secondly, this study aims to compare the levels of decay of silver fir logs assessed by the two methods. The levels of decay resulting from the two methods were first analysed independently and then converted into decay classes in order to facilitate their comparison.

2.2 Materials and Methods

2.2.1 Samples preparation and experimental sites

60 small-diameter logs of silver fir (*Abies alba*) were harvested in a silver fir forest located in Lagarde-en-Oisans (France : 45° 3'51.84"N, 6° 3'34.26"E) at an altitude of 1,300 m above sea level, in the French Northern Alps. They were 160 cm in length with a mean diameter comprised between 6 and 10 cm. Particular attention was paid to ensure that the three types of geometrical imperfections of logs (curvature, tapering and roundness of the cross section) were below the maxima recommended by Barré et al. (In prep.[a]). The logs were next uniformly spread between four experimental sites located in the Grésivaudan valley (Isère - France) and were let in the field during 659 days from June 2014 to April 2016.

In the Grésivaudan valley, the climate is oceanic with continental influences. At an altitude of 220 m, the mean annual precipitation is 934 mm and the mean annual temperature ranges from 6.3°C in winter to 16.2°C in summer (Météo-France, 1981-2010). The four sites were chosen for their proximity to torrents (from 2m to 20m) (Bresson, Ecorchiers and La Terrasse) where

TABLE 2.1 – Main characteristics of experimental sites.

Site	Commune	Altitude	Coordinates	Orientation	Description
Bresson	Sainte-Marie-du-Mont	1100 m	$45°22'52.94"N$ $5°55'0.75"E$	East	Moderately forested area 10 m from the torrent
La Terrasse	La-Terrasse	340 m	$45°19'56.42"N$ $5°55'17.57"E$	southeast	Heavily forested area 1 m from the torrent
Ecorchiers "bas"	Saint-Ismier	530 m	$45°15'42.11"N$ $5°49'23.72"E$	southeast	Sparsely forested area 1 m from the torrent
Ecorchiers "haut"	Saint-Ismier	610 m	$45°15'49.88"N$ $5°49'18.33"E$	southeast	Sparsely forested area 10 m from the torrent

torrent control works of civil or ecological engineering types were previously built. Altitudes, exposure and the presence or absence of forest canopy were the other field characteristics taken into account (Table 2.1). On each site, 15 small-diameter logs were put down on the ground. These experimental conditions correspond to the use class 4 according to EN 335 :2013 (CEN, 2013). In these conditions, the standard states the average moisture content all along the year should exceed 20%. The logs-diameters repartition was similar between sites.

2.2.2 Applicability of the methods on samples degraded in natural conditions

Samples in natural conditions may be degraded in a way not compatible with the applicability of the methods as they has been developed with samples degraded in semi-controlled conditions. Thus, particular attention have been paid to the decay in the cross-section, the moisture content at the time of investigation, the effects of the microbial activity on cellulose and lignin trough NIRS spectra investigation.

Observations by means of visual inspection of the logs cross-sections.

The microbial activity changes the visual aspect of wood, its color and its texture in particular. Thus, the visual inspection is an efficient method to identify decay areas in a qualitative manner. Due to presence of the bark, the visual investigation was limited to the cross-section of decayed logs. Cross-sections were investigated at the macroscopic scale following the recommendations of Zabel et al. (1992) and Schmidt et al. (2006). The absence or presence of three decay evidences was enumerated after a fine sandpapering. (i) The changes in normal wood color patterns going from bleached to dark brown spots may occur in attendance of soft or brown rots. (ii) The black demarcation lines (zone lines) appear frequently with white rot although it may happen with brown rot (Maloy et al., 2001, p.1217-1218). (iii) The blue discolourations are metabolised by blue stain fungi that have no effect on the mechanical properties.

Moisture content of logs

After the degradation period, a slice of 5 cm was sampled on each log for moisture content (MC) measurement. The NIRS and VRM methods were developed with samples, whose moisture content was above the Fibre Saturation Point (FSP). This condition is important as MC has huge effects on the wood properties, and the mechanical properties in particular. Moreover, as water is one of the main drivers of fungi development(Brischke et al., 2008b), MC of decayed samples reveals relevant indications on the degradation conditions. MC was calculated according to equ. 2.1 and the recommendations of Williamson et al. (2010). The oven-dry weight (W_0) was measured after sample drying till weight stabilization using a Memmert oven set at 103.5°C.

$$MC = [(W_h - W_0)/W_0] * 100 \tag{2.1}$$

where W_h is the wet weight.

(a) (b)

(c) (d)

FIGURE 2.1 – Experimental Sites : (a) Torrent of Ecorchiers "Haut", (b) Torrent of Ecorchiers "Bas", (c) Torrent of Bresson, (d) Torrent of La Terrasse.

MC results between sites were compared using the student's test.

Effects of microbial activity on cellulose and lignin by means of NIRS

NIRS measures the reflectance of samples subjected to a light radiation whose wavelengths vary from 1000 to 2500 nm (4000 to 10000 cm^{-1} in wavenumbers). The absorbance (A) of the samples is calculated from the reflectance (R) according to A= log(1/R) (Chalmers et al., 2002). The vibration of the chemical functional groups induced by light is the origin of the absorbance and depends on the wavelengths. The excitation by light of the functional groups generates vibrations of their chemical bonds.

Prior to the spectra acquisition, each debarked sample was transversely drilled to obtain shavings that were ground into powder of 0.25 mm grain size in a Retsch ZM 200 mill. This operation homogenized the properties of the cross-section, which may be spatially very heterogeneous due to fungal activity. Samples were next dried at 40°C. NIR spectra were acquired by a Thermo Scientific Antaris 2 FT-NIR analyser. The instrument records the absorbance in the spectral region [3999, 10001 cm^{-1}] at a resolution of 4 cm^{-1}. Each spectrum is the average of 32 scans and is plotted as absorbance versus wavenumbers. The Savitky-Golay second derivative pre-processing method (Rinnan et al., 2009) was used to analyse spectra with respect to others studies that commonly applied this pre-processing to emphasize peaks positions and separations (Chalmers et al., 2002, volume 3). The peaks positions may be indirectly assigned to wood compounds (Schwanninger et al., 2011a) and changes in their amplitudes reflect changes in compounds contents. In particular, Near Infra-Red (NIR) spectra provides information that allows investigating the effects of fungal activity on wood (Fackler et al., 2012) by means of wavelengths assignments in NIR spectra (Schwanninger et al., 2011a). Studies confirmed that effects of the microbial activity on wood may be analysed by means of change in the peaks amplitudes. Thus, changes in peak amplitude assigned to lignin were observed in particular near 5980 cm^{-1} for samples submitted to white rot (Fackler et al., 2007a; Fackler et al., 2007c; Schwanninger et al., 2004). For polysaccharides, the changes are noticed in a scattered way along the full spectral range. Variations due to decay were observed for cellulose at 4280 cm^{-1}, 4404 cm^{-1}, 5464 cm^{-1} and 4620-4890 cm^{-1} and for holocellulose at 4198 cm^{-1} (Sandak et al., 2013).

2.2.3 Comparison of the level of decay assessed by NIRS based method and VRM

2.2.3.1 Assessment of the level of decay using NIRS based method.

This NIRS based method developped by Barré et al. (In prep.[b]) assesses the level of decay of silver fir sample by means of its NIR spectrum and a model of prediction of the indicator Dw_{MOE}. For that purpose, the authors developed a model to predict the normalized loss of MOE Dw_{MOE} of silver fir small-diameter logs using NIRS and partial least square regression (PLSR). Data processing and model developments were carried out with R software (R Core Team, 2013) and the *hyperSpec* package (Beleites et al., 2012). From the method requirements, the correction of the spectra baseline was necessary and was performed with the *baseline* package (Liland et al., 2014).

The method proposed by Barré et al. (In prep.[b]) is based on the calculation of a *differential spectrum* defined as the difference between a *mean intact* spectrum obtained from 125 intact silver fir samples and the *baseline corrected* spectrum of the decayed sample. The *mean intact* spectrum is an average of 125 *baseline corrected* spectra of silver fir cores collected from different locations of the French Northern Alps. The model was calibrated from 72 decayed small-diameter logs which provenance is identical to those of the present study. The model took into account spectra in a

limited range of wavenumbers : 4258 to 4304 cm^{-1}, 4350 to 4404 cm^{-1} and 4570 to 4674 cm^{-1}. The model was validated with 31 independent samples of identical provenance. The coefficient of determination between measured and predicted values (R^2_p) was of 0.77, the root mean square of prediction (RMSEP) of 0.13. The assessment by the NIRS-based method was named Dw_{NIRS} (Fig. 2.4). In order to facilitate the comparison with VRM and attenuate differences between indicators Dw_{NIRS} and Dw_{E_1}, notably those due to the difference of investigation scales, the level of decay based on indicators was converted into classes. Thus, the decay class was assigned to each sample using the equivalence rule detailed in figure 2.2.

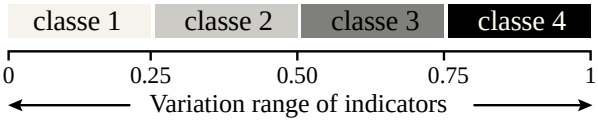

FIGURE 2.2 – the equivalence rule between the indicators Dw_{NIRS} or Dw_{E_1} and the four classes of decay.

2.2.3.2 Assessment of the level of decay using the vibration resonance method

The vibration resonance method (VRM) was initially designed to measure the MOE in dynamic conditions. It is based on the Euler-Bernoulli theory and consists in calculating the DMOE of a beam in free vibrations from its natural frequency (Brancheriau et al., 2002b). VRM allows measuring the DMOE of intact and decayed logs using a specific test bench. The supports of the test bench were made of rubber bands that ensure boundaries conditions equivalent to a free-free supported beam (Fig. 2.3). Barré et al. (In prep.[a]) have described in details the methodology that was reproduced in this study. The vibrations were initiated by a vertical impulse at one extremity and recorded at the other by a piezoelectric accelerometer Deltraton type 4397 from Brüel & Kjr. The accelerometer was powered by Deltraton Power Supply WB 1372 and its signal converted by the analogue-to-digital converter PicoScope 4224 from Pico Technology. The Fast Fourier transform (FFT) of the digital signal was calculated to determine the vibration modes using R software (R Core Team, 2013) and the *signal* package (Signal developers, 2014). As the geometrical imperfections of logs were similar to those of logs used by Barré et al. (In prep.[a]), the first mode of vibration was taken into account, otherwise it should be necessary to consider the second mode that is less sensitive to geometrical imperfections. Thus, the DMOE, named E_n, was next calculated for the first mode according to equ. 2.2. The indicator Dw_{E_1}, corresponding to the normalized loss in E_1 between intact and decayed states, was calculated according to equ. 2.3 (Fig. 2.4). The decay classes based on Dw_{E_1} were obtained with the same rule as those based on Dw_{NIRS} (Fig. 2.2)

$$E_1 = 4\pi^2 M L^3 \frac{f_1^2}{I X_1} \tag{2.2}$$

with E_1 the MOE calculated for the first mode of vibration, I the moment of inertia, M the sample mass, L the beam length, f_1 the fundamental frequency and $X_1 = 500.5467$.

$$Dw_{E_1} = \frac{E_1^i - E_1^d}{E_1^i} \tag{2.3}$$

with E_1^i the MOE calculated for the first mode of vibration at intact state, and E_1^d at decayed state.

FIGURE 2.3 – Test bench for the MOE measurement

2.2.3.3 Comparison of methods by means of classes.

The degradation classes obtained from the two methods were finally compared with each other using a confusion matrix.

