

UNIVERSITE DE LA REUNION - Laboratoire de **Physique et d'Ingénierie Mathématique**
pour l'Énergie et l'Environnement et le bâtiment

CIRAD - Unité de recherche Biomasse, bois, énergie, bio-produits

Unité Mixte de Recherche **QualiSud**

ORLAT - Observatoire Régional de Lutte Anti-Termite

QUALITROPIC - Pôle de Compétitivité de la Bioéconomie des Outremer

THESE

pour obtenir le titre de Docteur de l'Université de La Réunion

Spécialité **Biologie des Organismes**

**Le Cryptoméria de La Réunion (*Cryptomeria japonica*) :
durabilité naturelle face aux champignons
Basidiomycètes et aux termites et apports de la
spectroscopie proche infrarouge dans la prédiction de
ses caractéristiques**

En vue d'être soutenue publiquement le 15 décembre 2023 par

Jérôme VUILLEMIN

Mme	Tahiana RAMANANTOANDRO	Dr. HDR, Université d'Antananarivo, Madagascar	Rapporteure
M.	Bertrand CHARRIER	Pr. Université de Pau et des Pays de l'Adour, France	Rapporteur
Mme	Daouia MESSAOUDI	Ingénieure, Groupe BERKEM, ADKALIS, France	Examinatrice
Mme	Laetitia ADELARD	Dr. HDR, Université de La Réunion, France	Examineur
Mme	Marie-France THEVENON	Dr. HDR, UR BIOWOOEB, Montpellier, France	Directrice
M.	Alain BASTIDE	Pr., Université de la Réunion, France	Co-Directeur
M.	Fabrice DAVRIEUX	Ingénieur, UMR Qualisud, La Réunion, France	Co-encadrant

TITRE

Le Cryptoméria de La Réunion (*Cryptomeria japonica*) : durabilité naturelle face aux champignons Basidiomycètes et aux termites et apports de la spectroscopie proche infrarouge dans la prédiction de ses caractéristiques

RESUME

Le Cryptoméria (*Cryptomeria japonica*) est la seule essence de bois exploitable dans la construction à La Réunion. Cependant, sa durabilité variable face aux champignons Basidiomycètes et aux termites constitue un frein au déploiement de son utilisation à La Réunion, où les conditions climatiques sont particulièrement favorables à la dégradation des matériaux biosourcés par ces agents.

L'étude consiste donc à déterminer avec précision la durabilité naturelle de cette essence face à deux espèces de champignons ubiquistes (*Poria placenta* et *Coniophora puteana*) et deux espèces de termites (*Coptotermes gestroi* de La Réunion et *Reticulitermes flavipes* de France continentale), en réalisant un échantillonnage très large (4 arbres issus de 2 forêts ; éprouvettes prélevées dans l'aubier, le duramen externe et le duramen interne). Afin de réaliser une analyse comparative des résultats, des planches de duramen de Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris*), réputé peu durable face à ces agents biologiques et de Red Cedar (*Thuja plicata*), ayant une bonne durabilité, sont utilisées. L'influence du délavage des éprouvettes en laboratoire et du vieillissement naturel de planches de Cryptoméria en situation d'emploi 3.2 pendant 7 ans est également mesurée afin de mieux déterminer la performance de cette essence. Les éprouvettes non délavées, délavées et exposées naturellement sont soumises aux champignons et aux termites selon les protocoles normalisés européens (respectivement XP CEN/TS 15083-1, 2006 et EN 117, 2013). En complément, la spectroscopie proche infra-rouge, couplée à la chimiométrie, est utilisée afin de mettre en évidence les effets du délavage, distinguer les essences de bois, déterminer la densité et la teneur en eau des éprouvettes et prédire la durabilité face aux champignons Basidiomycètes.

Les résultats confirment la variabilité de la durabilité du duramen de Cryptoméria de La Réunion face aux champignons, et plus particulièrement *P. placenta*, champignon le plus discriminant. Les dispositions prévues dans la norme EN 350 (2016), ne permettent pas de classer cette essence car les valeurs individuelles de perte de masse se répartissent dans les 5 classes de durabilité, dont 90% dans les classes 1 à 3. Le Red Cedar est classé « Très Durable » et le Pin Sylvestre « Non Durable ».

Les résultats des éprouvettes délavées et issues de planches exposées permettent de mieux appréhender la performance du Cryptoméria. Après délavage, 77% des éprouvettes sont classées « Faiblement Durables » et 80% des éprouvettes exposées sont classées « Non Durable ». Ceci indique que le délavage en laboratoire est moins agressif que l'exposition naturelle, et que la durabilité résiduelle du Cryptoméria est moindre après 7 ans d'exposition naturelle, durée inférieure à la garantie donnée sur

les produits de la construction en France (au moins 10 ans). Le délavage n'a pas d'influence sur la performance du Red Cedar et du Pin Sylvestre.

Les résultats face aux termites sont conformes à la littérature : le Cryptoméria est « sensible » aux deux espèces de termites ; le Pin Sylvestre est « Sensible » à *C. gestroi* et le Red Cedar « Moyennement durable » face ce termite. Le délavage ou l'exposition naturelle n'influent pas sur ces résultats.

Les résultats permettent de proposer des révisions dans les normes européennes portant sur la durabilité face aux champignons et aux termites.

La spectroscopie est un outil performant dans la distinction des essences de bois, la détermination de la densité et de la teneur en eau, ainsi que dans la prédiction de la durabilité face aux champignons. Ce qui permet d'envisager cet outil prédictif dans l'industrie du bois et dans le cadre d'expertises.

MOTS CLES

CRYPTOMERIA - RED CEDAR - PIN SYLVESTRE - DURABILITE NATURELLE - CHAMPIGNONS BASIDIOMYCETES - TERMITES - NORMES - SPECTROSCOPIE PROCHE INFRA-ROUGE (SPIR) - CHIMIOMETRIE – LA REUNION

TITLE

***Cryptomeria japonica* from Reunion Island: natural durability against Basidiomycete Fungi and Termites, and the contributions of near infrared spectroscopy in the prediction of its characteristics**

ABSTRACT

Cryptomeria japonica is the only species of wood that can be used in construction in Reunion Island. However, its variable durability against basidiomycete fungi and termites constitutes an obstacle to the deployment of its use in Reunion Island, where climatic conditions are particularly favorable to the degradation of biobased materials by these agents.

The study therefore consists of precisely determining the natural durability of this species against two species of ubiquitous fungi (*Poria placenta* and *Coniophora puteana*) and two species of termites (*Coptotermes gestroi* from Reunion Island and *Reticulitermes flavipes* from mainland France), by carrying out a very large sampling (4 trees from 2 forests; test specimens taken from the sapwood, the outer heartwood, and the inner heartwood). To carry out a comparative analysis of the results, boards of heartwood from Scots pine (*Pinus sylvestris*), known to be poorly durable against these biological agents, and Western Red Cedar (*Thuja plicata*), durable, are used. The influence of laboratory leaching of the specimens and natural ageing of *Cryptomeria* boards in Use Class 3.2 for 7 years in Reunion Island is also measured to better determine the performance of this species. Unleached, leached and naturally exposed test specimens are exposed to fungi and termites according to European standardized protocols (respectively XP CEN/TS 15083-1, 2006 and EN 117, 2013). In addition, near-infrared spectroscopy (NIRS), coupled with chemometrics, is used to highlight the effects of leaching, distinguish wood species, determine the density, and water content of the test specimens, and to predict the durability against basidiomycetes fungi.

The results confirm the variability of the durability of the *Cryptomeria* heartwood from Reunion Island against fungi, and more particularly *P. placenta*, the most discriminating fungus. The classification of this species cannot be made following the method described in standard EN 350 (2016) because the individual mass loss values are distributed among the 5 durability classes, including 90% in classes 1 to 3. Red cedar is classified "Very Durable" and Scots pine "Not Durable".

The results of leached test specimens and naturally exposed boards provide a better understanding of the performance of *Cryptomeria*. After leaching procedure, 77% of the specimens are classified "Slightly Durable" and 80% of the naturally exposed specimens are classified "Not Durable". These results indicate that laboratory leaching is less aggressive than natural ageing and that the residual durability of *Cryptomeria* wood is worth after 7 years of natural exposure, a duration shorter than the guarantee given on construction products in France (at least 10 years). Leaching has no influence on the performance of Western Red cedar and Scots pine.

The results against termites are consistent with the literature: Cryptomeria is “Not Durable” to both termite species; Scots pine is “Not Durable” to *C. gestroi* and Western Red Cedar “Moderately Durable” faces this termite. Leaching or natural exposure does not influence these results.

Several changes in the European standards used in the sector of wood durability are proposed.

Near infrared spectroscopy is a powerful tool in distinguishing wood species, determining density and water content, as well as predicting durability against fungi. Which allows the use of this technology in the wood industry and in the context of expertise.

KEY WORDS

CRYPTOMERIA – WESTERN RED CEDAR - SCOTTS PINE - NATURAL DURABILITY - BASIDIOMYCETES FUNGI - TERMITES - STANDARDS - NEAR INFRA-RED SPECTROSCOPY (NIRS) - CHEMOMETRY - REUNION ISLAND

REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à remercier chaleureusement ma directrice de thèse, Marie-France Thévenon, qui a accepté de suivre et de diriger ce travail. Sa disponibilité, sa bienveillance, son expertise, ses recommandations m'ont été indispensables dans la réalisation de ce travail, toujours dans la bonne humeur. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma très haute considération.

Je remercie M. Alain Bastide, co-directeur de thèse, pour sa confiance et ses conseils avisés.

Je remercie vivement M. Fabrice Davrieux, co-encadrant qui a su m'accompagner dans le monde de la spectroscopie et de la chimiométrie. Il a été d'une grande aide pour appréhender ce sujet qui m'était assez obscure, ceci avec beaucoup de pédagogie et de rigueur. Merci pour ta gentillesse et ta patience.

Je remercie M. Gilles Chaix et Mme Magdalena Kutnik, membres de mes comités de thèse, qui ont suivi mes travaux et prodigué de nombreux conseils fort utiles dans la réalisation de ces travaux.

Je remercie les membres du jury, Mme Tahiana Ramananantoandro et M. Bertrand Charrier, en tant que rapporteurs, qui ont apporté toute leur expertise à juger ces travaux. Je remercie également Mme Laetitia Adelard d'en être examinatrice ainsi que Mme Daouia Messaoudi, experte dans le secteur du bois et de sa préservation, avec qui j'ai tant plaisir à travailler depuis plus de dix ans.

Je remercie la scierie Sciages de Bourbon de m'avoir cédé les planches de Cryptoméria utilisées dans cette étude et d'avoir satisfait aux exigences d'échantillonnage.

Je remercie vivement mes ex-collègues de la Chambre de Métiers et de l'Artisanat de La Réunion et plus particulièrement du CIRBAT et de l'ORLAT. Mention particulière pour M. Florent Chopinet, un technicien hors pair, avec qui j'ai partagé 15 ans de passion sur les termites et le bois. Je remercie également les financeurs de l'ORLAT, l'Europe et la Région Réunion, qui ont permis le développement de cet outil sur le territoire réunionnais.

Je remercie mes collègues du Pôle de compétitivité Qualitropic, avec lesquels je partage une aventure professionnelle exceptionnelle depuis 2019 et qui m'ont apporté leurs encouragements dans la finalisation de ses travaux. Merci à vous pour votre expertise, votre disponibilité, votre implication et votre bonne humeur quotidienne. Merci également aux membres du conseil d'administration et du bureau, et aux trois présidents qui se sont succédé, M. Alain Dambreville, Mme Laurence Galaup et M. Xavier Bocquillet, qui m'accordent toute leur confiance dans la gestion de cette structure que je dirige avec bonheur.

Je remercie mes amis, de La Réunion, de Métropole et d'ailleurs. C'est grâce à votre soutien quotidien que je m'épanouis dans ma vie. Mention spéciale aux membres du FGC.

Je remercie ma sœur Nathalie, mon frère Nicolas, et leurs familles, qui sont toujours là pour m'apporter leur amour et leur soutien. Je n'oublie bien sûr pas les autres membres de cette grande famille franco-mauricienne et Alsacienne.

Je remercie mes parents, Mimose et Michel, qui m'ont éduqué avec amour et inculqué leurs valeurs : l'honnêteté, le travail, la simplicité, le respect. Je les remercie tellement de m'avoir permis de faire des études sereinement et d'être présents quotidiennement malgré la distance qui nous sépare.

Je te remercie, toi, Sébastien, qui m'accompagne depuis plus de 15 ans. Merci d'être à mes côtés et de m'avoir soutenu pendant ces années de thèse.

Que tous ceux qui m'ont apporté leur soutien, sous une forme ou sous une autre, trouvent ici mes chaleureux remerciements.