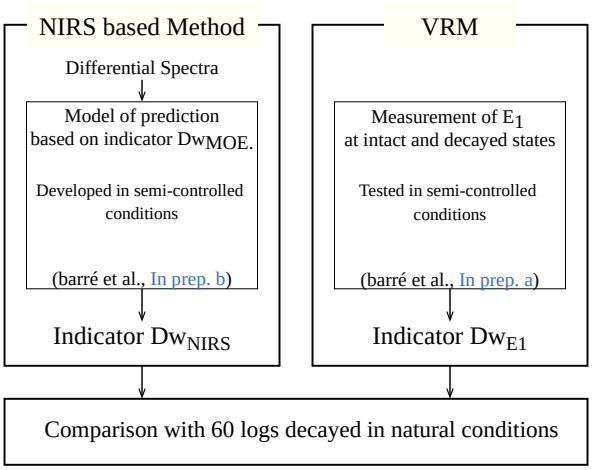

FIGURE 2.4 – The two methods and their associated indicators

2.3 Results

2.3.1 Applicability of the methods on samples degraded in natural conditions

Observations by means of visual inspection of the logs cross-sections

Like its sapwood, silver fir has a slightly durable heartwood (class 4) according to EN 335-2 (CEN, 1994) that fungi may attack as easily. However, no significant distinction between sapwood and heartwood were visually observed. The first visual evidence of decay was the black demarcation lines (Fig. 2.5a), which were present on all sites for all samples at Ecorchiers bas and Bresson (Fig. 2.6), in a lesser extent in La Terrasse and for only 5 samples in Ecorchiers haut. The presence of

brown discolouration (Fig. 2.5b) was relatively scarce and was especially present in Ecorchiers haut and la Terrasse (4 samples). About one third of the samples had blue discolouration (Fig. 2.5c), testifying the attendance of the blue stain fungi. At all sites, three samples showed galleries of wood-boring beetles. Finally, two showed no evidence of decay. In all cases, the cracks were the consequence of the drying shrinkage during the storage as no crack was observed on the wet cross-section just after the on-site sampling. Finally, no visual difference between sapwood and heartwood was observed.

(a) (b) (c)

FIGURE 2.5 – Different evidences of the fungi presence in the cross-section : (a) zone lines (b) brown spots (c) blue discolouration.

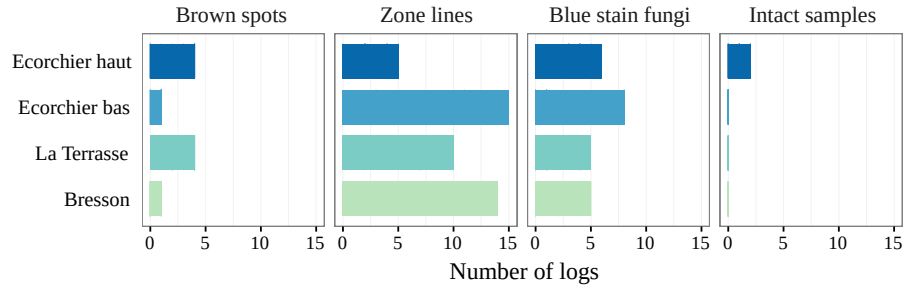

FIGURE 2.6 – Occurence table of the visual inspection according to the experiemental sites. Figures represent the number of logs.

Moisture content of logs

The MC was above the FSP for all samples except for three of them belonging to Ecorchiers haut's site (Fig. 2.7). The measurements brought to light Ecorchiers haut's site whose MC was significantly lower than those of the other sites. MC of Bresson and La Terrasse were quite similar (means of 86 and 87%). MC of Ecorchiers bas was lower in average (mean of 74%) but the standard deviation (36%) was larger than for previous sites (13% and 24%). Ecorchiers haut's logs had the lowest averaged MC (47%). It was significantly lower than MC of other sites according to the student's test between Ecorchiers haut and Ecorchiers bas's MC (p-value of 0.030).

Effects of microbial activity on cellulose and lignin by means of NIRS

As mentioned in the introduction, spectra contain information about the wood compounds through association between wavelengths and the chemical functional groups. The spectrogram

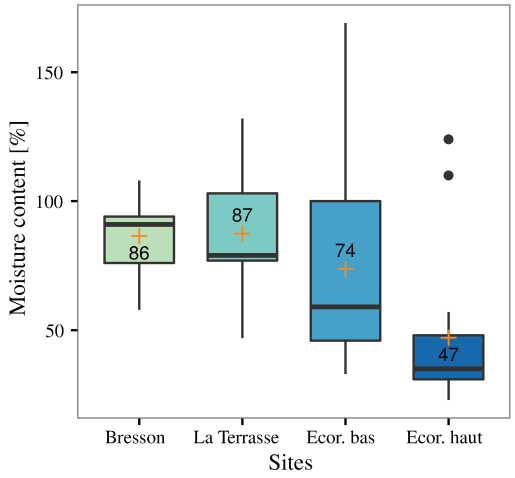

FIGURE 2.7 – Moisture content of the logs at the end of the experiment according to experimental sites. Crosses associated to figures correspond to mean values.

shows that raw spectra of intact samples may have lower absorbances that decayed ones, but both spectra groups overlap partially along the whole spectral range and cannot be clearly separated. Their second derivatives highlight the difference between groups at particular wavenumbers. Differences were observed in particular at 4405 cm^{-1} assigned to cellulose (Fig. 2.8a) and 5974 cm^{-1} assigner to lignine (Fig. 2.8b).

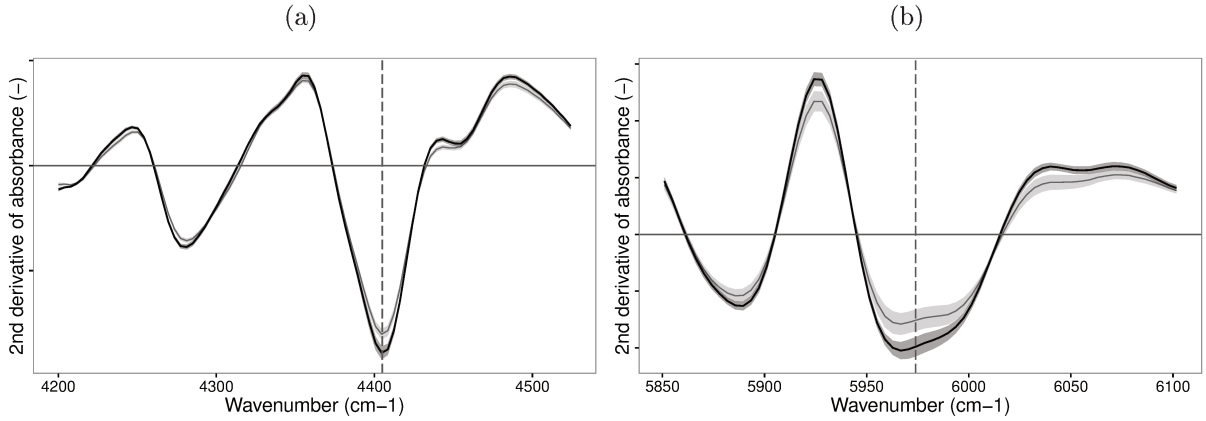

FIGURE 2.8 – Second derivative spectra at various spectral ranges. Thick line corresponds to intact samples. Thin line corresponds to decayed samples. The ribbons represent the standard deviations. The dashed lines (4405 cm^{-1} and 5974 cm^{-1}) correspond to wavenumbers associated with cellulose (a) and lignin (b).

2.3.2 Comparison of the levels of decay assessed by NIRS-based method and VRM

2.3.2.1 Indicators Dw_{NIRS} and Dw_{E_1}

The indicator Dw_{NIRS} varied from 0.02 to 0.55 and had an averaged value of 0.27 (Fig.2.9a). The indicator Dw_{E_1} varied from 0 to 0.59 and had an averaged value of 0.22 (Fig.2.9b). No significant difference has been observed between each sites. Nevertheless, Dw_{NIRS} of La terrasse and Dw_{E_1} of Ecorchiers bas set oneself apart from other sites by their high variability.

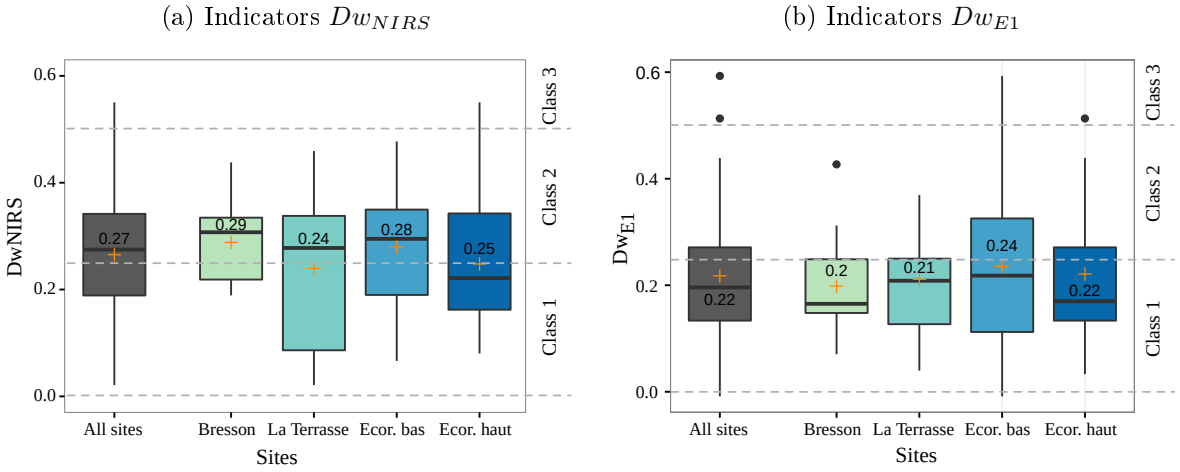

FIGURE 2.9 – Indicators of level of decay measured on 60 logs decayed in natural conditions. Results are shown all sites together (grey boxplot) and according the experimental sites. Crosses associated to figures correspond to the mean values of each indicators.

2.3.2.2 Comparison of methods by means of classes

The logs had been assessed in the first three decay classes (Fig. 2.10). NIRS-based method assessed 39% of the logs in class 1 and 58% in class 2 against 68% and 29% for VRM. Class 3 was assigned to two logs by both methods. The comparison of the classifications according to the experimental sites shows the same trend. VRM assessed logs in class 1 in higher proportion than NIRS-based method. Class 3 was assessed in the same sites by both methods (Ecorchiers haut and Ecorchiers bas) and in the same proportion. Detailed observation of class 3 shows that it was assessed for the same log in Ecorchiers haut in contrary of Ecorchiers bas, where it was two different logs. This explains why the accordance between both methods is of 50% for class 3 (Fig. 2.11). For other classes, the contingency table shows that the accordance between both methods is, respectively, of 50% and 80% for class 1 and 2.

2.4 Discussion

2.4.1 Applicability of the methods on samples degraded in natural conditions

Heterogeneity of decay influences the measurements especially for VRM. Thus, for preventing strong heterogeneity in the cross-section, VRM was developed from buried samples Barré et al. (In prep.[a]). In this study, samples had just one side in ground contact. However, no strong decay heterogeneity in the cross-section was noticed by visual inspection (Fig. 2.5).

Prior to VRM measurements, decayed samples MC was compared (Fig. 2.7). Inter-site MC variations were the consequences of micro-climatic conditions and differences in soil types. The water-holding capacity varies according to soil types and influences MC of wood in ground contact (Rahman et al., 2007). Surprisingly, intra-site MC variations were large especially in Ecorchiers bas. It may partly be the result of the fungal activity as fungi rise MC through their mycelia. Finally, these moisture conditions were compatible with the requirements of VRM that requires MC above FSP. Otherwise, the MOE is strongly influenced by MC and the calculation of the indicator Dw_{E_1} would be irrelevant.

As wood-boring beetles attacks remained very limited, the changes in mechanical properties were associated to the microbial activity. According to MC and experimental conditions, decay occurred in aerobic conditions that prevents bacterial activity. These conditions were similar to

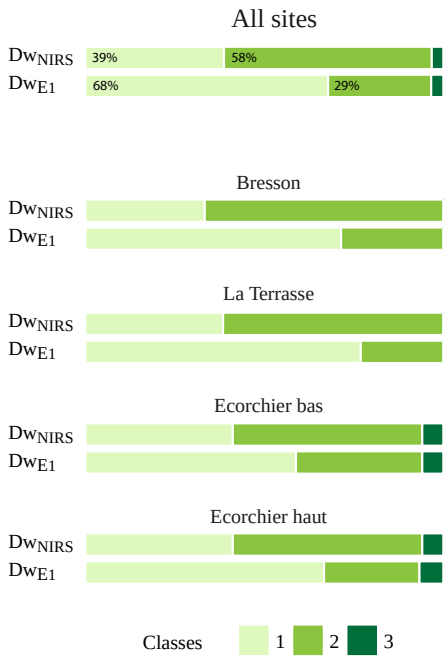

FIGURE 2.10 – Dw_{E1} and Dw_{NIRS} classes of decay comparison.

those obtained when developing the NIRS prediction model (Barré et al., In prep.[b]). However, the composition of microbial community has not been evaluated and may spearhead differences between results. Thus, it is of interest to analyse the effects of the microbial community on wood compounds by means of second derivative spectra. In particular, changes in band intensities were observed around 4405 cm^{-1} (Fig. 2.8a) and 5974 cm^{-1} (Fig. 2.8b). The spectral region near 5974 cm^{-1} has been assigned to lignin (Fackler et al., 2007a). Changes in lignin content associated with the presence of black demarcation lines suggest that fungal community included some white-rot fungi. The region near 4405 cm^{-1} is one of the region assigned to cellulose (4405 cm^{-1}) and hemicellulose (4405 cm^{-1}) (Schwanninger et al., 2011a). The three rot types may degrade cellulose and hemicellulose and cannot be distinguished by this way. Furthermore, spectral ranges assigned to lignin have not been taken into account in the NIRS based method. The model was actually developed with the wavelengths 4258 to 4304 cm^{-1}, 4350 to 4404 cm^{-1} and 4570 to 4674 cm^{-1}. These spectral ranges may limit the potential of the model of prediction to assess logs mainly decayed by lignin decomposers.

2.4.2 Comparison of the levels of decay assessed by NIRS-based method and VRM

Both methods classified the levels of decay mainly in the two first classes regardless of the sites (Fig. 2.10). Over a degradation period of 659 days, they revealed a large variability of levels of decay especially for Ecorchiers haut and Ecorchiers Bas sites. The intra-site variation in levels of decay of structures has already been observed (Rickli et al., 2014) and may be explained by several factors. Differences may come from the intra-specie variability of the durability observed notably for larch (Curnel et al., 2008). Wal et al. (2015) found further that decay rate may be driven by species richness of the fungal community, which potentially vary from one log to another. The MC at intact state varied in a broad range from 33% to 97% (Fig. 2.7) and might influence the establishment of fungi. The soil types may also have a large influence on the decay rate (Brischke et al., 2014).

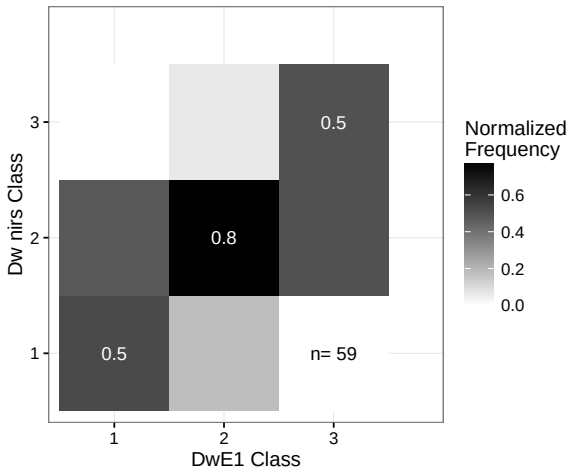

FIGURE 2.11 – Contingency table of Dw_{E1} and Dw_{NIRS} classes

The difference of repartition of classes between both methods may be explained by the spatial characteristic of the measurements. NIRS-based method is considered as a local measurement as powder was obtained from a 10 cm sampling sampled on logs. In the contrary, VRM is a global measurement that characterized the whole logs. This may explain a part of the differences observed in the classification results (Fig. 2.10). However, the systematic predominance of class 1 for each site by VRM compared to NIRS-based method suggests an intrinsic difference in the evaluation of the early stage of decay.

Considering the results, these methods may be applied to assess the level of decay of timber structures of ecological engineering. This requires however adaptations of the methodologies. VRM should be seen as a method dedicated to the structure monitoring since the construction. It measures a relative difference of the MOE and requires measurement at intact state. Furthermore, instead of removing pieces of the structure, which would be similar to a destructive test, we propose to install removable *control samples* at specific places according to the structure configuration and its environment. These control samples would not be structural but have only a decay-extent monitoring function. Their characteristics at intact state might be thoroughly defined and could be freely monitored over time. To that purpose, the *in-situ* test is realistic but the test-bench should be improved by exploring measurement feasibility with other supports or other boundaries conditions than free-free. As for the NIRS-method methodology, it may be applied on real structures by assessing decay from cores sampled at critic locations. Cores of 5 mm in diameter do not affect the structural integrity and is already used in structures investigation (Noetzli et al., 2008). If portable NIRS may be considered, this calls for further investigations to quantify the level of decay directly on fresh increment cores.

2.5 Conclusion

In this study, we have tested two assessment methods of the level of decay of small-diameters logs initially developed in semi-controlled conditions by Barré et al. (In prep.[a]) for the NIRS method and Barré et al. (In prep.[b]) for the VRM. Different visual evidences of decay have highlighted the effects of the microbial activity on logs but no predominant rot type was identified. The study of near infra-red spectra indicates that lignin and polysaccharides were both affected by the microbial activity testifying at least the presence of fungi of white rot type. Furthermore, both methods assessed levels of decay in a similar extent whatever the experimental sites. Logs were mainly assessed in the first two classes on a scale of one to four. Finally, the use of control

samples located at several locations in the appraised structure allows considering both methods for non-destructive evaluation of bioengineering structures.

Acknowledgement

This work has been financed within the framework of Arc Environnement (Rhône Alpes Region. France). We thank ONF and the Isère's RTM department for their support in the experiments.

Chapitre 3

synthèse

Dans cette partie, nous avons cherché à évaluer le niveau de dégradation de rondins de sapin dégradés en conditions naturelles par SPIR et analyse vibratoire. Dans un premier temps, il était question de vérifier l'applicabilité des méthodes sur des rondins dégradés en conditions naturelles. Dans un second temps, il s'agissait de comparer les niveaux de dégradation des rondins obtenus à partir des méthodes par SPIR et analyse vibratoire. Pour cela, une expérimentation *in situ* a été mise en place. Quatre sites expérimentaux ont été retenus pour leurs conditions de température et d'humidité au niveau du sol contrastées. 60 rondins de sapin blanc ont été répartis sur les quatre sites après avoir été caractérisés à l'état intact. Les échantillons sont restés *in situ* pendant une période de 659 jours.

Applicabilité des méthodes sur des rondins dégradés en conditions naturelles

L'inspection visuelle des échantillons fait apparaitre que la dégradation est principalement le résultat de l'activité microbienne. Aucune hétérogénéité de dégradation marquée n'a été constatée dans la section transversale des échantillons bien qu'un seul côté des rondins n'ait été en contact avec le sol. Par ailleurs, au jour de prélèvement des échantillons sur chacun des sites (avril 2016), la teneur en eau des échantillons était *a minima* au-dessus du point de saturation des fibres et la température sur chacun des sites était positive. Les conditions étaient ainsi compatibles avec celles requises pour obtenir une dégradation du bois par une communauté microbienne. De ces points de vue, la dégradation résultante était semblable à celle obtenue dans les expérimentations en conditions semi-contrôlées. La SPIR a permis d'obtenir, au moyen de la dérivée seconde Savitzky Golay des spectres, des indications sur la nature des composants dégradés et ainsi de montrer que la lignine et la cellulose ont toutes deux été affectées dans le processus de dégradation. L'ensemble des observations a permis de confirmer l'applicabilité des méthodes aux rondins dégradés en conditions naturelles, même si la question de la validité de la méthode basée sur la NIRS avec une communauté n'affectant que la lignine a été posée.

Comparaison des niveaux de dégradation des rondins obtenus à partir des 2 méthodes

Tous sites confondus, les niveaux de dégradation des rondins sont principalement de classes 1 et 2. Trois rondins sur 60 sont identifiés en classe 3. Les évaluations par les deux méthodes se distinguent par une proportion plus importante d'échantillons de classe 2 avec la méthode basée sur la NIRS, contrairement à l'analyse vibratoire qui évalue une majorité d'échantillons en classe 1. Pour la classe 2, la concordance d'évaluation est élevée (80%). Aucune différence significative de niveaux de dégradation n'a été observée entre les sites expérimentaux. Finalement, les méthodes

SPIR et analyse vibratoire ont permis d'évaluer le niveau de dégradation des 60 rondins dégradés sur une période de 659 jours en conditions naturelles.

Cinquième partie

Synthèse générale et perspectives

Chapitre 1

Synthèse générale

Cette synthèse vise à reprendre les principaux résultats obtenus au cours de ce travail de thèse, portant sur la question de l'évaluation du niveau de dégradation de rondins en bois, utilisés pour la construction d'ouvrages de protection. Deux méthodes d'évaluation du niveau de dégradation ont été mises en œuvre à partir de deux techniques, la spectroscopie proche infrarouge (technique semi-destructive) et l'analyse vibratoire (technique non-destructive). Toutes deux ont été étudiées indépendamment, tout en suivant une démarche expérimentale similaire. Ainsi, dans cette synthèse, les apports de ce travail de thèse sont rappelés dans le contexte de la problématique générale mais aussi dans une perspective plus large. Par ailleurs, les principales remarques quant à l'applicabilité des méthodes sont évoquées. La synthèse se termine par une réflexion sur la méthodologie de dégradation appliquée au cours de ce travail de thèse. La méthodologie offre effectivement des perspectives intéressantes pour accélérer les essais de dégradation en conditions non-contrôlées.

1.1 Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par spectroscopie proche infrarouge

La méthode par SPIR, développée au cours de ce travail de thèse, a permis, à partir du spectre d'un échantillon dégradé, d'obtenir une estimation de son niveau de dégradation en se basant sur le taux de perte en MOE (indicateur Dw_{MOE}) et le taux de perte en MOR (indicateur Dw_{MOR}). Dans le contexte du diagnostic d'ouvrages, cette méthode est considérée comme une méthode semi-destructive dans la mesure où, telle qu'elle a été développée dans ce travail de thèse, elle requiert un prélèvement d'échantillons pour mener une analyse en laboratoire. Le prélèvement peut notamment être réalisé par des carottages ponctuels sur l'élément analysé. La méthode par NIRS propose ainsi une estimation du niveau de dégradation à une échelle dite "locale".

À partir des spectres seuls, il a été possible de distinguer les échantillons dégradés des échantillons intacts, au moyen d'une analyse en composantes principales. Parmi les échantillons dégradés, cette analyse n'a fait ressortir aucun gradient de niveau de dégradation au sens des indicateurs Dw_{MOE} et Dw_{MOR}. Dès lors, l'usage de méthodes plus avancées, telles que la régression des moindres carrés partiels, est requise pour évaluer le niveau de dégradation.

Pour tenir compte de la variabilité intrinsèque du matériau, les données spectrales prises en compte dans cette méthode ne sont pas directement les spectres des échantillons dégradés, mais les spectres différentiels. Ceux-ci correspondent aux différences entre un spectre moyen

d'échantillons de sapin intact et les spectres des échantillons dégradés. Le principe d'un spectre moyen intact se justifie par la nécessité de s'affranchir du spectre de l'échantillon à l'état intact. Effectivement, lors du diagnostic d'un ouvrage, seuls les spectres de ses éléments à l'état dégradé ne pourront être collectés. La variabilité du matériau est telle que ce principe a nécessité une validation à partir d'un premier jeu de données à la variabilité restreinte (chapitre II.2), puis un second à la variabilité étendue (chapitre II.3).