INTRODUCTION	1
1. ETAT DE L'ART	5
1.1. ESSENCES DE BOIS A L'ETUDE	5
1.1.1. <i>Le Cryptoméria, Cryptomeria japonica</i>	5
1.1.2. <i>Le Pin Sylvestre, Pinus sylvestris</i>	9
1.1.3. <i>Le Red Cedar, Thuja plicata</i>	10
1.2. EVALUATION DE LA DURABILITE NATURELLE	11
1.3. LES AGENTS BIOLOGIQUES	15
1.3.1. <i>Champignons lignivores</i>	15
1.3.1.1. <i>Poria placenta</i>	15
1.3.1.2. <i>Coniophora puteana</i>	16
1.3.3. <i>Les Termites</i>	17
1.3.3.1. Les termites de La Réunion	17
1.3.3.2. Les termites de France continentale et de Corse	18
1.4. LA SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE (SPIR)	19
1.4.1. <i>Densité / Masse volumique du bois</i>	20
1.4.2. <i>Teneur en eau</i>	20
1.4.3. <i>Classification - Distinction des essences de bois</i>	21
1.4.4. <i>Durabilité face aux termites et champignons lignivores</i>	22
2. CONTEXTE ET OBJECTIFS	24
3. MATERIEL ET METHODES	26
3.1. MATERIEL BIOLOGIQUE	26
3.1.1. <i>Essences de bois et échantillonnage</i>	26
3.1.1.1. <i>Cryptomeria japonica</i>	26
3.1.1.2. <i>Thuja plicata</i> et <i>Pinus sylvestris</i>	28
3.1.1.3. Echantillonnage et répartition des éprouvettes.....	29
3.1.2. <i>Champignons Basidiomycètes et Termites</i>	30
3.2. METHODES.....	31
3.2.1. <i>Essais de durabilité naturelle selon la norme cadre EN 350 (2016) et assurance qualité</i>	31
3.2.2. <i>Dé lavage des éprouvettes</i>	32
3.2.3. <i>Evaluation de la durabilité face aux champignons lignivores</i>	33
3.2.4. <i>Evaluation de la durabilité face aux termites souterrains</i>	35
3.2.5. <i>Mesure de la densité et la teneur en eau</i>	37
3.2.6. <i>Mesures statistiques appliquées aux résultats</i>	37
3.2.7. <i>Acquisition des données spectrales et analyse des données</i>	37
4. DURABILITE NATURELLE FACE AUX CHAMPIGNONS BASIDIOMYCETES ET AUX TERMITES	41
4.1. RESULTATS	41
4.1.1. <i>Durabilité naturelle face aux champignons Basidiomycètes</i>	41
4.1.1.1. Discrimination des deux champignons sur les différentes essences de bois.....	44
4.1.1.2. Comparaison de la durabilité du duramen interne et du duramen externe de <i>Cryptomeria japonica</i>	45
4.1.1.3. Comparaison de la durabilité naturelle des différents arbres de <i>Cryptomeria japonica</i>	46
4.1.1.4. Détermination de la durabilité naturelle des trois essences de bois utilisées.....	46
4.1.1.5. Effet du dé lavage et de l'exposition naturelle (classe d'emploi 3.2) sur la durabilité naturelle des trois essences à l'étude	48
4.1.2. <i>Durabilité face aux termites souterrains</i>	55
4.1.2.1. Durabilité face aux termites souterrains <i>Coptotermes gestroi</i> de la Réunion.....	55
4.1.2.2. Durabilité face aux termites souterrains <i>Reticulitermes flavipes</i>	61
4.2. DISCUSSION SUR LA DURABILITE NATURELLE FACE AUX CHAMPIGNONS ET AUX TERMITES	63
5. APPORTS DE LA SPIR DANS LA DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES BOIS EN ESSAI	71
5.1. RESULTATS.....	71
5.1.1. <i>Analyses des données spectrales</i>	71
5.1.1.1. Résumé des données.....	71
5.1.1.2. Données spectrales	72
5.1.1.3. Données physico-chimiques et de durabilité	74

5.1.1.4.	Analyses des données spectrales	77
5.1.1.5.	Analyses par zones du bois.....	88
5.1.1.6.	Analyse de la Densité	91
5.1.1.7.	Analyse de la Teneur en eau.....	97
5.1.1.8.	Durabilité face aux champignons lignivores Basidiomycètes	99
5.2.	DISCUSSION SUR LES APPORTS DE SPECTROSCOPIE PROCHE INFRA-ROUGE.....	104
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		108
Références Bibliographiques		112
ANNEXE A. Résultats de l'étude de caractérisation du <i>Cryptomeria japonica</i> Durabilité face aux champignons et aux termites souterrains (Kutnik et al., 2012)		123
ANNEXE B. Etude préalable à l'acquisition de données NIRS afin d'évaluer le nombre de répétitions et la nécessité de réaliser des mesures sur les deux faces opposée d'une éprouvette		124
ANNEXE C. Illustration des dégâts réalisés sur les éprouvettes par <i>Coptotermes gestroi</i> .		126

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DURABILITE DE <i>C. JAPONICA</i>	8
TABLEAU 2. DURABILITE DE <i>P. SYLVESTRIS</i>	9
TABLEAU 3. DURABILITE DE <i>T. PLICATA</i>	11
TABLEAU 4. PERFORMANCES DU PIN SYLVESTRE ET DU RED CEDAR.....	14
TABLEAU 5. LES 11 ESPECES DE TERMITES PRESENTES A LA REUNION.....	17
TABLEAU 6. LES TERMITES PRESENTS EN FRANCE CONTINENTALE ET EN CORSE	18
TABLEAU 7. VUE D'ENSEMBLE ET REPARTITION DES EPROUVETTES POUR LES ESSAIS BIOLOGIQUES	30
TABLEAU 8. COTATION DES DEGATS REALISES PAR LES TERMITES SOUTERRAINS	36
TABLEAU 9. VALIDITE DES ESSAIS DE DEGRADATION VIS-A-VIS DES CHAMPIGNONS BASIDIOMYCETES.....	41
TABLEAU 10. MEDIANE, MOYENNE ET ECART-TYPE DU POURCENTAGE DE PERTE DE MASSE DES DIFFERENTES ESSENCES A L'ESSAI NON DELAVEES SELON LA ZONE DE PRELEVEMENT DES EPROUVETTES APRES MISE EN PRESENCE DES CHAMPIGNONS <i>P. PLACENTA</i> ET <i>C. PUTEANA</i>	43
TABLEAU 11. COMPARAISON DE LA PERTE DE MASSE MOYENNE (%) DU DURAMEN INTERNE ET EXTERNE DE <i>C. JAPONICA</i> FACE A <i>P. PLACENTA</i>	45
TABLEAU 12. DETERMINATION DE LA CLASSE DE DURABILITE (DC) DE CHAQUE ESSENCE.....	47
TABLEAU 13. REPARTITION DES VALEURS INDIVIDUELLES DE PERTE DE MASSE DES EPROUVETTES DE DURAMEN DES 3 ESSENCES DE BOIS DANS LES DIFFERENTES CLASSES DE DURABILITE	47
TABLEAU 14. MEDIANE, MOYENNE ET ECART-TYPE DU POURCENTAGE DE PERTE DE MASSE DES DIFFERENTES ESSENCES A L'ESSAI DELAVEES SELON LA ZONE DE PRELEVEMENT DES EPROUVETTES APRES MISE EN PRESENCE DES CHAMPIGNONS <i>P. PLACENTA</i> ET <i>C. PUTEANA</i>	49
TABLEAU 15. MEDIANE, MOYENNE ET ECART-TYPE DU POURCENTAGE DE PERTE DE MASSE DES EPROUVETTES DE DURAMEN (D) DE <i>C. JAPONICA</i> EXPOSEES NATURELLEMENT, APRES MISE EN PRESENCE DES CHAMPIGNONS <i>P. PLACENTA</i> ET <i>C. PUTEANA</i>	49
TABLEAU 16. MOYENNE DE PERTE DE MASSE (EN %) DES 3 ESSENCES FACE AUX DEUX CHAMPIGNONS AVEC ET SANS EPREUVE DE DELAVAGE ET APRES EXPOSITION NATURELLE (POUR LE DURAMEN DE <i>C. JAPONICA</i>).....	50
TABLEAU 17. DETERMINATION DE LA CLASSE DE DURABILITE (DC) DE CHAQUE ESSENCE APRES DELAVAGE OU EXPOSITION NATURELLE	53
TABLEAU 18. REPARTITION DES VALEURS INDIVIDUELLES DE PERTE DE MASSE DES EPROUVETTES DE DURAMEN DES 3 ESSENCES DE BOIS DANS LES DIFFERENTES CLASSES DE DURABILITE	53
TABLEAU 19. PERTE DE MASSE ANHYDRE, COTATION ET TAUX DE MORTALITE DES OUVRIERS APRES MISE EN PRESENCE DU TERMITE SOUTERRAIN <i>C. GESTROI</i> DES EPROUVETTES NON DELAVEES SELON LA ZONE DE PRELEVEMENT	56
TABLEAU 20. PERTE DE MASSE ANHYDRE, COTATION ET TAUX DE MORTALITE DES OUVRIERS APRES MISE EN PRESENCE DU TERMITE SOUTERRAIN <i>C. GESTROI</i> DES EPROUVETTES DELAVEES OU EXPOSEES NATURELLEMENT SELON LA ZONE DE PRELEVEMENT	56
TABLEAU 21. REPARTITION DES EPROUVETTES DE DURAMEN NON DELAVEES DANS LES DIFFERENTES CLASSES DE COTATION ET DETERMINATION DE LA DURABILITE NATURELLE DES 3 ESSENCES DE BOIS.....	57
TABLEAU 22. REPARTITION DES EPROUVETTES DE DURAMEN DELAVEES OU EXPOSEES NATURELLEMENT DANS LES DIFFERENTES CLASSES DE COTATION ET DETERMINATION DE LA DURABILITE NATURELLE DES TROIS ESSENCES DE BOIS	58
TABLEAU 23. MOYENNE DE LA PERTE DE MASSE (G) DES EPROUVETTES SELON LEUR COTATION VISUELLE	60
TABLEAU 24. COTATION DES EPROUVETTES NON DELAVEES ET TAUX DE MORTALITE DES TERMITES APRES MISE EN PRESENCE DU TERMITE SOUTERRAIN <i>R. FLAVIPES</i> , SELON LA ZONE DE PRELEVEMENT DES EPROUVETTES.....	61
TABLEAU 25. REPARTITION DES EPROUVETTES DE DURAMEN DE <i>C. JAPONICA</i> DELAVEES DANS LES DIFFERENTES CLASSES DE COTATION ET DETERMINATION DE LA DURABILITE NATURELLE FACE A <i>R. FLAVIPES</i>	62
TABLEAU 26. RESUME DES DONNEES SPECTRALES (NOMBRE DE SPECTRES ACQUIS PAR VARIABLE)	71
TABLEAU 27. STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES VARIABLES QUANTITATIVES (TOUTES ESSENCES ET TOUTES ZONES CONFONDUES)	74
TABLEAU 28. RESUME DES VARIABLES QUANTITATIVES EN FONCTION DES PRE-TRAITEMENTS	76
TABLEAU 29. POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUE PAR LES 3 PREMIERES COMPOSANTES DES ACP REALISEES PAR ESSENCE, NOMBRE D'INDIVIDUS	82
TABLEAU 30. REPARTITION DES ECHANTILLONS NON DELAVES PAR ESSENCE : SETS D'APPRENTISSAGE ET DE VALIDATION.....	84
TABLEAU 31. MATRICE DE CONFUSION EN APPRENTISSAGE	85
TABLEAU 32. MATRICE DE CONFUSION EN VALIDATION	85
TABLEAU 33. REPARTITION DES ECHANTILLONS DELAVES PAR ESSENCE : SETS D'APPRENTISSAGE ET DE VALIDATION	86
TABLEAU 34. MATRICE DE CONFUSION EN APPRENTISSAGE	87
TABLEAU 35. MATRICE DE CONFUSION EN VALIDATION	88
TABLEAU 36. REPARTITION DES EPROUVETTES DE CRYPTOMERIA SELON LEUR ORIGINE ET LE PRE-TRAITEMENT REALISE	88
TABLEAU 37. REPARTITION DES EPROUVETTES DE CRYPTOMERIA SELON LEUR ORIGINE.....	88
TABLEAU 38. PARAMETRES ET PERFORMANCES DES MODELES PLS POUR LA VARIABLE DENSITE	93

TABLEAU 39. REPARTITION DES DONNEES DE TENEUR EN EAU	97
TABLEAU 40. EFFECTIF PAR CLASSE DE DURABILITE SELON LE TYPE DE TRAITEMENT ET L'ESSENCE	99
TABLEAU 41. MATRICE DE CONFUSION 5 CLASSES	100
TABLEAU 42. MATRICE DE CONFUSION 3 CLASSES	100
TABLEAU 43. MATRICE DE CONFUSION 2 CLASSES	101
TABLEAU 44. MATRICE CONFUSION EN APPRENTISSAGE (2 CLASSES)	101
TABLEAU 45. MATRICE CONFUSION EN VALIDATION (2 CLASSES)	101
TABLEAU 46. MATRICE DE CONFUSION 2 CLASSES	101
TABLEAU 47. PERFORMANCES DE L'EQUATION DE REGRESSION EN APPRENTISSAGE	102
TABLEAU 48. PARAMETRES STATISTIQUES DU SET DE VALIDATION	102
TABLEAU 49. MATRICE DE CONFUSION 5 CLASSES SUR LA BASE DES VALEURS PREDITES (VALIDATION)	102
TABLEAU 50. MATRICE DE CONFUSION 2 CLASSES SUR LA BASE DES VALEURS PREDITES (VALIDATION)	103