Chaque spectre a subi, préalablement au calcul des spectres différentiels, une correction de ligne de base pour tenir compte des effets de diffusion du faisceau lumineux dans les échantillons réduits en poudre. La régression des moindres carrés partiels a été utilisée pour développer deux modèles de prédiction des indicateurs Dw_{MOE} et Dw_{MOR}. Afin de restreindre la variabilité du jeu de données, la méthode a été initialement développée à partir d'échantillons prélevés dans une grume. Pour cette même raison, les échantillons ont été calibrés en section carrée, afin de présenter une surface de dégradation identique sur chacune des faces. Dans ce contexte, les deux modèles ont donné des erreurs quadratiques moyennes de prédiction acceptables (respectivement, RMSEP=0.15 et RMSEP=0.13). Par la suite, la méthode a été généralisée en considérant les variabilité intra-espèce et géographique des propriétés du sapin. Le spectre moyen intact a été calculé à partir de 125 échantillons provenant de 5 parcelles différentes des Alpes du Nord Françaises. Les échantillons destinés au processus de dégradation, ont, quant à eux, été prélevés dans le fût de 100 arbres. Pour autant, les performances d'évaluation sont restées satisfaisantes (RMSEP=0.13 pour Dw_{MOE} et RMSEP=0.17 pour Dw_{MOR}).

Au-delà de la méthode proposée, ce travail de thèse a permis de montrer le potentiel de la SPIR pour répondre à des problématiques de dégradation du bois par une communauté microbienne. Jusqu'à présent, la plupart des études portant sur ces problématiques ont été menées en conditions contrôlées et se sont intéressées à un nombre restreint de champignons parmi ceux fréquemment identifiées sur le bois dégradé. Or, une communauté microbienne apporte d'autres problématiques, notamment celle liée à l'influence de la compétition inter espèces et celle liée au rôle des espèces pionnières, qu'il conviendrait d'étudier dans le contexte de la dégradation du bois. Au niveau méthodologique, la question de la nécessité du broyage des échantillons pour les homogénéiser revient fréquemment, autant pour des raisons pratiques de préparation des échantillons que pour des raisons relatives à la perte d'informations liées à la déstructuration du matériau. Ce travail a ainsi permis de montrer que l'acquisition des spectres sur des poudres n'empêche pas d'identifier les modifications d'absorptions engendrées par l'activité microbienne.

Sur le volet de son applicabilité, la méthode doit être associée à une inspection visuelle lors de sa mise en œuvre sur un ouvrage. L'inspection visuelle permet en effet d'orienter les investigations directement vers les parties de l'ouvrage les plus altérées, en se basant pour cela sur des critères de textures et de couleurs du matériau, ainsi que sur la présence de carpophores. Ensuite, la mesure par SPIR est réalisée sur les échantillons prélevés par carottage, pour lesquels elle évalue un niveau de dégradation entre 0 (non dégradé) et 1 (totalement dégradé) au sens des indicateurs Dw_{MOE} ou Dw_{MOR}.

L'intérêt de la méthode par SPIR réside, d'une part, dans la possibilité de s'affranchir d'une mesure sur l'échantillon à l'état intact. Il s'agit d'un avantage majeur pour le diagnostic d'ouvrages dont les propriétés des éléments constitutifs à l'état intact sont indéterminées. D'autre part, la méthode par SPIR est la seule à pouvoir estimer l'indicateur Dw_{MOR}, qui est finalement l'indicateur le plus approprié pour apprécier la résistance résiduelle des éléments constitutifs d'un ouvrage.

1.2 Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions semi-contrôlées par analyse vibratoire

La méthode par analyse vibratoire permet d'obtenir une estimation du niveau de dégradation d'un élément constitutif d'un ouvrage, en terme de taux de perte en MOE (indicateur Dw_{MOE}). Il s'agit d'une méthode de test globale et non destructive.

L'effet, en conditions semi-contrôlées, de l'activité microbienne sur le module d'élasticité (approches d'Euler-Bernoulli E_n et de Timoshenko E_{timo}) et le taux d'amortissement ξ de rondins a été prouvé par la diminution de E_n et de E_{timo} et l'augmentation de ξ entre les états intact et dégradé. A partir de ces trois grandeurs mécaniques, les indicateurs Dw_{E_n}, $Dw_{E_{timo}}$ et Dw_{ξ_n} sont apparus comme pertinents pour évaluer le niveau de dégradation. Dw_{E_n} et $Dw_{E_{timo}}$ sont définis comme le taux de perte en E_n, respectivement E_{timo}, par rapport aux valeurs à l'état intact. Dw_{ξ_n} est, quant à lui, défini comme le taux d'augmentation de ξ_n par rapport à l'état dégradé.

Par ailleurs, la problématique de l'influence des imperfections géométriques des rondins sur les mesures a été abordée au moyen de l'analyse modale. Ainsi, une analyse modale par éléments finis sur un rondin idéalisé a permis de mettre en avant l'influence de trois types d'imperfections géométriques sur les fréquences de vibration f_n ainsi que de souligner les erreurs sur les modules d'élasticité associés. Pour obtenir une erreur maximale de 5% sur la mesure de E_1, il est nécessaire que la courbure initiale de la fibre neutre α_f, la conicité du rondin α_t et, pour la section transversale, le caractère elliptique α_c aient des valeurs inférieures à 0.061 pour α_f, 0.35 pour α_t et 0.095 pour α_c. Les résultats ont montré que l'influence de ces trois imperfections est maximale sur la fréquence fondamentale f_1 et qu'elle diminue pour les modes d'ordres supérieurs. En particulier, la fréquence du second mode de vibration f_2 est faiblement impactée par la conicité du rondin, une imperfection très fréquente. Finalement, la méthode par analyse vibratoire se base sur les indicateurs Dw_{E_1} et Dw_{E_2}, qui sont fortement corrélés à Dw_{MOE} (r^2 de 0.84 avec Dw_{E_1} et de 0.83 avec Dw_{E_2}).

Au-delà de la méthode proposée, ce travail de thèse a permis de mettre en évidence l'augmentation du taux d'amortissement ξ engendrée par la dégradation microbienne, un résultat qui avait seulement été évoqué dans quelques études. Ce travail a aussi prouvé qu'il est possible de quantifier les pertes relatives de MOE d'un rondin soumis à l'activité d'une communauté microbienne avec une influence limitée des erreurs de mesure de MOE induites par les imperfections géométriques. Pour que ce résultat reste valable, il est cependant nécessaire de limiter l'intensité des imperfections géométriques, et de respecter une méthodologie de mesures adaptée.

Concernant son applicabilité, il est important de souligner que le niveau de dégradation des éléments constitutifs d'un ouvrage ne peut être obtenu sans que ces ouvrages ne soient démontés. L'analyse vibratoire telle que mise en œuvre dans ce travail de thèse requiert effectivement une mesure en conditions d'appuis libre-libre. Il est ainsi préconisé d'effectuer les mesures sur des échantillons de contrôle, placés dans la structure de manière amovible. Ceux-ci doivent être prélevés dans le même matériel que celui utilisé pour la construction de l'ouvrage, afin d'obtenir des conditions de dégradation similaires aux rondins de la structure. En particulier, le diamètre des échantillons de contrôle doit être représentatif de ceux des rondins de la structure. La méthode indique un niveau de dégradation entre 0 (pas dégradé) et 1 (totalement dégradé) au sens des indicateurs Dw_{E_1} ou Dw_{E_2}.

L'intérêt de la méthode par analyse vibratoire réside, entre autres, dans la reproductibilité de la mesure des fréquences de vibration. C'est un avantage important, dans la perspective

d'appliquer cette méthode *in situ* à des ouvrages pour lesquels les conditions opératoires peuvent être rendues difficiles par l'environnement même de ces ouvrages (pente, cours d'eau, végétation). De plus, comparée à la méthode par SPIR, la méthode par analyse vibratoire renseigne le niveau de dégradation directement à partir d'une grandeur mécanique d'intérêt propre au comportement structurel de l'ouvrage. Enfin, sa mise en œuvre reste simple, malgré les restrictions sur les conditions d'appuis.

1.3 Évaluation du niveau de dégradation de rondins de sapin blanc dégradés en conditions naturelles par SPIR et analyse vibratoire

Les méthodes SPIR et par analyse vibratoire ont été développées en conditions semi-contrôlées pour des raisons matérielles. La dernière partie de ce travail de thèse avait pour objectif de tester ces deux méthodes sur des rondins dégradés en conditions naturelles et de comparer les évaluations obtenues sur 55 rondins placés sur quatre sites différents pendant 659 jours. Pour faciliter la comparaison, des classes de dégradation variant de un à quatre ont été définies en fonction des valeurs obtenues par les indicateurs issus de la SPIR (Dw_{nirs}) et de l'analyse vibratoire (Dw_{E1}). Sur le dispositif expérimental mis en œuvre, seules les trois premières classes de dégradation ont été identifiées, indépendamment de la méthode utilisée. Les rondins de classe de dégradation 3, une minorité de l'échantillon, ont été identifiés sur deux sites tout autant par la méthode SPIR que par l'analyse vibratoire. Au niveau des résultats, les méthodes se différencient par la répartition entre classes : l'analyse vibratoire évalue majoritairement les rondins dans la première classe de dégradation. Finalement, l'évaluation du niveau de dégradation de rondins dégradés en conditions naturelles est possible par ces deux méthodes. Cependant, si aucune particularité n'a été constatée lors des mesures par analyse vibratoire, l'observation des spectres proches infrarouges a fait ressortir l'influence des conditions de dégradation, et tout particulièrement de la communauté microbienne. Menée en milieu naturel, cette expérimentation a montré que les effets sur la lignine sont plus prononcés que pour les expérimentations en conditions semi-contrôlées. Malgré cela, cette étude a montré que les méthodes restent pertinentes sur des rondins dégradés en conditions naturelles.

1.4 La méthodologie de dégradation

Dans le cadre de ce travail de thèse, une méthode de dégradation d'échantillons de bois en conditions semi-contrôlées a été mise en œuvre. Pour cela, nous avons placé des échantillons dans une serre, afin d'assurer une température moyenne plus élevée qu'en conditions naturelles. Si la cinétique de dégradation est hors du champ d'étude, cette méthode a permis un gain de temps considérable pour l'obtention d'échantillons dans une gamme de niveau de dégradation très variable. En revanche, la hausse de la température moyenne a entrainé un assèchement plus rapide des échantillons, et ce malgré la présence d'une couche de sol sur les échantillons, permettant d'atténuer les variations de leur teneur en eau. Un contrôle périodique a donc été nécessaire pour maintenir une teneur en eau au-dessus du point de saturation des fibres, telle que l'imposent ces méthodologies de dégradation d'échantillons de bois en conditions semi-contrôlées.

La disposition des échantillons est également un paramètre important pour mesurer convenablement leurs propriétés mécaniques. À ce sujet, la norme EN 252 (CEN, 2014) soulève cette problématique en précisant que des échantillons plantés verticalement dans le sol présentent une hétérogénéité longitudinale de dégradation trop importante, notamment à l'interface sol-air, pour obtenir une mesure pertinente de MOE. Cette limite a motivé la décision de disposer les échantillons de manière horizontale, afin de limiter la variabilité du niveau de dégradation selon l'axe longitudinal.

Les conditions de température et d'humidité au niveau du sol de la serre n'ont pas été homogènes, notamment en raison de l'orientation de la serre par rapport au soleil. Il en a résulté une variabilité des conditions de dégradation à l'intérieur même de la serre, constatée lors de l'évaluation des niveaux de dégradation des échantillons d'une même série. Par ailleurs, les conditions de température et d'humidité dépendant du climat extérieur, la dégradation se déroule dans des conditions non reproductibles. Toutefois, les résultats obtenus au cours de ce travail de thèse fournissent les premières indications sur les caractéristiques des échantillons à retenir pour obtenir une gamme la plus large possible de niveaux de dégradation. Au final, la production d'échantillons dégradés par cette méthode dépend tout à la fois de l'essence du bois, des caractéristiques géométriques des échantillons, de la situation géographique de la serre ainsi que du maintien de la teneur en eau à un niveau optimal, entre 35 et 55% généralement.

Chapitre 2

Perspectives

2.1 Le développement des méthodes d'évaluation du niveau de dégradation par SPIR et analyse vibratoire

Dans la perspective d'appliquer ces méthodes en conditions réelles, des études complémentaires doivent être envisagées. En cela, des réflexions portant sur leur généralisation aux essences couramment utilisées, sur l'amélioration de leur performance et sur leur adaptation aux exigences du terrain notamment sont nécessaires.

La généralisation des méthodes à diverses essences de bois.

Le sapin blanc a été retenu pour les expérimentations de cette thèse, notamment en raison de la faible durabilité du duramen. Nous pouvons donc considérer que l'activité microbienne n'a pas entraîné de différence significative du niveau de dégradation entre les propriétés de l'aubier et celles du duramen. *A contrario*, une essence ayant une durabilité très contrastée entre l'aubier et le duramen, telle le chêne et le châtaignier chez les feuillus, ou le Douglas chez les résineux, aura une hétérogénéité des propriétés beaucoup plus marquée, susceptible d'influencer l'évaluation du niveau de dégradation. La généralisation des méthodes par des expérimentations avec d'autres essences s'avère ainsi nécessaire.

Méthode SPIR : le traitement des spectres.

Les spectres ont été traités par une méthode de correction de ligne de base pour atténuer l'effet de diffusion du faisceau lumineux dans la poudre. Pour parvenir à ce résultat, il existe d'autres méthodes qui auraient également pu être pertinentes et qui auraient pu faire l'objet d'une étude comparative. Parmi elles, la méthode Multiplicative Scatter Correction (MSC) a ainsi permis de réduire, dans les spectres, le bruit engendré par les différences de granulométrie dans les échantillons analysés.

Méthode SPIR : l'acquisition des spectres sur échantillons solides.

La méthodologie employée pour l'acquisition du spectre a nécessité un broyage de l'échantillon. Cette opération est contraignante par le temps et les moyens qu'elle nécessite. Une alternative serait alors d'acquérir le spectre directement à partir d'une carotte de bois prélevée selon l'axe radial d'un élément de l'ouvrage. Le fait de ne plus déstructurer la matière par broyage pourrait apporter des informations complémentaires au niveau des spectres. Cependant, l'acquisition des spectres directement sur la carotte devra tenir compte d'une variabilité plus ou

moins marquée de la dégradation le long de l'échantillon et de la présence d'eau, laquelle réagit fortement avec le faisceau lumineux.

Méthode analyse vibratoire : les conditions d'appui des rondins.

L'analyse vibratoire permet d'évaluer le niveau de dégradation de rondins. Cependant, la mesure requiert des conditions d'appuis libre-libre, contraignantes à mettre en œuvre *in situ*. Dans la perspective de développer un outil de mesure adapté à ces conditions particulières, il est nécessaire d'étudier la faisabilité de la mesure avec d'autres conditions d'appui, comme par exemple celles reproduisant un rondin simplement appuyé, ou encore un rondin posé à même le sol.

Méthode analyse vibratoire : les écarts de fréquence entre les modes de vibrations.

L'accélération, enregistrée lors des vibrations libres des rondins, contient d'autres informations non exploitées dans la méthode proposée (les fréquences de vibration et le taux d'amortissement). Notamment, la transformée de Fourrier permet de déterminer les écarts de fréquence entre les modes de vibrations. Ces écarts sont, entre autres, fonction de l'hétérogénéité du matériau. Cette donnée a notamment été utilisée comme une mesure de l'hétérogénéité de poutres en bois afin d'améliorer la prédiction de leur MOE. Par analogie, les écarts de fréquence entre les modes mesurés sur un rondin à l'état intact et ceux mesurés pour un rondin à l'état dégradé, pourraient être comparés afin de déterminer dans quelle mesure ils retranscrivent l'intensité de l'hétérogénéité apportée par l'activité microbienne.

2.2 Le diagnostic des ouvrages de protection en bois

L'évaluation du niveau de dégradation des éléments d'un ouvrage de protection en bois constituait une étape limitante dans le diagnostic complet d'un ouvrage. En s'appuyant sur ces méthodes d'évaluation, il est désormais possible d'envisager des études complémentaires portant sur les ouvrages d'une manière plus générale.

La cinétique de dégradation.

Le développement de méthodes d'évaluation du niveau de dégradation constituait une étape préalable indispensable pour étudier la cinétique de dégradation des ouvrages en conditions naturelles, une autre problématique importante fréquemment évoquée par les praticiens. Ceux-ci ont en effet constaté une variabilité importante : la cinétique de dégradation. Aujourd'hui, l'évaluation, *a priori*, de la durée de vie d'un ouvrage repose sur l'expérience des praticiens et leur connaissance des milieux où sont implantés les ouvrages. Une étude approfondie de la cinétique de dégradation dans différents milieux naturels permettrait d'identifier de manière quantitative les principaux facteurs qui la pilotent, parmi lesquels, notamment le type de sol, la présence d'un couvert forestier, l'altitude et l'exposition du site.

L'adéquation entre cinétique de dégradation et développement des végétaux.

Le principe des ouvrages d'ingénierie écologique constitués d'une structure en bois repose sur une bonne adéquation entre la cinétique de dégradation de la structure et le développement des végétaux, qui, à terme, assurent la fonction de protection. Une étude conjointe de ces deux paramètres permettrait d'évaluer les conditions dans lesquelles ce principe est applicable. Elle

permettrait également d'adapter au mieux les espèces végétales en fonction de leur vitesse de croissance.

2.3 L'évaluation du niveau de dégradation du bois hors du contexte des risques naturels

Évaluation de la décomposition du bois mort en écologie.

En écologie, l'étude des gros débris ligneux (coarse woody debris) est importante pour mieux comprendre le cycle du carbone, notamment dans les milieux forestiers. Pour cela, les propriétés du bois mort, généralement la densité et les teneurs en cellulose, hémicellulose et lignine, sont périodiquement évaluées pour déterminer leur niveau de dégradation. Les méthodes d'évaluation sont classiquement basées sur la perte de densité et des composants chimiques. Seulement, ces mesures sont fastidieuses. Récemment, la SPIR a été étudiée dans ce contexte. Elle possède en effet un potentiel important, notamment par la possibilité d'analyser des échantillons à un niveau de dégradation très avancé, ce qui ne peut être envisagé avec les méthodes par analyse vibratoire ou par vitesse de propagation d'ondes. Le principe du spectre différentiel, proposé dans ce travail de thèse, semble également applicable dans ce contexte. En revanche, ici, la définition d'un nouvel indicateur de référence est nécessaire car l'investigation en écologie porte sur des niveaux de dégradation très élevés.

Test de durabilité par essais de champ.

L'évaluation de produits de préservation du bois en conditions extérieures doit être réalisée selon la norme EN 252 (CEN, 2014). Cependant, la norme impose une durée minimale de dégradation de 5 ans, ce qui engendre naturellement des coûts d'expérimentation élevés et une possibilité de mise sur le marché du produit repoussée à une longue échéance. La méthodologie de dégradation en conditions semi-contrôlées, mise en œuvre dans ce travail de thèse, a permis d'atteindre des niveaux de dégradation élevés en l'espace de 17 mois. Elle peut dès lors constituer une alternative plus rapide à la méthodologie de la norme EN 252.

Bibliographie

AFNOR (1998). *NF B 52-001 : Classement visuel pour l'emploi en structure des principales essences résineuses et feuillues*. Français. Norme. AFNOR.

Akita, H. (2015). "Change in the density of old wooden check dams with age : Results of an investigation of up to nine-year-old dams in Nagano Prefecture". Japanese. In: *Nihon Ringakkai Shi/Journal of the Japanese Forestry Society* 97.2, pp. 127–131. ISSN: 0021-485X.

Akita, Hiromi, Hikaru Kitahara, and Hiroshi Ono (2014). "Effect of climate and structure on the progression of wooden check dam decay". English. In: *Journal of Forest Research* 19.5, pp. 450–460. ISSN: 1341-6979, 1610-7403.

Alfredsen, G., E. Larnoy, and H. Militz (2006). "Dynamic MOE testing of wood : The influence of wood protecting agents and moisture content on ultrasonic pulse and resonant vibration". English. In: *Wood Research* 51.1, pp. 11–20. ISSN: 1336-4561.

Banwell, C. N. and Elaine M. McCash (1994). *Fundamentals of molecular spectroscopy*. 4th ed. London ; New York: McGraw-Hill. ISBN: 978-0-07-707976-5.

Barré, J.B., F. Bourrier, D. Bertrand, and F. Rey (In prep.[a]). "Assessing the level of decay of small diameter silver fir logs degraded under semi controlled conditions using a vibration resonant method". English. In: *Annals of Forest Science*.

— (In prep.[b]). "Assessing the level of decay of small diameter silver fir logs degraded under semi controlled conditions using near infrared spectroscopy". English. In: *International Biodeterioration Biodegradation*.

Barré, J.B., F. Bourrier, L. Cécillon, L. Brancheriau, D. Bertrand, M.F. Thévenon, and F. Rey (In press). "Predicting mechanical degradation indicators of silver fir wooden strips degraded under semi controlled conditions using near-infrared spectroscopy". English. In: *European Journal of Wood and Wood Products*.

Barré, J.B., F. Bourrier, D. Bertrand, L. Brancheriau, and F. Rey (Sub.). "Effects of decay on elasticity and damping of small diameter silver fir logs assessed by the vibrational resonant method". English. In: *Wood Science and Technology*.

Barrett, J. David and Jung-Pyo Hong (2009). "Moisture content adjustments for dynamic modulus of elasticity of wood members". English. In: *Wood Science and Technology* 44.3, pp. 485–495. ISSN: 0043-7719, 1432-5225.

Beleites, Claudia and Valter Sergo (2012). *hyperSpec : a package to handle hyperspectral data sets in R*.

Bellon-Maurel, Véronique, Elvira Fernandez-Ahumada, Bernard Palagos, Jean-Michel Roger, and Alex McBratney (2010). "Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy". In: *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 29.9, pp. 1073–1081. ISSN: 0165-9936.

Bergen, Scott D, Susan M Bolton, and James L. Fridley (2001). "Design principles for ecological engineering". In: *Ecological Engineering* 18.2, pp. 201–210. ISSN: 0925-8574.

Bertolini, C., M. Brunetti, P. Cavallaro, and N. Macchioni (1998). *A non destructive diagonostic method on ancient timber structures : some practical application examples*. Montreux.

Blanchette, Robert A. (1995). "Degradation of the lignocellulose complex in wood". In: *Canadian Journal of Botany* 73.S1, pp. 999–1010. ISSN: 0008-4026.

Bodig, Jozef and Benjamin A. Jayne (1993). *Mechanics of wood and wood composities*. Reprint ed. Malabar, Fla: Krieger Pub. ISBN: 978-0-89464-777-2.

Brancheriau, L., H. Bailleres, and D. Guitard (2002a). "Comparison between modulus of elasticity values calculated using 3 and 4 point bending tests on wooden samples". English. In: *Wood Science and Technology* 36.5, pp. 367–383. ISSN: 0043-7719.

Brancheriau, L. and H. Bailleres (2002b). "Natural vibration analysis of clear wooden beams : a theoretical review". English. In: *Wood Science and Technology* 36.4, pp. 347–365. ISSN: 0043-7719.

Brancheriau, Loïc (2002). "expertise mecanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique". French. PhD thesis. Université de la méditerranée – Aix Marseille II.

Brashaw, B. K., V. Bucur, F. Divos, R. Goncalves, J. X. Lu, R. Meder, R. F. Pellerin, S. Potter, R. J. Ross, X. P. Wang, and Y. F. Yin (2009). "Nondestructive Testing and Evaluation of Wood : A Worldwide Research Update". English. In: *Forest Products Journal* 59.3, pp. 7–14. ISSN: 0015-7473.

Brischke, C., C. R. Welzbacher, and T. Huckfeldt (2008a). "Influence of fungal decay by different basidiomycetes on the structural integrity of Norway spruce wood". English. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 66.6, pp. 433–438. ISSN: 0018-3768.

Brischke, C., L. Meyer, and S. Olberding (2014). "Durability of wood exposed in ground – Comparative field trials with different soil substrates". In: *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2nd International Conference on Biodeterioration of Wood and Wood Products, Tartu, Estonia 86, Part B, pp. 108–114. ISSN: 0964-8305.

Brischke, Christian and Andreas Otto Rapp (2008b). "Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field : observations in different micro-climates". English. In: *Wood Science and Technology* 42.8, p. 663. ISSN: 0043-7719, 1432-5225.