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. FORET DE CRYPTOMERIA DU BRULE (ST DENIS, LA REUNION).....	5
FIGURE 2. LOCALISATION DES PEUPELEMENTS DE CRYPTOMERIA A LA REUNION	6
FIGURE 3. DETERMINATION DE LA DURABILITE NATURELLE ET DE LA PERFORMANCE DU BOIS VIS-A-VIS DES CHAMPIGNONS LIGNIVORES BASIDIOMYCETES ET DES TERMITES DANS LE SYSTEME NORMATIF EUROPEEN	13
FIGURE 4. <i>COPTOTERMES GESTROI</i> : SOLDAT (A ET B), OUVRIER (C), ESSAIMANT (D) ET COUPLE ROYAL (E)	17
FIGURE 5. LES DIFFERENTS DOMAINES DU SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE	19
FIGURE 6. SCHEMA GLOBAL DE LA DEMARCHE EXPERIMENTALE	27
FIGURE 7. SECHAGE DES EPROUVETTES APRES DELAVAGE	33
FIGURE 8. DISPOSITIFS D'ESSAIS FACE AUX TERMITES (ORLAT)	35
FIGURE 9. PERTE DE MASSE MOYENNE (%) DES DIFFERENTES ESSENCES A L'ESSAI NON DELAVEES SELON LA ZONE DE PRELEVEMENT DES EPROUVETTES	43
FIGURE 10. COMPARAISON DE LA VIRULENCE DES DEUX CHAMPIGNONS A L'ESSAI (<i>P. PLACENTA</i> ET <i>C. PUTEANA</i>) SELON L'ESSENCE DE BOIS, LA ZONE ETUDIEE ET L'ARBRE EN QUESTION	44
FIGURE 11. COMPARAISON DE LA PERTE DE MASSE DES EPROUVETTES DE DURAMEN ET D'AUBIER DE CHAQUE ARBRE DE <i>C. JAPONICA</i> FACE A <i>P. PLACENTA</i>	46
FIGURE 12. EFFET DU DELAVAGE ET DE L'EXPOSITION NATURELLE SUR LA PERTE DE MASSE MOYENNE (%) DES EPROUVETTES SOUMISES A <i>PORIA PLACENTA</i>	51
FIGURE 13. EFFET DU DELAVAGE ET DE L'EXPOSITION NATURELLE SUR LA PERTE DE MASSE MOYENNE (%) DES EPROUVETTES SOUMISES A <i>C. PUTEANA</i>	51
FIGURE 14. MOYENNE DES COTATIONS (EN HAUT) ET DES PERTES DE MASSE EN GRAMMES (EN BAS) DES EPROUVETTES AVANT ET APRES DELAVAGE OU EXPOSITION NATURELLE, SELON LA ZONE DE PRELEVEMENT, APRES MISE EN PRESENCE DU TERMITE SOUTERRAIN <i>C.</i> <i>GESTROI</i>	55
FIGURE 15. PERTE DE MASSE (G) DES EPROUVETTES SANS DELAVAGE ET AVEC DELAVAGE OU EXPOSITION NATURELLE.....	59
FIGURE 16. CORRELATION ENTRE LA PERTE DE MASSE DES EPROUVETTES ET LA COTATION VISUELLE	60
FIGURE 17. MOYENNE DES COTATIONS DES EPROUVETTES AVANT ET APRES SELON LA ZONE DE PRELEVEMENT APRES MISE EN PRESENCE DU TERMITE SOUTERRAIN <i>R. FLAVIPES</i>	61
FIGURE 18. VALEURS D'ECART TYPES DES ABSORBANCES EN FONCTION DES LONGUEURS D'ONDE	72
FIGURE 19. SPECTRES MOYENS EN FONCTION DU TRAITEMENT (DELAVEES / NON DELAVEES) DES EPROUVETTES, TOUTES ESSENCES CONFONDUES	73
FIGURE 20. SPECTRES MOYENS PAR ESSENCE	73
FIGURE 21. SPECTRES EN DERIVEE PREMIERE ET DERIVEE SECONDE.....	74
FIGURE 22. HISTOGRAMMES DES VALEURS DE DENSITE ET COURBE DE LOI NORMALE	75
FIGURE 23. HISTOGRAMME DES VALEURS DE TENEUR EN EAU ET COURBE DE LOI NORMALE	75
FIGURE 24. HISTOGRAMME DES VALEURS DE PERTE EN MASSE (%) APRES EXPOSITION A <i>PORIA PLACENTA</i>	75
FIGURE 25. HISTOGRAMME DES VALEURS DE PERTE EN MASSE (%) APRES EXPOSITION A <i>CONIOPHORA PUTEANA</i>	76
FIGURE 26. REPARTITION DES SPECTRES SELON LE PREMIER PLAN DE L'ACP, SPECTRES COMPLETS LOG(1/R)	77
FIGURE 27. LOADINGS ASSOCIES AUX 3 PREMIERES COMPOSANTES.....	78
FIGURE 28. REPARTITION DES SPECTRES SELON LE PREMIER PLAN DE L'ACP, DERIVEE SECONDE DES SPECTRES LOG(1/R) ; LOADINGS ASSOCIES A CP1	78
FIGURE 29. REPARTITION DES SPECTRES SELON LE PREMIER PLAN ET LE PLAN 1/3 DE L'ACP SUR DERIVEE SECONDE DES SPECTRES LOG(1/R) SANS LES BANDES DE L'EAU	79

FIGURE 30. LOADINGS ASSOCIES A LA PREMIERE COMPOSANTE PRINCIPALE	80
FIGURE 31. REPARTITION DES INDIVIDUS SELON LES PLANS 1/2 ET 1/3 DE L'ACP SUR DERIVEE SECONDE DES SPECTRES SANS LES BANDES DE L'EAU. VISUALISATION DES TYPES D'ESSENCES	80
FIGURE 32. DETAIL DES REPARTITIONS SELON DE PLAN 1/2 DE L'ACP PAR ESSENCE ET PAR TRAITEMENT	81
FIGURE 33. REPARTITION DES SPECTRES SELON LES PREMIERS PLANS PRINCIPAUX DES ACP REALISEES PAR ESSENCE.....	83
FIGURE 34. PROJECTION DES ECHANTILLONS DE VALIDATION SUR LE PREMIER PLAN PRINCIPAL DE L'ACP D'APPRENTISSAGE. ECHANTILLONS NON DELAVES	84
FIGURE 35. PROJECTION DES ECHANTILLONS DE VALIDATION SUR LE PREMIER PLAN PRINCIPAL DE L'ACP D'APPRENTISSAGE. ECHANTILLONS DELAVES.....	87
FIGURE 36. REPARTITION DES ECHANTILLONS CRYPTOMERIA NON DELAVES SELON LE PREMIER PLAN DE L'ACP SPECTRE LOG(1/R). VISUALISATION PAR ZONE DE BOIS, ORIGINE (FORET) ET APPARTENANCE (FORET/ARBRE)	89
FIGURE 37. REPARTITION DES ECHANTILLONS CRYPTOMERIA DELAVES SELON LE PREMIER PLAN DE L'ACP SPECTRE LOG(1/R). VISUALISATION PAR ZONE DE BOIS, ORIGINES (FORET) ET APPARTENANCE (FORET/ARBRE).....	90
FIGURE 38. DENSITE MOYENNE DES DIFFERENTES ESSENCES	91
FIGURE 39. HISTOGRAMME DES VALEURS DE DENSITE POUR LES EPROUVETTES NON-DELAVEES ET COURBE DE LOI NORMALE	92
FIGURE 40. HISTOGRAMMES DES VALEURS DE DENSITE POUR LES EPROUVETTES DELAVEES ET COURBE DE LOI NORMALE	92
FIGURE 41. DENSITE : TENEURS PREDITES EN FONCTION DES TENEURS MESUREES	94
FIGURE 42. DENSITE : REPRESENTATION DES RESIDUS.....	94
FIGURE 43. TENEUR EN EAU MOYENNE DES DIFFERENTES ESSENCES	97
FIGURE 44. TENEURS EN EAU PREDITES VERSUS VALEURS MESUREES	98
FIGURE 45. REPARTITION DES EFFECTIFS	99
FIGURE 46. POURCENTAGES DE PERTE DE MASSE - VALEURS PREDITES VS VALEURS MESUREE (VALIDATION).....	102

LISTE DES EQUATIONS

ÉQUATION 1. HUMIDITE RELATIVE DES EPROUVETTES	33
ÉQUATION 2. MOYENNE DE L'HUMIDITE RELATIVE DES EPROUVETTES.....	34
ÉQUATION 3. HUMIDITE THEORIQUE INITIALE DES EPROUVETTES	34

INTRODUCTION

Le bois est un des matériaux les plus utilisés depuis l'origine de l'homme. Il a d'ailleurs joué un rôle fondamental dans l'histoire de notre civilisation (Radkau, 2012). D'abord utilisé comme combustible, dès la domestication du feu il y a plus d'un million d'années, ce matériau a ensuite été largement employé pour fabriquer des outils, des armes, du papier et bien sûr des matériaux d'ameublement et de construction (Kim, 2017). Du fait de ses caractéristiques et de son abondance, le bois est un matériau de choix pour les constructions, utilisé depuis des milliers d'années pour construire des édifices.

Lors de la révolution industrielle, au XIXème siècle, l'évolution de la maîtrise de l'énergie va entraîner le déclin de la construction en bois au profit des bâtiments en briques de terre cuite puis en parpaings de ciment ; ces constructions étant préférées des constructeurs et utilisateurs de par leur durabilité et leur entretien facilité.

Cependant, depuis une vingtaine d'années, la part de la construction bois augmente régulièrement en France et plus généralement dans le monde. En effet, du fait des préoccupations environnementales, les utilisateurs sont de plus en plus attirés par ce matériau vertueux dont les réserves sont inépuisables. Le bois présente un faible impact énergétique du fait de sa légèreté, du peu de nécessité d'eau dans ses processus de transformation et de construction, et de ses capacités isolantes très intéressantes du fait de sa faible conductivité thermique. De plus, l'utilisation du bois dans la construction participe à l'atténuation des dérèglements climatiques car ce matériau séquestre et stocke le carbone. En effet, le bois contient du carbone capté dans l'atmosphère par la photosynthèse et séquestré lors de la croissance de l'arbre, carbone qui reste stocké dans le matériau pour toute la durée de vie du produit bois. Il s'agit donc d'un matériau soutenable, particulièrement lorsqu'il est produit localement dans des forêts exploitées de manière durable et respectueuse de l'environnement, et d'un matériau recyclable et valorisable en énergie, à toutes les étapes de son cycle de vie (FCBA, 2015 ; Ruter *et al.*, 2016).

A La Réunion, le besoin en logements et donc de matériaux de construction est particulièrement important du fait de la croissance démographique, 25% plus élevée que la moyenne nationale. La demande en termes de logements, alimentée par le nombre de ménages qui continue de croître à un rythme soutenu, nécessiterait la livraison annuelle de 10 à 11 000 logements, alors que l'offre n'est que de 7 570 logements en moyenne ces dernières années. La plupart des matériaux de la construction étant importés, le développement de matériaux locaux, essentiellement à partir de ressources biosourcées, est un défi à relever (Nomadéis, 2018 ; Nexa et CIRBAT, 2018).

Ainsi, 30% de la surface de l'île est couverte par des types de végétation primaire, dont une grande variété de forêts, conséquence de la diversité de milieux et de climats

qui cohabitent sur ce territoire. L'essentiel des forêts se situent sur l'espace protégé du Parc National de La Réunion et plus de 100 000 ha de forêts publiques sont gérées par l'Office National des Forêts. Outre ces forêts naturelles, le territoire comprend environ 2500 Ha de massifs de *Cryptomeria japonica*. Ce conifère, introduit sur l'île à la fin du XIXe siècle a été adopté dès les années 50 comme essence de reboisement en raison de son adaptation aux sols volcaniques, au climat montagnard et aux vents cycloniques. Ces boisements sont amenés à approvisionner le marché local du bois à raison de 10 000 m³ de grumes par an pendant au moins 30 ans (selon ONF, site internet consulté en juin 2023).

Le bois de Cryptoméria est la seule essence disponible sur le territoire et utilisable comme bois de structure dans la construction. Une scierie industrielle a ainsi été mise en place en 2008 à St Benoit par les acteurs publics et privés de la filière afin de développer la production de bois local pour la filière bâtiment. La caractérisation physico-mécanique du Cryptoméria a été réalisée entre 2010 et 2012 (CMAR *et al.*, 2013) et permis l'introduction du Cryptoméria dans le système normatif français, ouvrant la possibilité d'utiliser le bois de cette essence comme élément de structure dans la construction.

Cependant, le résultat des études réalisées sur cette essence met en évidence que sa durabilité naturelle face aux agents de dégradation est particulièrement variable (Kutnik *et al.*, 2012). Constituant ainsi un réel frein au développement de son utilisation, particulièrement en zone tropicale où les conditions climatiques sont particulièrement favorables à la dégradation des matériaux biosourcés par ces agents biologiques. Il apparaît donc primordial de connaître la durée de vie du bâti et donc la durabilité et la performance des matériaux dans le temps.

Aussi, les travaux réalisés consistent à étudier la durabilité naturelle du Cryptoméria de la Réunion face aux champignons Basidiomycètes (*Poria placenta* et *Coniophora puteana*) et face aux termites souterrains *Coptotermes gestroi* issus de l'île de La Réunion et *Reticulitermes flavipes* issus de France continentale ; ceci en réalisant un échantillonnage d'éprouvettes très large (éprouvettes en provenance de différentes forêts et différentes zones de chaque arbre). L'étude inclut également des éprouvettes délavées en laboratoire et des éprouvettes issues de planches exposées pendant 7 ans comme bardage (classe d'emploi 3.2) afin de mesurer l'effet du délavage artificiel et du vieillissement naturel sur la durabilité naturelle de cette essence. Deux essences de conifères sont également utilisées afin de réaliser une étude comparative : le Pin Sylvestre, réputé pour sa faible durabilité et le Red Cedar, réputé particulièrement durable.

Enfin, il apparaît important, au vu de la variabilité observée, de travailler sur des outils permettant de classer les planches issues de scierie en fonction de leur classe de durabilité. Pour ce faire, des méthodes prédictives basées sur la spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) ont été développées afin de déterminer un modèle permettant de prédire la durabilité naturelle du Cryptoméria face aux champignons

Basidiomycètes. Cet outil est également utilisé dans notre étude afin de mettre en évidence les effets du délavage, distinguer les essences de bois et déterminer la densité et la teneur en eau des éprouvettes.

1. ETAT DE L'ART

1.1. ESSENCES DE BOIS A L'ETUDE

En complément du *Cryptomeria japonica*, deux essences de bois sont utilisées dans cette étude : le Pin Sylvestre, *Pinus sylvestris*, réputé très sensible aux attaques de champignons et de termites et le Red Cedar, *Thuja plicata*, présentant une meilleure durabilité face aux attaques de ces agents de dégradation. L'utilisation de ces deux essences permet de faire une analyse comparative des résultats.

1.1.1. Le Cryptoméria, *Cryptomeria japonica*

Décrit pour la première fois en 1838 par Don, le *Cryptomeria japonica* (Fig. 1), appelé « sugi », est un conifère originaire du Japon, qui appartient à la famille des Cupressacées (Silba, 1986). Largement distribuée sur le territoire japonais (Takahara *et al.*, 2023), cette essence est présente également en Chine, en Corée, aux Açores ainsi qu'à l'île de La Réunion où il a été introduit en pour le reboisement de l'île (Fig. 2). Sur le territoire français, cette espèce a également été introduite en Métropole, aux Antilles, en Polynésie et en Nouvelle Calédonie, sans valorisation économique.



Figure 1. Forêt de Cryptoméria du Brulé (St Denis, La Réunion)
(Source : ORLAT)

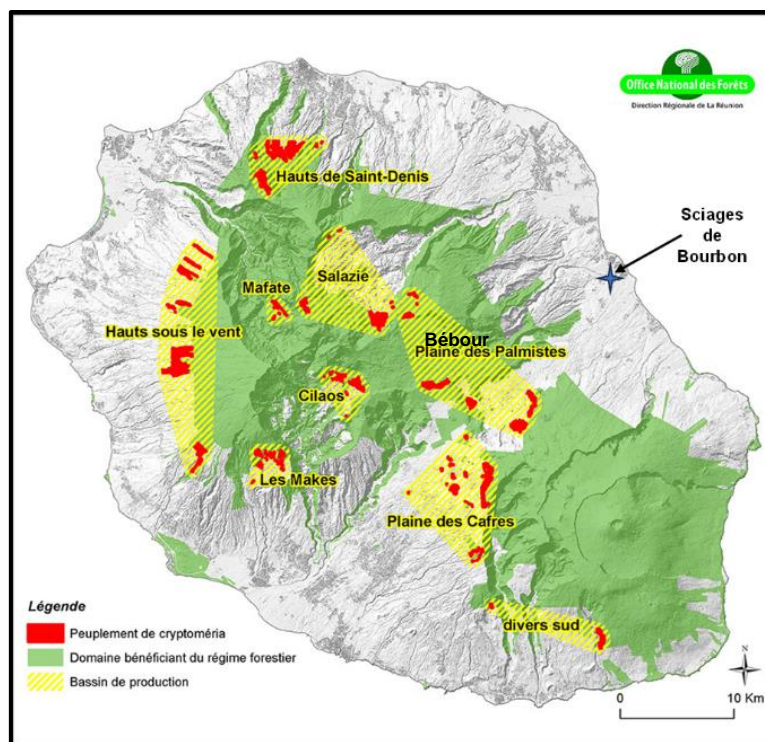


Figure 2. Localisation des peuplements de Cryptoméria à La Réunion (source : ONF Réunion, 2016)

Arbre à feuilles persistantes dont l'écorce rouge/brune pèle en bandes verticales, il peut atteindre 60 m de hauteur. Les feuilles sont arrangées en spirale, comme des épines, de 0,5 à 1 cm de long, et les cônes font 2 à 3 cm de diamètre avec 20 à 40 écailles légèrement imbriquées qui portent, sur leur face inférieure, des bosses blanches et jaunes d'où s'échappent en saison les grains de pollen (Fu *et al.*, 1999). Il s'agit d'un bois léger, dont la masse volumique est comprise entre 300 et 420 kg.m³ (Anshari *et al.*, 2011 ; Kutnik *et al.*, 2012).

Les caractéristiques physico-mécaniques de cette essence permettent son utilisation au Japon et à Taiwan dans la construction de bâtiments à structure traditionnelle en bois (Hon et Minemura, 1991 ; Chang et Cheng, 2001). Cependant, au Japon, cette essence n'est pas utilisée en extérieur sans traitement du fait de sa durabilité naturelle insuffisante (Yamamoto *et al.*, 2004).

Introduit en 1874 dans les forêts Réunionnaises, puis activement planté dès 1953 (Borderes, 1991) (Fig. 1), le Cryptoméria est la seule essence de bois locale utilisable comme bois de structure dans la construction. En effet la droiture de ses troncs et son abondance (prévision de 10 000 m³ de grume par an pendant 30 ans, selon les estimations de l'ONF en 2005) font de cette espèce une ressource fiable. Une étude de caractérisation physico-mécanique du *C. japonica* de La Réunion a été réalisée entre 2010 et 2013 (CMAR *et al.*, 2013). Ces travaux ont démontré que le bois de cette essence, issu des forêts de La Réunion, est utilisable en tant que bois de structure dans la construction. En effet, la combinaison de la sélection des grumes et l'utilisation d'une machine de classement mécanique permettent d'obtenir les classes de résistance mécaniques comprises entre C14 et C24. Les résultats de cette étude a

permis l'introduction du Cryptoméria dans la norme de classement visuel NF B 52 001-1 (2018) et la norme EN 1912 (2012) ouvrant la possibilité d'utiliser cette essence de bois dans le domaine de la construction.

En ce qui concerne la durabilité naturelle de cette essence, il est important de distinguer les arbres issus d'Asie de ceux issus de la Réunion. Cette distinction est faite dans la norme EN 350 (2016) et la fiche Tropix du CIRAD (2013).

L'aubier du Cryptoméria est défini comme non durable, comme la plupart des aubiers (Norme EN 350, 2016). Il est utilisé dans les essais japonais normalisé comme base pour tester les produits de protection du bois et comme témoin de virulence des champignons et des termites.

Durabilité naturelle du bois de *C. japonica* issu d'Asie face aux champignons xylophages et aux termites

Cette essence a fait l'objet de plusieurs études qui mettent en avant une certaine variabilité dans sa durabilité vis-à-vis des champignons xylophages : en effet, certaines études concluent à une bonne durabilité (Vivian *et al.*, 2020), d'autres à une durabilité moindre (Nunes et Cruz (2003) ; Sundararaj *et al.* (2015)). La plupart des auteurs concluent qu'il s'agit d'une essence présentant une durabilité variable (Matsuoka *et al.* 1970 ; Tewari, 1978 ; Scheffer et Morrel, 1998, Yamamoto *et al.*, 2004). Dans cette dernière étude, les auteurs, ont testé, en laboratoire, des éprouvettes provenant de 27 arbres issus de 15 clones. Les éprouvettes provenant d'un de ces clones se distinguant par leur bonne durabilité, ils émettent l'hypothèse que la durabilité est essentiellement d'origine génétique.

En ce qui concerne la durabilité naturelle face aux termites, le *C. japonica* est réputé durable face à *Coptotermes formosanus* (Grace *et al.*, 1996) et au termite de bois sec *Incisitermes minor* (Indrayani *et al.*, 2007).

Des essais de champs en classe d'emploi 4 (piquets dans le sol) ont été conduits au Japon (Matsuoka *et al.* 1970) et ont montré une durée de service de 6 ans. Le même type d'essai a été réalisé au Brésil, à partir d'éprouvettes de Cryptoméria local, et ont démontré une bonne durabilité de cette essence après deux mois d'essai (Vivian *et al.*, 2020).

Durabilité naturelle du bois de *C. japonica* issu de La Réunion face aux champignons xylophages et aux termites

La durabilité naturelle du bois de *C. japonica* issu de la Réunion a été évaluée entre 2010 et 2012, en laboratoire, par l'institut technologique FCBA et par l'Observatoire Régionale de Lutte Anti-Termite de La Réunion (Kutnik *et al.*, 2012 ; Annexe A).

Les essais de durabilité face aux champignons Basidiomycètes ont été réalisés conformément aux prescriptions de la spécification technique XP X CEN/TS 15083-1 (2006) sur des éprouvettes de duramen provenant de cinq planches issues de trois plantations de La Réunion (Bélouve, Bois de Nèfles et Plaine des Palmistes) face à

trois espèces tempérées *Poria placenta* (PP), *Coniophora puteana* (CP) et *Gloeophyllum trabeum* (GT), et une espèce tropicale, *Lentinus lepideus* (LL). Pour ces quatre espèces, les résultats observés classent le *C. japonica* comme « Très Durable » (DC 1) ou « Durable » (DC2). Une grande hétérogénéité est cependant observée dans les résultats. Les auteurs indiquent que cette variabilité est peut-être due à la présence de bois juvénile dans les éprouvettes de duramen testées.

Dans cette même étude, la durabilité face aux termites a été évaluée par des essais de laboratoire, conformément aux dispositions prévues dans la norme EN 118 (2005) sur des éprouvettes de duramen provenant de cinq planches issues de deux plantations de La Réunion (Bébour et Bélouve) face à deux espèces de termites : le termite tempéré *Reticulitermes flavipes* et le termite tropical *Coptotermes gestroi* de La Réunion.

Les résultats classent le duramen de cette essence comme « Sensible » aux deux espèces de termites : les dégâts réalisés sur les éprouvettes testées face à *R. flavipes* sont cotés 3 et 4 ; ceux réalisés par *C. gestroi* sont tous cotés 4. De plus, le taux de mortalité des termites en fin d'essai, atteint 100% dans tous les dispositifs, ceci pour les deux espèces de termites utilisées (Annexe A).

A ce sujet, plusieurs études ont démontré que ce bois, à l'état frais, recelait de nombreux composés ayant des propriétés antifongiques et anti-termites (Yatagai *et al.*, 1991 ; Sogabe *et al.* 2000), particulièrement au niveau du duramen (Cheng *et al.*, 2005). Les composés chimiques les plus importants seraient le cubebol, l'épicubebol et le 16-Phyllocladanol, ayant des propriétés anti-termites, mais un séchage industriel du bois détruirait en partie ces composés (Sogabe *et al.* 2000 ; Arihara *et al.* 2004 ; Shibutani *et al.* 2005). La qualité et la quantité des composés chimiques contenus dans le bois seraient d'une grande variabilité selon les souches de *C. japonica*, (Kijidani *et al.* 2011) et cette variabilité alliée à d'autres facteurs du bois comme l'âge de l'arbre fait donc varier sa durabilité naturelle (Cheng *et al.*, 2005).

Pour une utilisation en Europe, le bois de Cryptoméria originaire d'Asie ou de plantations européennes est classé comme « Sensible » face aux attaques de termites, « Non Durable » face aux champignons xylophages (DC 5) et « Durable » face aux attaques de larves d'*Hylotrupes spp.* (Norme EN 350, 2016 ; fiche TROPIX, 2013). Le bois de Cryptoméria issus des forêts de La Réunion est classé « Durable » face aux champignons (DC2v), toujours avec une grande variabilité (v comme variable) (Tableau 1).