Bucur, Voichita (2006). *Acoustics of wood*. English. Berlin ; New York: Springer. ISBN: 978-3-540-26123-0 978-3-540-30594-1.

Burns, Donald A. and Emil W. Ciurczak, eds. (2008). *Handbook of near-infrared analysis*. 3rd ed. Practical spectroscopy 35. OCLC : ocm76936114. Boca Raton: CRC Press. ISBN: 978-0-8493-7393-0.

Burylo, Mélanie, Thierry Dutoit, and Freddy Rey (2014). "Species Traits as Practical Tools for Ecological Restoration of Marly Eroded Lands". English. In: *Restoration Ecology* 22.5, pp. 633–640. ISSN: 1526-100X.

Carter, Peter, Shakti Chauhan, and John Walker (2007). "Sorting Logs and Lumber for Stiffness Using Director HM200". In: *Wood and Fiber Science* 38.1, pp. 49–54. ISSN: 0735-6161.

Cavalli, Alberto and Marco Togni (2013). "How to improve the on-site MOE assessment of old timber beams combining NDT and visual strength grading". In: *Nondestructive Testing and Evaluation* 28.3, pp. 252–262. ISSN: 1058-9759.

Cecillon, L., N. Cassagne, S. Czarnes, R. Gros, and J.-J. Brun (2008). "Variable selection in near infrared spectra for the biological characterization of soil and earthworm casts". English. In: *Soil Biology and Biochemistry* 40.7, pp. 1975–1979. ISSN: 0038-0717.

CEN (1994). *EN 350-2. Durability of Wood and Wood-based Products. Natural durability of solid wood. Part 2 : Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe*. Tech. rep.

— (2003). *EN 14251 :2003. Structural round timber. Test methods*. Tech. rep. Brussels, Belgium.

— (2005). *EN 1995-1-1. Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1- General rules - General rules and rules for buildings*. Tech. rep. Brussels, Belgium.

— (2010). *EN 384 :2010. Structural Timber : Determination of characteristic values of mechanical properties and density.* Tech. rep. Brussels, Belgium.
— (2013). *EN 335 : 2013. Durability of wood and wood-based products - Use classes : definitions, application to solid wood and wood-based products.* Tech. rep. Brussels, Belgium.
— (2014). *EN 252 :2013. Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact.* Tech. rep. Brussels, Belgium: CEN.
Ceraldi, C., V. Mormone, and Ermolli Russo (2001). "Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics". English. In: *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 34.235, pp. 59–64. ISSN: 1359-5997.
Chalmers, John M. and Peter R. Griffiths, eds. (2002). *Handbook of vibrational spectroscopy.* New York: J. Wiley. ISBN: 978-0-471-98847-2.
Chiorescu, S. and A. Grönlund (2003). "The visual grading system for Scots pine logs in relation to the quality of sideboards produced". English. In: *Forest Products Journal* 53.1, pp. 53–60. ISSN: 0015-7473.
Cirad (2015). *Tropix 7.*
Clausen, Carol A. (1996). "Bacterial associations with decaying wood : a review". In: *International Biodeterioration & Biodegradation* 37.1, pp. 101–107. ISSN: 0964-8305.
Creed, I.F., K.L. Webster, and D.L. Morrison (2004). "A comparison of techniques for measuring density and concentrations of carbon nitrogen in coarse woody debris at different stages of decay". English. In: *Canadian Journal of Forest Research* 34.3, pp. 744–753. ISSN: 0045-5067.
Cruz, H., D. Yeomans, E. Tsakanika, N. Macchioni, A. Jorissen, M. Touza, M. Mannucci, and P.B. Lourenço (2015). "Guidelines for on-site assessment of historic timber structures". English. In: *International Journal of Architectural Heritage* 9.3, pp. 277–289. ISSN: 1558-3058.
Curling, S.F., C.A. Clausen, and J.E. Winandy (2002a). "Relationships between mechanical properties, weight loss, and chemical composition of wood during incipient brown-rot decay". English. In: *Forest Products Journal* 52.7-8, pp. 34–39. ISSN: 0015-7473.
Curling, Simon F, Carol A Clausen, and Jerrold E Winandy (2002b). "Experimental method to quantify progressive stages of decay of wood by basidiomycete fungi". In: *International Biodeterioration & Biodegradation* 49.1, pp. 13–19. ISSN: 0964-8305.
Curnel, Yannick, Dominique Jacques, Notburga Gierlinger, and Luc E. Pâques (2008). "Variation in the decay resistance of larch to fungi". English. In: *Annals of Forest Science* 65.8, pp. 810–810. ISSN: 1286-4560, 1297-966X.
Dackermann, Ulrike, Keith Crews, Bohumil Kasal, Jianchun Li, Mariapaola Riggio, Frank Rinn, and Thomas Tannert (2013). "In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements". English. In: *Materials and Structures* 47.5, pp. 787–803. ISSN: 1359-5997, 1871-6873.
De Silva, Clarence W., ed. (2005). *Vibration and shock handbook.* Mechanical engineering series. Boca Raton: Taylor & Francis. ISBN: 978-0-8493-1580-0.
Dinwoodie, J. M. (2000a). "Deformation Under Load". English. In: *Timber : Its Nature and Behaviour, Second Edition.* CRC Press, p. 274. ISBN: 978-0-203-47787-8.
— (2000b). "Strength and failure in timber". English. In: *Timber : Its Nature and Behaviour, Second Edition.* CRC Press, p. 274. ISBN: 978-0-203-47787-8.
Dirol, Danièle and Xavier Deglise (2001). *Durabilité des bois.* Français. Matériaux de construction. Mayenne: Hermes Science. ISBN: 2-7462-0139-9.
Dray, Stephane, A.B. Dufour, and J. Thioulouse (2004). *The ade4 package : implementing the duality diagram for ecologists.*
Dunlop, J. I. (1983). "Testing of poles by acoustic resonance". English. In: *Wood Science and Technology* 17.1, pp. 31–38. ISSN: 0043-7719, 1432-5225.

Evette, Andre, Sophie Labonne, Freddy Rey, Frederic Liebault, Oliver Jancke, and Jacky Girel (2009). "History of Bioengineering Techniques for Erosion Control in Rivers in Western Europe". English. In: *Environmental Management* 43.6, pp. 972–984. ISSN: 0364-152X.

Fackler, K. and M. Schwanninger (2010). "Polysaccharide degradation and lignin modification during brown rot of spruce wood : A polarised Fourier transform near infrared study". In: *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 18.6, pp. 403–416.

— (2012). "How spectroscopy and microspectroscopy of degraded wood contribute to understand fungal wood decay". In: *Applied Microbiology and Biotechnology* 96.3, pp. 587–599. ISSN: 01757598 (ISSN).

Fackler, Karin, Marieke Schmutzer, Leka Manoch, Manfred Schwanninger, Barbara Hinterstoisser, Thomas Ters, Kurt Messner, and Cornelia Gradinger (2007a). "Evaluation of the selectivity of white rot isolates using near infrared spectroscopic techniques". In: *Enzyme and Microbial Technology* 41.6–7, pp. 881–887. ISSN: 0141-0229.

Fackler, Karin, Manfred Schwanninger, Cornelia Gradinger, Ewald Srebotnik, Barbara Hinterstoisser, and Kurt Messner (2007b). "Fungal decay of spruce and beech wood assessed by near-infrared spectroscopy in combination with uni- and multivariate data analysis". In: *Holzforschung* 61.6, pp. 680–687.

Fackler, Karin, Manfred Schwanninger, Cornelia Gradinger, Barbara Hinterstoisser, and Kurt Messner (2007c). "Qualitative and quantitative changes of beech wood degraded by wood-rotting basidiomycetes monitored by Fourier transform infrared spectroscopic methods and multivariate data analysis". English. In: *FEMS Microbiology Letters* 271.2, pp. 162–169. ISSN: 1574-6968.

Feio, Artur and José S. Machado (2015). "In-situ assessment of timber structural members : Combining information from visual strength grading and NDT/SDT methods – A review". In: *Construction and Building Materials*. Assessment of structural timber members by non- and semi-destructive methods 101, Part 2, pp. 1157–1165. ISSN: 0950-0618.

Freschet, Grégoire T., James T. Weedon, Rien Aerts, Jurgen R. van Hal, and Johannes H. C. Cornelissen (2012). "Interspecific differences in wood decay rates : insights from a new short-term method to study long-term wood decomposition". English. In: *Journal of Ecology* 100.1, pp. 161–170. ISSN: 1365-2745.

Fujimoto, Takaaki, Hiroyuki Yamamoto, and Satoru Tsuchikawa (2007). "Estimation of wood stiffness and strength properties of hybrid larch by near-infrared spectroscopy". English. In: *Applied Spectroscopy* 61.8, pp. 882–888. ISSN: 0003-7028.

Gao, S., X. P. Wang, B. K. Brashaw, R. J. Ross, and L. H. Wang (2012). "Rapid Assessment of Wood Density of Standing Trees with Nondestructive Methods - A Review". English. In: *2012 International Conference on Biobase Material Science and Engineering (Bmse)*, pp. 262–267.

Gattie, David K., Steven C. McCutcheon, and Matt C. Smith (2003). "Ecological engineering : the state-of-the-field". In: *Ecological Engineering*. The Philosophy and Energence of Ecological Engineering 20.5, pp. 327–330. ISSN: 0925-8574.

Gaunt, D.J., Forest, Wood Products Research, Development Corporation, and L. Van Wyr (2003). *Literature Review of Machine Stress Grading Accuracy Check Methods*. Forest & Wood Products Research & Development Corporation. ISBN: 978-1-920883-04-1.

George, Jan-Peter, Silvio Schueler, Sandra Karanitsch-Ackerl, Konrad Mayer, Raphael T. Klumpp, and Michael Grabner (2015). "Inter- and intra-specific variation in drought sensitivity in Abies spec. and its relation to wood density and growth traits". In: *Agricultural and Forest Meteorology* 214–215, pp. 430–443. ISSN: 0168-1923.

Gerhards, C. C. (1982). "Effect of Moisture-Content and Temperature on the Mechanical-Properties of Wood - an Analysis of Immediate Effects". English. In: *Wood and Fiber* 14.1, pp. 4–36. ISSN: 0043-7654.

Gibson, Ronald F. (1989). "Vibration-Test Methods for Dynamic-Mechanical-Property Characterization". English. In: *Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites*. Ed. by Richard L. Pendleton and Mark E. Tuttle. DOI : 10.1007/978-94-009-1129-1_20. Springer Netherlands, pp. 151–164. ISBN: 978-94-010-7000-3 978-94-009-1129-1.

Gonzalez-Rodrigo, B., L.G. Esteban, P. de Palacios, F. García-Fernández, and A. Guindeo (2013). "Variation throughout the tree stem in the physical-mechanical properties of the wood of Abies alba Mill. from the Spanish Pyrenees". English, Spanish. In: *Madera Bosques* 19.2, pp. 87–107. ISSN: 1405-0471.

Goodell, Barry, Yuhui Qian, and Jody Jellison (2008). "Fungal Decay of Wood : Soft Rot—Brown Rot—White Rot". In: *Development of Commercial Wood Preservatives*. Vol. 982. ACS Symposium Series 982. American Chemical Society, pp. 9–31. ISBN: 978-0-8412-3951-7.

Green, B., P. D. Jones, L. R. Schimleck, D. D. Nicholas, and R. Shmulsky (2010a). "Rapid assessment of southern pine decayed by G. trabeum by near infrared spectra collected from the radial surface". In: *Wood and Fiber Science* 42.4, pp. 450–459.

Green, Benny, P. David Jones, Darrel D. Nicholas, Laurence R. Schimleck, and Rubin Shmulsky (2010b). "Non-destructive assessment of Pinus spp. wafers subjected to Gloeophyllum trabeum in soil block decay tests by diffuse reflectance near infrared spectroscopy". English. In: *Wood Science and Technology* 45.3, pp. 583–595. ISSN: 0043-7719, 1432-5225.

Green, Benny, Paul David Jones, Darrel D. Nicholas, Laurence R. Schimleck, Rubin Shmulsky, and Joseph Dahlen (2012). "Assessment of the early signs of decay of Populus deltoides wafers exposed to Trametes versicolor by near infrared spectroscopy". In: *Holzforschung* 66.4, pp. 515–520.

Green, D.W., T.M. Gorman, J.W. Evans, and J.F. Murphy (2004). "Improved grading system for structural logs for log homes". English. In: *Forest Products Journal* 54.9, pp. 52–62. ISSN: 0015-7473.

— (2006). "Mechanical grading of round timber beams". English. In: *Journal of Materials in Civil Engineering* 18.1, pp. 1–10. ISSN: 0899-1561.

Green, D.W., T.M. Gorman, J.W. Evans, J.F. Murphy, and C.A. Hatfield (2008). "Grading and properties of small-diameter Douglas-fir and ponderosa pine tapered logs". English. In: *Forest Products Journal* 58.11, pp. 33–41. ISSN: 0015-7473.

Grinda, M and S Goller (2005). "Some experiments with stake tests at BAM test field and in the BAM fungus cellar. Part 2 : Comparison of static and dynamic moduli of elasticity (MOE)". In: Bangalore, India.

Guitard, D. (1987). *Mecanique du materiau bois et composites*. French. OCLC : 299402060. Toulouse: CEPADUES. ISBN: 978-2-85428-152-1.

Haines, DanielW, Jean-Michel Leban, and Christian Herbé (1996). "Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods". English. In: *Wood Science and Technology* 30.4, pp. 253–263. ISSN: 0043-7719.

Halabe, U.B., G.M. Bidigalu, H.V.S. GangaRao, and R.J. Ross (1997). "Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques". English. In: *Materials Evaluation* 55.9, pp. 1013–1018. ISSN: 0025-5327.

Hanhijärvi, Antti, Alpo Ranta-Maunus, Goran Turk, and Valtion teknillinen tutkimuskeskus (2005). *Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques : report of the Combigrade-project, phase 1*. English. OCLC : 63113046. Espoo, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland. ISBN: 978-951-38-6647-1.

Hearmon, R. F. S. (1958). "The influence of shear and rotatory inertia on the free flexural vibration of wooden beams". en. In: *British Journal of Applied Physics* 9.10, p. 381. ISSN: 0508-3443.

Holz, Dietrich (1996). "Tropical Hardwoods Used in Musical Instruments - Can We Substitute them by Temperate Zone Species ?" English. In: *Holzforschung* 50.2, pp. 121–129. ISSN: 0018-3830, 1437-434X.

Hung, Chung-Pin, Chiang Wei, Song Yung Wang, and Far-Ching Lin (2009). "The study on the carbon dioxide sequestration by applying wooden structure on eco-technological and leisure facilities". In: *Renewable Energy*. 2007 World Renewable Energy Conference - Pacific Rim Region 34.8, pp. 1896–1901. ISSN: 0960-1481.

Ishizuka, Shigehiro, Yoshimi Sakai, and Ayumi Tanaka-Oda (2012). "Quantifying lignin and holocellulose content in coniferous decayed wood using near-infrared reflectance spectroscopy". English. In: *Journal of Forest Research* 19.1, pp. 233–237. ISSN: 1341-6979, 1610-7403.

Kail, Jochem, Daniel Hering, Susanne Muhar, Marc Gerhard, and Sabine Preis (2007). "The use of large wood in stream restoration : experiences from 50 projects in Germany and Austria". In: *Journal of Applied Ecology* 44.6, pp. 1145–1155. ISSN: 1365-2664.

Kasal, Bo and Ronald W. Anthony (2004). "Advances in in-situ evaluation of timber structures". In: *Progress in Structural Engineering and Materials* 6.2, pp. 94–103. ISSN: 1528-2716.

Kasal, Bohumil and Thomas Tannert, eds. (2011). *In Situ Assessment of Structural Timber*. Vol. 7. RILEM State of the Art Reports. Dordrecht: Springer Netherlands. ISBN: 978-94-007-0559-3 978-94-007-0560-9.

Kelley, S. S., T. G. Rials, L. R. Groom, and C. L. So (2004). "Use of near infrared spectroscopy to predict the mechanical properties of six softwoods". In: *Holzforschung* 58.3, pp. 252–260. ISSN: 00183830 (ISSN).

Kelley, Stephen S., Jody Jellison, and Barry Goodell (2002). "Use of NIR and pyrolysis-MBMS coupled with multivariate analysis for detecting the chemical changes associated with brown-rot biodegradation of spruce wood". In: *FEMS Microbiology Letters* 209.1, pp. 107–111. ISSN: 1574-6968.

Kim, Y. S. and A. P. Singh (2000). "Micromorphological characteristics of wood biodegradation in wet environments : A review". In: *IAWA Journal* 21.2, pp. 135–155. ISSN: 09281541 (ISSN).

Kretschmann, D.E. (2010). "Mechanical Properties of Wood". In: *Wood handbook : wood as an engineering material : chapter 5.* Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Labonnote, Nathalie, Anders Rønnquist, and Kjell Arne Malo (2013). "Experimental evaluations of material damping in timber beams of structural dimensions". English. In: *Wood Science and Technology* 47.5, pp. 1033–1050. ISSN: 0043-7719, 1432-5225.

Legg, M. and S. Bradley (2016). "Measurement of stiffness of standing trees and felled logs using acoustics : A review". English. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 139.2, pp. 588–604. ISSN: 0001-4966.

Leinonen, A., A. M. Harju, M. Venäläinen, P. Saranpää, and T. Laakso (2008). "FT-NIR spectroscopy in predicting the decay resistance related characteristics of solid Scots pine (Pinus sylvestris L.) heartwood". In: *Holzforschung* 62.3, pp. 284–288. ISSN: 00183830 (ISSN).

Liland, Kristian Hovde and Bjorn-Helge Mevik (2014). *baseline : Baseline Correction of Spectra.*

Lundström, T., M. Stoffel, and V. Stöckli (2008). "Fresh-stem bending of silver fir and Norway spruce". English. In: *Tree Physiology* 28.3, pp. 355–366. ISSN: 0829-318X.

Machek, L, H Militz, and W Gard (1997). "Use of modulus of rupture and modulus of elasticity in natural durability testing." In:

Machek, L, H Militz, and R Sierra-Alvarez (1998). "A dynamic approach to assess the modulus of elasticity in wood decay testing". In:

Machek, L., H. Militz R, and Alvarez Sierra (2001a). "As The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing". In: *Holzforschung und Holzverwertung* 53.5, pp. 97–100. ISSN: 00183849 (ISSN).

Machek, L., H. Militz, and R. Sierra-Alvarez (2001b). "The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests". English. In: *Wood Science and Technology* 34.6, pp. 467–472. ISSN: 0043-7719, 1432-5225.

Maloy, Otis C. and Timothy D. Murray, eds. (2001). *Encyclopedia of plant pathology*. New York: Wiley. ISBN: 978-0-471-29817-5.

Mao, Zhun, Laurent Saint-André, Marie Genet, François-Xavier Mine, Christophe Jourdan, Hervé Rey, Benoît Courbaud, and Alexia Stokes (2012). "Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests : Choosing cohesion models". In: *Ecological Engineering*. Ecological Engineering–Its Development, Applications and Challenges 45, pp. 55–69. ISSN: 0925-8574.

Mevik, Bjørn-Helge and Henrik René Cederkvist (2004). "Mean squared error of prediction (MSEP) estimates for principal component regression (PCR) and partial least squares regression (PLSR)". English. In: *Journal of Chemometrics* 18.9, pp. 422–429. ISSN: 1099-128X.

Mevik, Bjørn-Helge, Ron Wehrens, and Kristian Hovde Liland (2013). *pls : Partial Least Squares and Principal Component regression*.

Meyer, Linda and Christian Brischke (2015). "Fungal decay at different moisture levels of selected European-grown wood species". In: *International Biodeterioration & Biodegradation* 103, pp. 23–29. ISSN: 0964-8305.

Mäkipää, Raisa and Tapio Linkosalo (2011). "A non-destructive field method for measuring wood density of decaying logs". In: *Silva Fennica* 45.5. ISSN: 22424075.

Naaim-Bouvet, Florence and Didier Richard (2015). *Les risques naturels en montagne*. French. OCLC : 930595914. Versailles Cedex: Éd. Quae. ISBN: 978-2-7592-2386-2.

Nadler, Boaz and Ronald R. Coifman (2005). "The prediction error in CLS and PLS : the importance of feature selection prior to multivariate calibration". English. In: *Journal of Chemometrics* 19.2, pp. 107–118. ISSN: 1099-128X.

Niklas, Karl J. and Hanns-Christof Spatz (2010). "Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density". English. In: *American Journal of Botany* 97.10, pp. 1587–1594. ISSN: 0002-9122, 1537-2197.

Noetzli, K., A. Boell, F. Graf, T.N. Sieber, and O. Holdenrieder (2008). "Influence of decay fungi, construction characteristics, and environmental conditions on the quality of wooden check-dams". English. In: *Forest Products Journal* 58.4, pp. 72–79. ISSN: 0015-7473.

Obataya, Eiichi, Misato Norimoto, and Joseph Gril (1998). "The effects of adsorbed water on dynamic mechanical properties of wood". In: *Polymer* 39.14, pp. 3059–3064. ISSN: 0032-3861.

Olsson, Anders, Jan Oscarsson, Marie Johansson, and Bo Källsner (2011). "Prediction of timber bending strength on basis of bending stiffness and material homogeneity assessed from dynamic excitation". English. In: *Wood Science and Technology* 46.4, pp. 667–683. ISSN: 0043-7719, 1432-5225.

Ottoson, Elisabeth (2013). "Succession of Wood-inhabiting Fungal Communities". English. PhD thesis. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences.

Ouis, D. (1999). "Vibrational and acoustical experiments on logs of spruce". English. In: *Wood Science and Technology* 33.2, pp. 151–184. ISSN: 0043-7719, 1432-5225.

— (2000). "Detection of decay in logs through measuring the dampening of bending vibrations by means of a room acoustical technique". English. In: *Wood Science and Technology* 34.3, pp. 221–236. ISSN: 0043-7719, 1432-5225.

Piazza, Maurizio and Mariapaola Riggio (2008). "Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures". English. In: *Journal of Building Appraisal* 3.4, pp. 267–296. ISSN: 1744-9545.

Piton, Guillaume, Simon Carladous, Alain Recking, Jean Marc Tacnet, Frédéric Liébault, Damien Kuss, Yann Quefféléan, and Olivier Marco (2016). "Why do we build check dams in Alpine

streams ? An historical perspective from the French experience". English. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, n/a–n/a. ISSN: 1096-9837.

Poke, F. S. and C. A. Raymond (2006). "Predicting extractives, lignin, and cellulose contents using near infrared spectroscopy on solid wood in Eucalyptus globulus". In: *Journal of Wood Chemistry and Technology* 26.2, pp. 187–199. ISSN: 02773813 (ISSN).

Previati, M., D. Canone, I. Bevilacqua, G. Boetto, D. Pognant, and S. Ferraris (2012). "Evaluation of wood degradation for timber check dams using time domain reflectometry water content measurements". English. In: *Ecological Engineering* 44, pp. 259–268. ISSN: 0925-8574.

Przewloka, S. R., D. M. Crawford, D. R. Rammer, D. L. Buckner, B. M. Woodward, G. Li, and D. D. Nicholas (2008). "Assessment of biodeterioration for the screening of new wood preservatives : Calculation of stiffness loss in rapid decay testing". In: *Holzforschung* 62.3, pp. 270–276. ISSN: 00183830 (ISSN).

R Core Team (2013). *R : A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria.

Rahman, A. and G. Chattopadhyay (2007). "Soil Factors Behind Inground Decay of Timber Poles : Testing and Interpretation of Results". In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 22.3, pp. 1897–1903. ISSN: 0885-8977.

Rey, F. (2009). "A strategy for fine sediment retention with bioengineering works in eroded marly catchments in a mountainous mediterranean climate (Southern ALPS, France)". In: *Land Degradation & Development* 20.2, pp. 210–216. ISSN: 1099-145X.