Tableau 1. Durabilité de *C. japonica*
Extrait de la norme EN 350 (2016)

N°	Nom scientifique	Code selon l'EN 13556	Nom commun	Origine	Masse volumique / kg/m ³ à 12 % de MC	Durabilité du bois parfait				Imprégnabilité		Lar-gueur de l'au-bier	Autres données/informations, le cas échéant
						Cham-pignons	<i>Hylotrupes</i>	<i>Ano-bium</i>	Ter-mites	Bois parfait	Aubier		
7	<i>Cryptomeria japonica</i> (L.f.) D.Don.	CYJP	X : Sugi E : Sugi F : Cryptomeria D : Sichelanne	Asie de l'Est et cultivé en Europe	280-320-400	5	D	n/d	S	2-3	1	s	Sujet au bleuissement Non résistant aux xylophages marins
				Ile de la Réunion		2v	D	n/d	S	(2-3)v	1	Imprégnabilité et durabilité du bois parfait hautement variables	

1.1.2. Le Pin Sylvestre, *Pinus sylvestris*

Décrit par Linné en 1753, le Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris*) est une espèce d'arbres de la famille des Pinaceae originaire d'Europe moyenne et septentrionale, d'Asie du Nord jusqu'en Sibérie orientale, ainsi que des montagnes du nord du Moyen-Orient. C'est une espèce à grande amplitude écologique et climatique, notamment l'une des plus importantes de la forêt boréale d'Eurasie (Carlisle *et al.*, 1968).

Il s'agit d'un arbre élancé dont la longévité est en général de 150 à 200 ans et dont l'écorce rougeâtre s'écaille avec l'âge. Il peut atteindre 40 mètres de haut mais ne dépasse pas la plupart du temps 25 mètres. Les aiguilles, regroupées par paires, sont de couleur vert bleuté et persistent pendant plusieurs années avant de tomber. Les cônes sont de petite taille, généralement de 3 à 7 cm de long et renferment des graines ailées (Russel *et al.*, 1990).

Le Pin Sylvestre est une espèce forestière importante sur le plan économique, et son bois est largement utilisé dans diverses industries, du fait de sa résistance et de sa polyvalence. Il est utilisé dans la construction de charpentes, de poutres, de planchers, de meubles, de boiseries et dans la production de pâte à papier. La qualité du bois de *Pinus sylvestris* varie en fonction de l'âge de l'arbre et des conditions de croissance, ce qui peut influencer ses propriétés mécaniques et sa densité (Smith et Reynolds (2006).

Durabilité du Pin Sylvestre face aux champignons lignivores et aux termites

L'aubier du Pin Sylvestre est défini comme non durable, comme la plupart des aubiers (Norme EN 350, 2016). Il est utilisé dans les essais européens normalisés comme base pour tester les produits de protection du bois et comme témoin de virulence des champignons et des termites.

Dans le système normatif Européen (EN 350, 2016) (Tableau 2), le duramen de Pin Sylvestre est associé aux classes de durabilité DC3 (Moyennement Durable) et DC4 (Faiblement Durable) face aux champignons, selon des résultats d'essais en laboratoire ou de terrain simulant des situations de contact avec le sol et dans les classes de durabilité DC2 (Durable) à DC5 (Non Durable) selon les résultats des essais en laboratoire. Il est classé « Sensible » face à aux termites. Cette essence est utilisable en classe d'emploi 2, à l'intérieur ou sous abris (Fiche Tropix du CIRAD, 2022 ; EN 350, 2016).

Tableau 2. Durabilité de *P. sylvestris*
Extrait de la norme EN 350 (2016)

Nom scientifique	Code selon l'EN 13556	Nom commun	Origine	Masse volumique / kg/m ³ à 12 % de MC	Durabilité du bois parfait				Imprégnabilité		Largeur de l'aubier	Autres données/informations, le cas échéant
					Champignons	<i>Hylotrupes</i>	<i>Anobium</i>	Termites	Bois parfait	Aubier		
<i>Pinus sylvestris</i> L.	PNSY	E : Scots Pine Redwood F : Pin sylvestre D : Kiefer, Föhre	Europe	500-520-540	3-4 (2-5)	D	D	S	3-4	1	s-m	Cette essence présente une durabilité très variable vis-à-vis des basidiomycètes lorsqu'elle est soumise à essai dans des conditions de laboratoire

1.1.3. Le Red Cedar, *Thuja plicata*

Décrit en 1824 par David Don, le Red Cedar, *Thuja plicata*, est un conifère de la famille des Cupressaceae originaire des forêts de l'ouest américain et canadien. Quelques plantations sont également présentes en Grande Bretagne et en Nouvelle Zélande (Peattie, 1950).

Arbre à feuilles persistantes, il peut atteindre jusqu'à 60 mètres de haut, avec un diamètre de tronc allant jusqu'à trois mètres, voire jusqu'à 6 mètres dans de rares cas. Son feuillage est formé de rameaux aplatis couverts de feuilles en forme d'écailles disposées en paires opposées. Les cônes, d'une longueur de 15 à 20 mm sur 4 à 5 mm de large, sont élancés et formés d'écailles imbriquées. Son bois, de couleur brun clair, tirant vers le rouge, est léger (densité environ 0,35) et tendre. Il est utilisé aussi bien pour la construction que pour l'ébénisterie, du fait de sa stabilité et de sa durabilité (Pokorny, 1995 ; Minore, 1990).

Durabilité naturelle du Red Cedar

Le bois de *T. plicata* est particulièrement résistant aux attaques de champignons xylophages et moindrement face aux attaques de termites (Stirling *et al.*, 2015).

Concernant les champignons xylophages, la durabilité du duramen de spécimens du Canada et du Royaume-Uni a été étudiée en laboratoire face à *Trametes versicolor* et *Poria incrassata* (Cartwright, 1941). Cette étude démontre une bonne durabilité des éprouvettes, et plus particulièrement celles du duramen externe proche de la base de l'arbre. D'autres études ont démontré un gradient positif de durabilité de cette essence face aux champignons xylophages de la moelle vers le duramen externe (Englerth et Scheffer, 1954 ; DeBell *et al.*, 1999). Cependant, ces études mettent en évidence des variations dans la durabilité entre arbres et à l'intérieur d'un même arbre.

Lors d'un essai circulaire réalisé par cinq laboratoires Européens, le bois de Red Cedar a été évalué face à *Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum*, *Poria placenta*, *Coriolus versicolor*, and *Serpula lacrymans* (Van Acker *et al.*, 2003). Les résultats présentent une médiane de perte de masse inférieure à 5% ; ce qui permettrait de placer cette essence dans la classe de durabilité 1 alors que celle-ci est jusque-là placée dans la classe de durabilité 2, comme précisé dans la fiche Tropix du CIRAD (2012). Cependant, la norme EN 350 (2016) (Tableau 3), distingue les arbres issus d'Amérique du Nord, placés dans la classe de durabilité DC2 (Durable) et les arbres issus du Royaume-Uni, placés dans la classe de durabilité DC3 (Moyennement Durable) selon des résultats d'essais en laboratoire ou de terrain simulant des situations de contact avec le sol et dans la classe de durabilité DC1 (Très Durable) selon les résultats des essais en laboratoire destinés à déterminer la durabilité vis-à-vis des champignons Basidiomycètes lignivores (Tableau 3). Il est alors utilisable en classe d'emploi 3, hors contact du sol, à l'extérieur (fiche TROPIX du CIRAD, 2012).

Tableau 3. Durabilité de *T. plicata*
Extrait de la norme EN 350 (2016)

Nom scientifique	Code selon l'EN 13556	Nom commun	Origine	Masse volumique / kg/m ³ à 12 % de MC	Durabilité du bois parfait				Impregnabilité		Largeur de l'aubier	Autres données/informations, le cas échéant
					Champignons	Hylotrupes	Anobium	Termites	Bois parfait	Aubier		
<i>Thuja plicata</i> (D. Don)	THPL	E : Western Red Cedar F : Western Red Cedar D : Riesenlebensbau	Amérique du Nord	330-370-390	2	D	D	S	3-4	3	s	Non résistant aux xylophages marins
			Cultivé au Royaume-Uni		3 (1)							

Concernant les termites, cette essence a également été bien étudiée et présente une grande variabilité. En effet, plusieurs études démontrent la bonne durabilité du duramen face à *Coptotermes formosanus* (Su et Tamashiro, 1986 ; Taylor *et al.*, 2006 ; Ohmura *et al.*, 2011) alors que d'autres travaux mettent en évidence une faible résistance face à cette même espèce de termites (Mannesmann, 1973 ; Morales-Ramos et Rojas, 2001). De la même manière, la durabilité de cette essence est variable face à *Insicitermes minor* (Rust et Reiersen, 1977 ; Indrayami *et al.*, 2007) et face à *Reticulitermes speratus* (Ohmura *et al.*, 2011) ou encore face à *Reticulitermes flavipes* (Carter et Smythe, 1974 ; Morris *et al.*, 2009 ; Kirker *et al.*, 2013).

Dans le système de normalisation Européen, le WRC est réputé comme sensible aux attaques de termites (EN 350, 2016). Cependant, sa durabilité naturelle face aux termites varierait en fonction de la provenance des bois (Barton et MacDonald, 1971 ; Ohtani *et al.*, 1996 ; DeBell *et al.*, 1999) mais aussi selon le type de termites et la méthodologie utilisée pour l'évaluation (Striling *et al.*, 2015).

1.2. EVALUATION DE LA DURABILITE NATURELLE

Dans le système normatif européen, la norme EN 350 (2016), décrit les principes généraux et méthodes de détermination et de classification de la durabilité naturelle du bois et des matériaux dérivés du bois vis-à-vis des agents de dégradation biologique (Fig. 3). La durabilité naturelle vis à vis des agents biologiques est définie comme la résistance inhérente d'une essence de bois ou d'un matériau dérivé du bois vis-à-vis des agents de dégradation du bois : champignons lignivores (Basidiomycètes et champignons de pourriture molle) ; coléoptères capables d'attaquer le bois sec ; termites et térébrants marins capables d'attaquer le bois en service. Cette résistance inhérente est due à la présence de composants naturels (métabolites secondaires) qui peuvent présenter différents niveaux de toxicité contre les organismes biologiques, et/ou à des particularités anatomiques (Taylor *et al.*, 2002).

Ainsi, la durabilité naturelle d'une essence de bois est définie, dans le système normatif européen, suite à des essais de laboratoire normalisés face aux différents agents de dégradation, afin de déterminer, pour chacun d'entre eux, une classe de durabilité. Il est à noter que l'aubier de toutes les essences est réputé non durable vis-à-vis des champignons, des termites et des térébrants marins.

Ainsi, concernant les champignons Basidiomycètes, la classe de durabilité (DC1 à DC5) est déterminée selon la médiane du pourcentage de perte de masse des éprouvettes, en prenant en compte les résultats du champignon qui commet les plus gros dégâts (Fig. 3 – Tableau A). Ceci selon les spécifications techniques de la norme XP X CEN/TS 15083-1 (2006).

Pour plus de précision, notamment en ce qui concerne les essences présentant une certaine variabilité dans les résultats de perte de masse, la norme EN 350 (2016) invite à répartir les valeurs individuelles de perte de masse des éprouvettes dans les différentes classes de durabilité. Si les valeurs individuelles de perte de masse sont réparties sur deux classes de durabilité (x et y) comprenant chacune au moins 40 % des valeurs, il convient de ne pas exprimer la classe de durabilité retenue d'après la perte de masse médiane, mais comme un ensemble de valeurs comprises dans l'intervalle « x – y ». Il convient de mentionner clairement cette forte variabilité dans le rapport d'essai, par exemple sous la forme « v ».

Concernant les termites souterrains, les dégâts sont évalués selon une grille de cotations visuelle des dégâts donnant des notes de 0 (aucun dégât) à 4 (attaque forte). La classe de durabilité naturelle est ensuite déterminée selon ces notes (Fig. 3 - Tableau B).