— (2017). "Ecologie ingénieriale : une recherche finalisée au service de l'ingénierie et du génie écologiques". In: *Revue d'écologie - La Terre et la vie* 72.

Rickli, C. and F. Graf (2014). "Timber constructions in torrent control with Norway spruce and silver fir : Wood quality and colonisation with decay fungi during the first years". German. In: *Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen* 165.4, pp. 79–86. ISSN: 2235-1469.

Riggio, Mariapaola, Ronald W. Anthony, Francesco Augelli, Bohumil Kasal, Thomas Lechner, Wayne Muller, and Thomas Tannert (2013). "In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques". English. In: *Materials and Structures* 47.5, pp. 749–766. ISSN: 1359-5997, 1871-6873.

Rinn, F., F.-H. Schweingruber, and E. Schar (1996). "RESISTOGRAPH and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species". English. In: *Holzforschung* 50.4, pp. 303–311. ISSN: 0018-3830.

Rinnan, Åsmund, Frans van den Berg, and Søren Balling Engelsen (2009). "Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra". In: *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 28.10, pp. 1201–1222. ISSN: 0165-9936.

Roman, Damien (2009). *Ouvrages bois dans les cours d'eau. Etat de l'art, applications et dimesionnements*. Français. Guide Technique. ONF, p. 57.

Romano, N., G. P. Lignola, M. Brigante, L. Bosso, and G. B. Chirico (2016). "Residual life and degradation assessment of wood elements used in soil bioengineering structures for slope protection". In: *Ecological Engineering* 90, pp. 498–509. ISSN: 0925-8574.

Ross, R. J. and R. F. ; Pellerin (1994). *Nondestructive testing for assessing wood members in structures : a review*. English. General Technical Report. United States Department of Agriculture, p. 40.

Ross, Robert J. ; (2015). *Nondestructive Evaluation of Wood : Second Edition*.

Ross, Robert J., Brian K. Brashaw, Xiping Wang, Robert H. White, and Roy F. Pellerin (2007). *Wood and Timber Condition Assessment Manual*. English. AWC.

Rowell, Roger (2012). "Chemistry of wood strength". In: *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. CRC Press, p. 703. ISBN: 978-1-4398-5380-1.

Sandak, A., J. Sandak, and M. Negri (2011). "Relationship between near-infrared (NIR) spectra and the geographical provenance of timber". English. In: *Wood Science and Technology* 45.1, pp. 35–48. ISSN: 0043-7719.

Sandak, Anna, Silvia Ferrari, Jakub Sandak, Ottaviano Allegretti, Nasko Terziev, and Mariapaola Riggio (2013). "Monitoring of Wood Decay by near Infrared Spectroscopy". In: *Advanced Materials Research* 778, pp. 802–809. ISSN: 1662-8985.

Sandak, Anna, Jakub Sandak, and Mariapaola Riggio (2015a). "Assessment of wood structural members degradation by means of infrared spectroscopy : an overview". English. In: *Structural Control and Health Monitoring*, n/a–n/a. ISSN: 1545-2263.

— (2015b). "Estimation of physical and mechanical properties of timber members in service by means of infrared spectroscopy". In: *Construction and Building Materials*. Assessment of structural timber members by non- and semi-destructive methods 101, Part 2, pp. 1197–1205. ISSN: 0950-0618.

Sandak, Jakub, Anna Sandak, and Mariapaola Riggio (2015c). "Multivariate analysis of multi-sensor data for assessment of timber structures : Principles and applications". In: *Construction and Building Materials*. Assessment of structural timber members by non- and semi-destructive methods 101, Part 2, pp. 1172–1180. ISSN: 0950-0618.

Schimleck, L R, C Mora, and R F Daniels (2003). "Estimation of the physical wood properties of green Pinus taeda radial samples by near infrared spectroscopy". In: *Canadian Journal of Forest Research* 33.12, pp. 2297–2305.

Schimleck, L.R. (2008). "Near-infrared spectroscopy : A rapid non-destructive method for measuring wood properties and its application to tree breeding". English. In: *New Zealand Journal of Forestry Science* 38.1, pp. 14–35. ISSN: 0048-0134.

Schmidt, Olaf and Dieter Czeschlik (2006). *Wood and tree fungi : biology, damage, protection, and use*. English. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-32138-5.

Schwanninger, M., B. Hinterstoisser, C. Gradinger, K. Messner, and K. Fackler (2004). "Examination of spruce wood biodegraded by Ceriporiopsis subvermispora using near and mid infrared spectroscopy". English. In: *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 12.6, pp. 397–409. ISSN: 0967-0335.

Schwanninger, M., J. C. Rodrigues, and K. Fackler (2011a). "A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components". In: *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 19.5, pp. 287–308. ISSN: 09670335 (ISSN).

Schwanninger, M., J.C. Rodrigues, N. Gierlinger, and B. Hinterstoisser (2011b). "Determination of lignin content in Norway spruce wood by Fourier transformed near infrared spectroscopy and partial least squares regression analysis. Part 2 : Development and evaluation of the final model". English. In: *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 19.5, pp. 331–341. ISSN: 0967-0335.

— (2011c). "Determination of lignin content in Norway spruce wood by Fourier transformed near infrared spectroscopy and partial least squares regression. Part 1 : Wavenumber selection and evaluation of the selected range". English. In: *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 19.5, pp. 319–329. ISSN: 0967-0335.

Schwarze, F. W. M. R. (2007). "Wood decay under the microscope". In: *Fungal Biology Reviews* 21.4, pp. 133–170. ISSN: 17494613 (ISSN).

Signal developers (2014). *Package signal : Signal processing*. Tech. rep.

signal developers (2015). *signal : Signal processing*.

Sila, Andrew and Thomas Terhoeven-Urselmans (2013). *soil.spec : Soil spectral file conversion, data exploration and regression*.

Stapel, Peter and Jan-Willem G. van de Kuilen (2013). "Effects of grading procedures on the scatter of characteristic values of European grown sawn timber". English. In: *Materials and Structures* 46.9, pp. 1587–1598. ISSN: 1359-5997, 1871-6873.

Stirling, R., T. Trung, C. Breuil, and P. Bicho (2007). "Predicting wood decay and density using NIR spectroscopy". In: *Wood and Fiber Science* 39.3, pp. 414–423. ISSN: 07356161 (ISSN).

Stokland, Jogeir N., Juha Siitonen, and Bengt Gunnar Jonsson (2012). *Biodiversity in dead wood*. Ecology, biodiversity, and conservation. New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-88873-8 978-0-521-71703-8.

Strukelj, M., S. Brais, S.A. Quideau, V.A. Angers, H. Kebli, P. Drapeau, and S.-W. Oh (2013). "Chemical transformations in downed logs and snags of mixed boreal species during decomposition". English. In: *Canadian Journal of Forest Research* 43.9, pp. 785–798. ISSN: 0045-5067.

Tannert, Thomas, Ronald W. Anthony, Bohumil Kasal, Michal Kloiber, Maurizio Piazza, Mariapaola Riggio, Frank Rinn, Robert Widmann, and Nobuyoshi Yamaguchi (2013). "In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques". English. In: *Materials and Structures* 47.5, pp. 767–785. ISSN: 1359-5997, 1871-6873.

Tardío, Guillermo and Slobodan B. Mickovski (2016). "Implementation of eco-engineering design into existing slope stability design practices". In: *Ecological Engineering* 92, pp. 138–147. ISSN: 0925-8574.

Thomson, William Tyrrell and Marie Dillon Dahleh (1998). *Theory of vibration with applications*. 5th ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall. ISBN: 978-0-13-651068-0.

Trouy, Marie-Christine (2015). *Anatomie du bois : formation, fonctions et identification*. French. OCLC : 922538466. Versailles: Quæ. ISBN: 978-2-7592-2349-7.

Tsuchikawa, S. (2007). "A review of recent near infrared research for wood and paper". In: *Applied Spectroscopy Reviews* 42.1, pp. 43–71. ISSN: 05704928 (ISSN).

Tsuchikawa, Satoru and Manfred Schwanninger (2013). "A Review of Recent Near-Infrared Research for Wood and Paper (Part 2)". In: *Applied Spectroscopy Reviews* 48.7, pp. 560–587. ISSN: 0570-4928.

Tsuchikawa, Satoru and Hikaru Kobori (2015). "A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology". English. In: *Journal of Wood Science*, pp. 1–8. ISSN: 1435-0211, 1611-4663.

Verkasalo, E. and J.-M. Leban (2002). "MOE and MOR in static bending of small clear specimens of Scots pine, Norway spruce and European fir from Finland and France and their prediction for the comparison of wood quality". English. In: *Paperi ja Puu/Paper and Timber* 84.5, pp. 332–340. ISSN: 0031-1243.

Viitanen, Hannu (1994). "Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions". English. In: *Materials and Structures* 27.8, pp. 483–493. ISSN: 1359-5997, 1871-6873.

Wal, A. van der, E. Ottosson, and W. de Boer (2015). "Neglected role of fungal community composition in explaining variation in wood decay rates". English. In: *Ecology* 96.1, pp. 124–133. ISSN: 1939-9170.

Wang, X., R.J. Ross, J.A. Mattson, J.R. Erickson, J.W. Forsman, E.A. Geske, and M.A. Wehr (2002). "Nondestructive evaluation techniques for assessing modulus of elasticity and stiffness of small-diameter logs". English. In: *Forest Products Journal* 52.2, pp. 79–85. ISSN: 0015-7473.

Wang, Xiping, Robert J. Ross, Michael Mcclellan, R. James Barbour, John R. Erickson, John W. Forsman, and Gary D. Mcginnis (2001). "Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method". English. In: *Wood and fiber science* 33.4, pp. 522–533. ISSN: 0735-6161.

Wilcox, W. (1978). "Review of Literature on the Effects of Early Stages of Decay on Wood Strength". In: *Wood and Fiber Science* 9.4, pp. 252–257.

Wilcox, W.W. and B.J. Garcia (1968). "Changes in wood properties at the boundary of polyporus amarus decay pockets". English. In: *Wood Science and Technology* 2.2, pp. 115–127. ISSN: 0043-7719.

Williamson, G. B. and M. C. Wiemann (2010). "Measuring wood specific gravity...correctly". In: *American Journal of Botany* 97.3, pp. 519–524. ISSN: 00029122 (ISSN).

Winandy, Jerrold E. and Jeffrey J. Morrell (1993). "Relationship Between Incipient Decay, Strength, and Chemical Composition of Douglas-Fir Heartwood". In: *Wood and Fiber Science* 25.3, pp. 278–288. ISSN: 0735-6161.

Wold, Svante, Michael Sjöström, and Lennart Eriksson (2001). "PLS-regression : a basic tool of chemometrics". In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. PLS Methods 58.2, pp. 109–130. ISSN: 0169-7439.

Woodhouse, J. (1998). "Linear damping models for structural vibration". In: *Journal of Sound and Vibration* 215.3, pp. 547–569. ISSN: 0022-460X.

Workman, Jerry and Lois Weyer (2008). *Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy*. OCLC : ocm86172843. Boca Raton: CRC Press. ISBN: 978-1-57444-784-2.

Yang, B.Z., R.D. Seale, R. Shmulsky, J. Dahlen, and X. Wang (2015). "Comparison of non-destructive testing methods for evaluating no. 2 southern pine lumber : Part a, modulus of elasticity". English. In: *Wood and Fiber Science* 47.4, pp. 375–384. ISSN: 0735-6161.

Yeh, C. T., B. J. Hartz, and C. B. Brown (1971). "Damping sources in wood structures". In: *Journal of Sound and Vibration* 19.4, pp. 411–419. ISSN: 0022-460X.

Zabel, R. A. and Jeffrey J. Morrell (1992). *Wood microbiology : decay and its prevention*. San Diego: Academic Press. ISBN: 978-0-12-775210-5.

Zeh, Helgard, ed. (2007). *Ingenieurbiologie : Handbuch Bautypen = Génie biologique = Ingegneria naturalistica = Soil bioengineering = Ingeniería biológica*. ger fre eng ita. OCLC : 180744601. Zürich: vdf Hochschulverl. ISBN: 978-3-7281-3055-6.