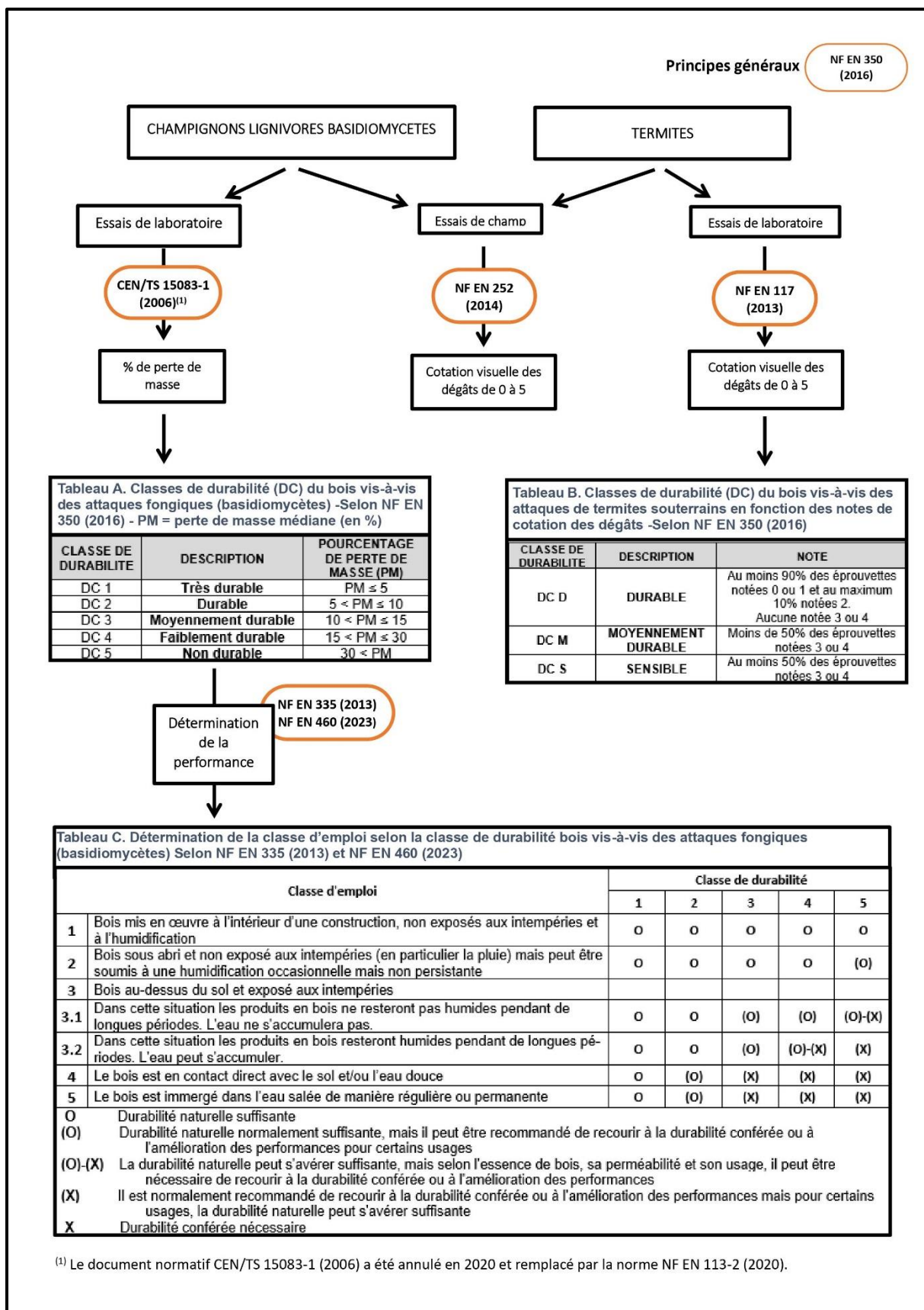


Figure 3. Détermination de la durabilité naturelle et de la performance du bois vis-à-vis des champignons lignivores Basidiomycètes et des termites dans le système normatif européen

Performance du bois massif

La durabilité d'un ouvrage en bois est fonction des caractéristiques intrinsèques de l'essence mais aussi de la conception et de la situation de l'ouvrage (facteurs climatiques, exposition...). Aussi, les essences de bois sont classées selon leur situation en service. La norme EN 335 (2013) définit cinq classes d'emploi (Fig. 3 - Tableau C) qui correspondent aux différentes situations en service auxquelles peuvent être exposés le bois et les matériaux à base de bois, ainsi que les agents biologiques susceptibles d'attaquer le bois dans ces situations.

Les résultats des essais de laboratoire face aux champignons Basidiomycètes permettent de définir la performance d'une essence de bois selon les classes d'emploi dans lesquelles celle-ci peut être mise en œuvre selon les dispositions prévues dans la norme EN 460 (2023) (Fig. 3 – Tableau C). Il est important de noter ici que la norme précise que cette classification est faite pour une mise en œuvre des bois en Europe centrale et que cette information est utile, mais a ses limites car le lien avec les performances et la durée de service est subjectif et non quantifié. Concernant la performance des bois pour une utilisation à La Réunion, il est d'usage sur le territoire d'utiliser des bois de classe 4 pour une utilisation en classe d'emploi 3. Sans que cela ne soit documenté de manière consistante (ni par des essais de laboratoire ou des essais terrain, ni par une collecte de données de bois mis en services ni même par des expertises), il est stipulé dans la norme NF B50-105-3 (2014) que les bois en service dans les territoires ultramarins devront être considéré dans une classe d'emploi « N+1 » par rapport à leur classe d'emploi effective « N ».

De plus, le fascicule de documentation FD P20-651 (2011), donne des indications sur la performance des principales essences de bois utilisées en France, dont le Pin Sylvestre et le Red Cedar, en précisant leur longévité dans les différentes classes d'emploi (Tableau 4).

Tableau 4. Performances du Pin Sylvestre et du Red Cedar selon FD P20-651 (2011)

DURAMEN	Durabilité fongique et classes d'emploi					Résistance aux Insectes à Larves Xylophages	Résistance aux termites
	1	2	3.1	3.2	4		
NOM							
<i>P. sylvestris</i>	L3	L3	L1	L1	N	Oui	Non
<i>T. plicata</i>	L3	L3	L2	L1	N	Oui	Non

Légende
L3 : Longévité supérieure à 100 ans
L2 : Longévité comprise environ entre 50 ans et 100 ans dans l'utilisation initialement prévue
L1 : Longévité comprise environ entre 10 ans et 50 ans dans l'utilisation initialement prévue
N : Longévité incertaine et dans tous les cas inférieure à 10 ans, ces solutions ne sont pas à prescrire

En complément, afin de mieux cerner la performance d'une essence, il est possible de réaliser des essais de champ selon la méthode décrite dans la norme EN 252 (2014), dont le but principal est d'évaluer l'efficacité d'un produit de préservation par rapport à un produit de référence. Cette méthode correspond à une mise en situation

d'éprouvettes de bois en classe d'emploi 4 (piquets plantés dans le sol). Cependant un essai dure au moins 5 ans et la norme EN 350 (2016) recommande de répéter cet essai sur différents sites géographiques tout en précisant que les conditions du terrain peuvent varier selon les différents sites d'essai et que la comparaison des résultats peut, par conséquent, s'avérer difficile.

Enfin, le système normatif européen prévoit des épreuves de vieillissement accéléré des éprouvettes de bois qui sont ultérieurement soumises à des essais biologiques par évaporation (EN 73, 2020) et par délavage (EN 84, 2020). Les méthodes décrites sont destinées principalement à mesurer la performance des produits de traitements mais il est précisé dans celles-ci qu'elles peuvent aussi être utilisées pour le préconditionnement du bois non traité.

Cependant, comme vu ci-avant, les essais de champ et les épreuves de vieillissement accélérées ne sont pas utilisés pour déterminer la classe de durabilité d'une essence et pour déterminer les classes d'emploi dans laquelle cette essence peut être utilisée sans traitement.

1.3. LES AGENTS BIOLOGIQUES

Dans nos travaux, la durabilité du *C. japonica* est évaluée face à deux espèces de champignons lignivores Basidiomycètes ubiquistes : *Poria placenta* et *Coniophora puteana* (le premier est obligatoire dans le cadre d'essais sur des bois résineux et le second obligatoire dans tous les cas, selon XP CEN/TS 15083-1 (2016)) et deux espèces de termites : *Coptotermes gestroi*, présent à La Réunion et *Reticulitermes flavipes*, présent en Europe continentale.

1.3.1. Champignons lignivores

1.3.1.1. *Poria placenta*

Poria placenta est un champignon Basidiomycète appartenant à la famille des Polyporaceae, décrit pour la première fois par le mycologue Boudier en 1885 (Boudier, 1885).

Il s'agit d'une espèce ubiquiste largement répandue dans les écosystèmes forestiers du monde entier. Son rôle écologique majeur réside dans sa capacité à dégrader la lignocellulose présente dans le bois mort ou affaibli, contribuant ainsi à la recirculation des éléments nutritifs et à la transformation de la matière organique dans les écosystèmes forestiers. D'un point de vue morphologique, *Poria placenta* se caractérise par une structure en forme de plaque ou de croûte de couleur brunâtre à beige. Son mycélium se compose de filaments ramifiés appelés hyphes, qui colonisent le bois et lui confèrent sa capacité de décomposition. Ces hyphes sécrètent des

enzymes lignocellulosiques, telles que les cellulases et les peroxydases, qui dégradent la cellulose et la lignine, principales composantes du bois (Blanchette, 1984).

La dégradation du bois par *Poria placenta* est un processus complexe impliquant plusieurs étapes biochimiques. Les cellulases, notamment les endoglucanases, les exoglucanases et les β -glucosidases, agissent en synergie pour décomposer la cellulose en molécules de glucose. Les peroxydases, telles que les peroxydases de lignine et les lacases, jouent un rôle essentiel dans la dépolymérisation de la lignine en produits plus simples. Ces enzymes sont régulées au niveau transcriptionnel et leur expression est influencée par les conditions environnementales et la composition du substrat (Schwarze, 2000 ; Heilmann-Clausen, 2018).

1.3.1.2. Coniophora puteana

Coniophora puteana, est un champignon Basidiomycète de la famille des Coniophoraceae décrit par le mycologue Fries en 1849 (Fries, 1849).

Ce champignon est répandu dans les régions tempérées et subtropicales du monde entier (Blanchette, 1995).

Sur le plan morphologique, *Coniophora puteana* se caractérise par des structures en forme de croûte ou de plaque sur le bois, généralement de couleur brunâtre à noire. Cette espèce est principalement un saprophyte, ce qui signifie qu'il se nourrit de matière organique morte, en particulier le bois en décomposition. Il est capable de dégrader les composants du bois, tels que la cellulose, la lignine et les hémicelluloses, en utilisant un arsenal d'enzymes, notamment des cellulases et des peroxydases ligninolytiques. Ces enzymes sont essentielles pour décomposer la structure complexe du bois en molécules plus simples, facilitant ainsi l'absorption des nutriments par le champignon (Blanchette, 1995 ; Martínez *et al.*, 2009).

1.3.3. Les Termites

1.3.3.1. Les termites de La Réunion

Sur l'île de La Réunion, on dénombre onze espèces de termites (Bordereau & Peppuy 1996 et 1997 ; Tableau 5). Parmi celles-ci, le termite souterrain *Coptotermes gestroi* est le plus virulent (Peppuy, 2002) ; ses dégâts constituant un frein réel au développement économique de l'île (Bordereau & Peppuy 1996).

Tableau 5. Les 11 espèces de termites présentes à la Réunion

Espèce	Famille
<i>Procryptotermes falcifer</i>	Kalotermitidae
<i>Cryptotermes brevis</i>	
<i>Cryptotermes havilandi</i>	
<i>Cryptotermes pallidus</i>	
<i>Cryptotermes dudleyi</i>	
<i>Postelectrotermes howa</i>	
<i>Neotermes reunionensis</i>	
<i>Prorhinotermes canalifrons</i>	Rhinotermitidae
<i>Coptotermes gestroi</i>	Termitidae
<i>Microcerotermes subtilis</i>	

Ainsi, de par son importance économique à La Réunion, le termite utilisé dans cette étude est *Coptotermes gestroi* (Fig. 4). Appartenant à la famille des Rhinotermitidae, il est originaire d'Indo-Malaisie et a été décrit pour la première fois par Wasmann en 1896. Sa distribution originelle va de l'état d'Assam (Est de l'Inde) en passant par le Myanmar, la Thaïlande la Malaisie ainsi que l'archipel Indonésien (Kirton et Brown, 2000).

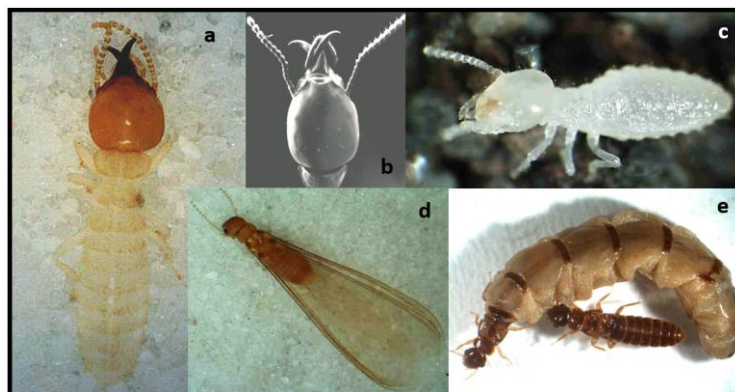


Figure 4. *Coptotermes gestroi* : Soldat (a et b), Ouvrier (c), Essaimant (d) et Couple Royal (e)

Cet insecte, comme tous ceux de sa famille, est un termite souterrain qui construit de volumineux nids (calies) avec de multiples galeries lui permettant de se déplacer à l'abri de la lumière et des courants d'air. Les colonies comptent jusqu'à 4 millions d'individus sur un territoire n'excédant pas quelques centaines de mètres carrés (Peppuy, 2002).

Les soldats de *Coptotermes gestroi* se reconnaissent facilement à leur couleur blanc-laitieuse. Couleur due au contenu d'une volumineuse glande défensive occupant une majeure partie du corps de l'insecte. Cette sécrétion, émise par un pore frontal nommé

fontanelle (Fig. 4b), est gluante et toxique pour les autres insectes comme les fourmis (Bordereau et Peppuy, 1997).

C. gestroi est capable de s'attaquer à toutes les essences de bois de La Réunion, même le Grand natte (*Mimusops maxima*) ou le bois de fer (*Sideroxylon borbonica*) considérés comme des bois très résistants Il est également capable de traverser de nombreuses matières pour trouver son alimentation comme le plastique ou le plâtre. (Bordereau et Peppuy, 1996).

1.3.3.2. Les termites de France continentale et de Corse

En France continentale et en Corse, on trouve six espèces de termites (et une sous-espèce supplémentaire) appartenant aux genres *Reticulitermes* ou *Kaloterms* (Clément *et al.*, 2001 ; Kutnik et Bagnère, 2005) (Tableau 6).

Tableau 6. Les termites présents en France continentale et en Corse

Espèce	Localisation en France
<i>Reticulitermes flavipes</i> ex. <i>santonensis</i>	Ouest de la France jusqu'à Paris
<i>Reticulitermes grassei</i>	Sud-Ouest
<i>Reticulitermes banyulensis</i>	Ouest du pourtour méditerranéen
<i>Reticulitermes lucifugus</i>	Moitié est du littoral méditerranéen
<i>Reticulitermes lucifugus corsicus</i>	Corse
<i>Reticulitermes urbis</i>	Sud-Est
<i>Kaloterms flavicollis</i>	Sud de la France, Corse

De par son importance économique et sa large répartition en France continentale, le termite *Reticulitermes flavipes* est utilisé dans nos travaux. En effet, *Reticulitermes flavipes* ex. *santonensis*, le termite de Saintonge ou termite à pattes jaunes, est l'espèce du genre *Reticulitermes* la plus répandue sur terre (Su *et al.*, 2006).

Il s'agit d'une espèce originaire de Louisiane (Perdereau *et al.*, 2013) et qui est invasive au Canada (Grace, 1996), en Californie, en Uruguay et aux Bahamas (Su *et al.*, 2006), en France (Perdereau *et al.*, 2010), au Chili (Ripa et Castro, 2000), en Allemagne (Harris, 1962), en Italie (Ghesini *et al.*, 2010) et en Autriche où elle a été décrite pour la première fois par Kollar (1837).

1.4. LA SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE (SPIR)

La spectroscopie proche infrarouge (SPIR) est une technique d'analyse non destructive et rapide, applicable à tout matériel biologique, permettant d'en mesurer la composition chimique et les propriétés physiques, ceci en exigeant peu de préparation des échantillons (Pasquini, 2003).

Dans leurs publications, Bokobza (1998), Næs *et al.* (2002) et Pasquini (2003) ont réalisé une revue des principes de fonctionnement de la SPIR et de ses applications. Ainsi, le principe de la SPIR repose sur l'utilisation du spectre électromagnétique proche infrarouge, qui couvre une plage de longueurs d'onde allant de 800 nm à 2500 nm (Fig. 5). Cette région du spectre est caractérisée par des vibrations moléculaires associées à la présence de liaisons hydrogène, de groupes fonctionnels et d'autres caractéristiques chimiques spécifiques dans les molécules.

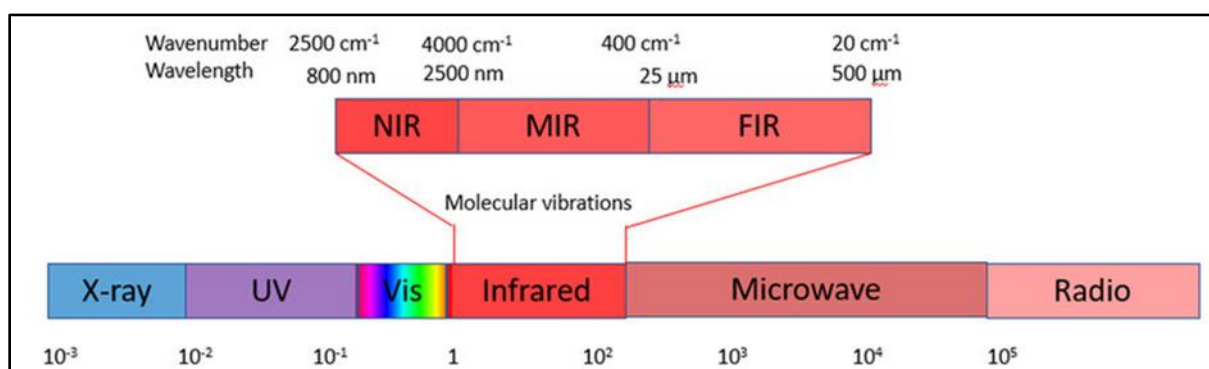


Figure 5. Les différents domaines du spectre électromagnétique

Lorsqu'une lumière proche infrarouge est dirigée vers un échantillon, certaines longueurs d'onde sont absorbées par les molécules présentes dans le matériau. Le spectromètre détecte ensuite les longueurs d'onde transmises ou réfléchies, et à partir de ces données, il est possible de déterminer la composition chimique et les propriétés physiques de l'échantillon (Pasquini, 2003).

Dans la filière du bois, les premières utilisations de la SPIR remontent à la fin des années 80, dans le domaine de l'industrie des pâtes à papiers (Birkett et Gambino (1989), Easty *et al.* (1990), Wright *et al.* (1990) and Wallbäcks *et al.* (1991)). Ces travaux ont permis la mise en place de dispositifs dans les lignes de production industrielles afin de mesurer la teneur en eau de la pulpe dans les usines de fabrication de papier.

Depuis, l'utilisation de la SPIR a été très largement étudiée pour prédire les propriétés chimiques et mécaniques du bois ; le nombre de publication sur le sujet ayant connu une forte augmentation depuis 1990 (Tsuchikawa et Kobori, 2015). Comme souligné par Meder *et al.* (2011), les travaux de recherche sur le sujet ont permis de valider l'emploi de la spectroscopie proche infra-rouge comme un outil fiable pour fournir des

modèles de prédiction sur de nombreuses caractéristiques physiques, mécaniques et anatomiques du bois, résineux comme feuillus.

1.4.1. Densité / Masse volumique du bois

La première étude portant sur l'utilisation de la SPIR pour prédire la masse volumique du bois massif a été réalisée par Thygesen en 1994. Dans cette étude, celle-ci a utilisé des copeaux et des éprouvettes de bois massif d'épicéa de Norvège (*Picea abies*) pour démontrer que la technique pouvait être utilisée pour estimer la masse volumique du bois (valeurs de RMSEP comprises entre 15 and 26 kg.m⁻³ pour des valeurs de densité mesurée entre 313 et 495 kg.m⁻³ (erreur relative : 3 à 8 %).

Plusieurs études ont par la suite été réalisées afin de démontrer l'utilisation de la SPIR pour prédire la densité de différentes essences de bois, dont celle réalisée par Hoffmeyer et Pedersen (1995) sur des échantillons de bois massif d'épicéa de Norvège. Ils concluent que la SPIR peut être utilisée pour prédire la densité du bois ainsi que la résistance à la compression et à la flexion.

En 2011, Schimleck *et al.* réalisent une étude sur des éprouvettes d'*Eucalyptus globulus* ayant une masse volumique (mesurée de manière traditionnelle) comprise entre 378 à 656 kg.m⁻³. Les résultats démontrent la fiabilité de la SPIR, avec une RMSEP d'environ ±30 kg.m⁻³.

Santos *et al.* (2012) ont également déterminé l'efficacité de la SPIR à prédire la densité du bois australien *Acacia melanoxylon*. Les auteurs concluent qu'au moins 45 échantillons pour l'étalonnage et 16 autres échantillons pour la validation sont nécessaires pour obtenir des modèles acceptables.

Concernant le *Cryptomeria japonica*, Watanabe *et al.* ont publié une étude en 2012 sur la prédiction de la densité d'éprouvettes séchées industriellement. Ils démontrent ainsi que la masse volumique prédite est corrélée avec celle mesurée ($R^2= 0,81$ et $SEP=15,3$ kg.m⁻³) pour des densité mesurées comprises entre 279,2 et 436,4 kg.m⁻³, indiquant que le modèle développé était applicable pour prédire la masse volumique de cette essence.

La masse volumique de cette essence a été étudiée par Fujimoto *et al.* en 2015. Les résultats démontrent ici aussi la bonne capacité de la SPIR à prédire la masse volumique de cette essence ($R^2= 0,84$ et $SEP=28.0$ kg.m⁻³).

1.4.2. Teneur en eau

Le bois est un matériau hygroscopique. L'eau pénètre dans le bois de trois manières différentes : capillairement, sous forme liquide, dans les cavités cellulaires ; sous forme de vapeur à travers les cavités cellulaires et par diffusion moléculaire à travers la paroi

cellulaire. La teneur en eau d'un échantillon de bois dépend de l'humidité relative et de la température de l'air (Glass et Zelinka, 2010).

La variation de l'humidité relative de l'air exerce une influence importante sur les propriétés et la performance du bois, affectant la résistance, le séchage, le traitement, le durcissement de la colle et la performance de collage (Adedipe et Dawson-Andoh, 2008). De plus, la teneur en eau du bois exerce une influence sur sa durabilité naturelle face aux champignons lignivores (Brischke et Rapp, 2008 ; Brischke, et Alfredsen, 2020).

Comme l'ont souligné Leblon *et al.* dans leur étude publiée en 2013, l'industrie du bois s'intéresse particulièrement aux méthodes susceptibles de mesurer la teneur en eau du bois de manière fiable et non destructrice à différentes étapes du processus de transformation industrielle.

Ainsi, de nombreux travaux ont démontré l'efficacité de la spectroscopie proche infra-rouge à prédire la teneur en eau des échantillons de bois.

En 1995, Hoffmeyer et Pedersen ont démontré son efficacité sur des éprouvettes de *Picea abies* de Norvège ayant une teneur en eau inférieure à 30 % ($R^2 = 0,99$ et SEP < 0,50 %).

Cooper *et al.* (2011) ont développé des modèles pour estimer la teneur en eau du Pin (*Pinus sp.*), du Red Cedar (*Thuja plicata*) et du Sapin du Pacifique (*Abies amabilis*). Ils concluent, pour le Pin et le Red Cedar séchés à l'air libre, que la précision de la prédiction est plus grande pour des échantillons ayant une teneur en eau inférieure à 30% (SEP de 2 à 5%) que pour les éprouvettes contenant plus de 30% d'eau (SEP entre 10 et 30%). Concernant le Sapin du Pacifique, séché industriellement, la teneur en eau peut être prédite avec un écart de seulement 2 à 3 % par rapport aux valeurs mesurées dans la fourchette de 0 % à 30 % d'humidité.

Concernant le bois de Cryptoméria, dans l'étude citée précédemment, Fujimoto *et al.* (2015) évaluent l'efficacité de la SPIR pour prédire la teneur en eau avec des résultats plutôt satisfaisants ($R^2 = 0,82$ et SEP=12.4%).

1.4.3. Classification - Distinction des essences de bois

La spectroscopie proche infra-rouge est également étudiée afin de distinguer les essences de bois, notamment dans le cadre d'essences très proches d'un point de vue anatomique.

Dans leurs travaux, Tsuchikawa *et al.* (2003b) réalisent une analyse discriminante de 8 essences de bois massif (dont le *Cryptomeria japonica*), 2 essences traitées par imprégnation et 12 matériaux fabriqués à partir de bois (panneaux en lamellé-collé, panneaux de particules et panneaux de fibres). Le modèle élaboré présente un taux élevé de réponses correctes de validation (> 98%).

Dans leurs travaux publiés en 2021, Peng *et al.* définissent un modèle de prédiction afin de distinguer 50 essences de bois. Les résultats indiquent que la précision de reconnaissance globale atteint 94,76% pour les 50 essences de bois, ce qui est supérieur à celui des algorithmes de classification conventionnels et des systèmes de classification des essences de bois récents. Cette méthode permet donc d'obtenir rapidement de bons résultats de reconnaissance, y compris avec un faible nombre d'échantillons.

La SPIR a également été utilisée pour distinguer le duramen et l'aubier du Pin Sylvestre (Flæte et Haartveit, 2003) avec une précision de 83% ou encore pour distinguer le bois traité du bois non traité, prédire le type et la concentration des produits de préservation (So *et al.*, 2004). Ces études mettent en évidence l'intérêt de cette technique dans le cadre d'expertises et dans le contrôle qualité des traitements.

Enfin, selon Mancini *et al.* (2023), la spectroscopie proche infrarouge peut être utilisée dans les centres de tri des déchets afin de distinguer les différentes essences de bois et différents types de matériaux à base de bois en vue de mieux les valoriser (réutilisation, production énergétique, etc).

1.4.4. Durabilité face aux termites et champignons lignivores

Comme vu plus dans le paragraphe 1.2., la détermination de la durabilité naturelle ou conférée du bois massif est réalisée, en laboratoire ou en essais de champs, en soumettant des éprouvettes de bois aux agents de dégradation. Ces essais sont longs et donc coûteux, et ces spécifications ne sont pas adaptées dans le cas d'essences de bois présentant une grande variabilité de durabilité naturelle au niveau inter ou intra arbre (Amusant *et al.*, 2017).

Dans leurs travaux, Amusant *et al.* comparent différentes méthodes de prédiction de la durabilité naturelle du bois face aux agents de dégradation (colorimétrie, spectroscopie UV-visible, chromatographie et spectroscopie proche infrarouge, résonance magnétique nucléaire). Ils en déduisent que la spectroscopie proche infrarouge est l'outil le plus pertinent du fait de sa fiabilité et de sa simplicité pour prédire la durabilité du bois massif, tout en précisant l'importance d'un large échantillonnage.

Ainsi, Flæte et Haartveit (2004), ont montré que la durabilité du duramen interne, du duramen externe et de l'aubier de Pin Sylvestre face à *Poria placenta* peut être prédite avec une précision satisfaisante à l'aide de la SPIR. La fourchette des valeurs mesurées pour les pertes de masse étant de 6,6 % à 44,0 %, celle du R^2 variant de 0,71 à 0,95 et la RMSEP de 4,1 à 6,3.

Sykacek *et al.* (2006) ont obtenu de bons résultats (R^2 compris entre 0.70 et 0.95) dans la prédiction de la durabilité du mélèze (*Larix spp.*) face à *Coniophora puteana*

et *Poria placenta*. Ceux-ci indiquent que la technique peut être très utile, en tous cas pour certains conifères.

Chaix *et al.* (2008) ont également montré qu'il était possible de prédire la durabilité naturelle de *Tectonas grandis* (52 arbres échantillonnés) face à *Coniophora puteana*. Dans plus de 70 % des cas, les classes de durabilité basées sur les essais de laboratoire correspondaient aux classes de durabilité dérivées par prédiction ($R^2=0,76$).

Cependant, certaines études ont démontré que la SPIR n'était pas un outil efficace pour prédire la durabilité du bois face aux dégradations de champignons. Bush *et al.*, (2011) ont observé sur des jeunes *Eucalyptus cladocalyx*, une faible corrélation des spectres avec les données issus d'essais de laboratoire (R^2 compris entre 0,07 et 0,32) pour trois champignons (*Gloeophyllum abietinum*, *Fomitopsis lilacino-gilva* et *Perenniporia tephropora*).

Dans le même ordre d'idée, Stirling *et al.* (2015) ont utilisé la spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge pour prédire rapidement un large éventail de propriétés du bois, y compris le contenu extractif et la résistance aux attaques de champignons (*C. puteana*) du Red Cedar (*Thuja plicata*). Les modèles développés de prédiction étaient médiocres ($R^2 = 0,17$) alors que les résultats étaient plus intéressants, mais toujours insuffisant, avec les termites *Coptotermes formosanus* ($R^2 = 0,51$).

Ainsi, La force de la spectroscopie réside dans sa rapidité d'analyse et sa non-destructivité. En quelques secondes, il est possible d'obtenir des informations détaillées sur la composition et les propriétés d'un matériau sans altérer l'échantillon. Cela en fait un outil précieux pour l'analyse en ligne et en temps réel dans diverses applications industrielles (Leblon *et al.* 2013 ; Amusant *et al.*, 2017).

Toutefois, la spectroscopie présente également certaines limitations. La profondeur de pénétration de la lumière proche infrarouge dans un matériau est limitée, ce qui signifie que seules les propriétés des couches superficielles peuvent être analysées (Hoffmeyer et Pedersen, 1995). De plus, la qualité des prédictions dépend étroitement de la calibration des modèles, qui nécessite des échantillons de référence bien caractérisés (Thygesen, 1994).

Enfin, certaines caractéristiques, telle que la teneur en eau ou la différenciation des espèces, peut être influencée par les effets d'autres variables telles que les différences localisées de rugosité de surface et de densité (Cooper *et al.*, 2011). Les auteurs recommandent donc d'utiliser une instrumentation munie d'une sonde relativement large (grande surface d'illumination) pour que les lectures correspondent à une moyenne de ces autres variables dans l'échantillon.

2. CONTEXTE ET OBJECTIFS

L'état des connaissances actuelles sur le Cryptoméria met en avant la nécessité de mieux étudier la durabilité naturelle du bois massif de cette essence produit à La Réunion. Ceci afin de mieux valoriser cette ressource et augmenter son utilisation dans la construction et dans la rénovation de bâtiments.

Ainsi, dans nos travaux, la durabilité naturelle de cette essence est déterminée face à deux espèces de champignons Basidiomycètes (*Poria placenta* et *Coniophora puteana*) et deux espèces de termites souterrains (*Coptotermes gestroi* et *Reticulitermes flavipes*), en réalisant un échantillonnage très large (§ 3.1.1.3). Des planches provenant de 4 arbres différents sont utilisées. Dans chaque arbre, des éprouvettes sont prélevées dans l'aubier, dans le duramen interne et le duramen externe en prenant soin de bien distinguer ces différentes zones.

En complément, la durabilité naturelle est évaluée sur des éprouvettes délavées en laboratoire (selon EN 84, 1997) et des éprouvettes prélevées dans des planches de duramen naturellement exposées pendant 7 ans comme bardage en classe d'emploi 3.2, afin de mieux cerner la durabilité résiduelle de cette essence et déterminer sa performance en situation d'emploi réelle.

Les essais biologiques sont réalisés selon les dispositions prévues dans le système normatif européen et français. L'application de ces normes sur une essence dont la durabilité est variable permet de proposer une évolution des dispositions prévues dans ces documents et plus particulièrement dans l'interprétation des résultats des essais face aux champignons Basidiomycètes et aux termites et leur lien avec la performance de cette essence et son utilisabilité dans les différentes classe d'emploi à La Réunion.

Des planches de duramen de Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris*) et de Red Cedar (*Thuja plicata*), achetées dans le commerce, sont utilisées afin de réaliser une analyse comparative des résultats. En effet, le Pin Sylvestre est classé « Non Durable » vis-à-vis des champignons Basidiomycètes et « Sensible » vis-à-vis des termites ; le Red Cedar est classé « Durable » vis-à-vis des champignons Basidiomycètes et plus ou moins durable vis-à-vis des termites, en fonction de l'espèce utilisée.

L'utilisation de la spectroscopie proche infra-rouge (SPIR), couplée à des analyses de chimométrie permet d'évaluer la pertinence de ces outils dans le cadre de la prédiction des caractéristiques du bois. Aussi, la SPIR est utilisée dans nos travaux, pour évaluer les effets du délavage, pour distinguer les essences de bois, déterminer la densité et la teneur en eau des éprouvettes, ainsi que dans la prédiction de la durabilité naturelle des trois essences de bois en étude face aux champignons Basidiomycètes.

Ainsi, les résultats des travaux réalisés dans cette thèse ont pour objectif d'optimiser l'utilisation du Cryptoméria dans la construction à La Réunion, d'adapter les dispositions normatives à une essence variable et au contexte tropical réunionnais et

de proposer des outils de prédiction, utilisables dans le cadre du contrôle qualité et de la sélection des planches en sortie de scierie ou lors de l'achat de bois par les négoce et dans le cadre d'expertises et de diagnostics ; d'autant que l'utilisation de la SPIR ne nécessite pas la destruction des bois analysés.

3. MATERIEL ET METHODES

3.1. MATERIEL BIOLOGIQUE

3.1.1. Essences de bois et échantillonnage

Dans cette étude, trois essences de bois sont utilisées : le cèdre du Japon (*Cryptomeria japonica* (D. Don)), le cèdre rouge appelé aussi (Western) Red Cedar (*Thuja plicata* (D. Don)) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*, L).

La durabilité naturelle des trois essences de bois face aux termites et champignons Basidiomycètes a été déterminée conformément aux prescriptions de la norme EN 350 (2016). La figure 6 présente un schéma global de la démarche expérimentale de nos travaux. La provenance et les modalités d'échantillonnage des éprouvettes d'essai, toutes de dimensions 50x25x15mm³ (L,R,T) sont décrites ci-après.

3.1.1.1. *Cryptomeria japonica*

Le bois de Cryptoméria utilisé dans cette étude a été cédé par la scierie Sciage de Bourbon (La Réunion). Le bois provient de 4 arbres tous âgés de 30 à 35 ans, d'un diamètre similaire (45-50 cm) et considérés comme prêts à l'exploitation. Trois (3) arbres proviennent de la forêt de Bélouve (C1 à C3), un (1) arbre provient de la forêt de Bébour (C4) (Fig. 2).

L'écorçage et les sciages des grumes ont été faits à la Scierie de Bourbon et 5 planches de faux quartier par arbre ont été utilisées pour nos expérimentations.

Le Cryptoméria n'a subi aucun traitement temporaire en forêt et les planches ont été séchées à l'air libre (moins de 60°C).

Chez le cryptoméria, l'aubier est bien distinct du duramen, toutefois, afin d'éviter toute zone de transition, on expurge 3 cm (coté écorce) et 3 cm dans la zone de transition aubier/duramen.

Dans le duramen, la partie centrale correspondant à la moëlle et au bois juvénile (3 cm) a été expurgée. Le plateau de duramen a alors été séparé en deux afin de délimiter le duramen interne et externe

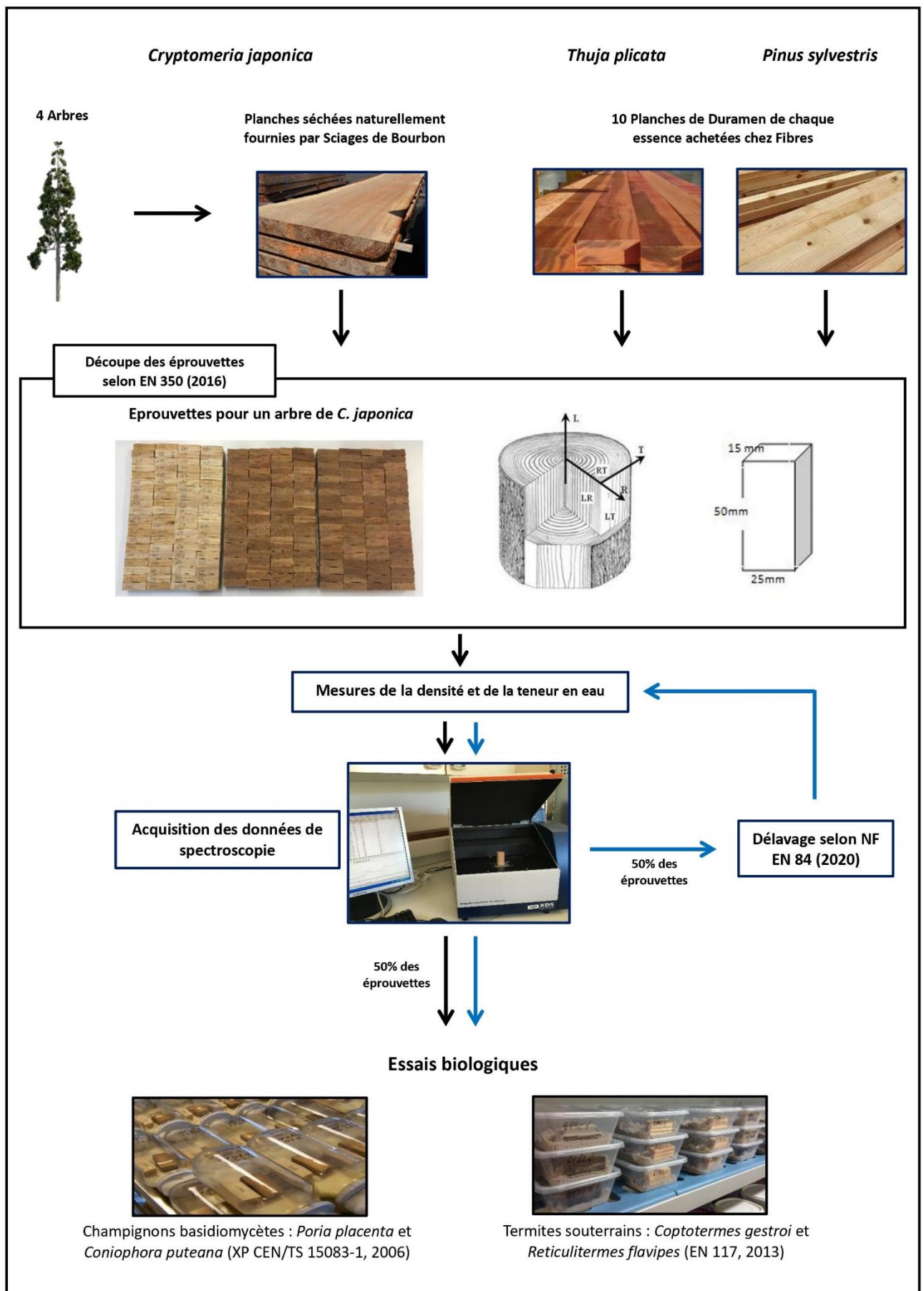


Figure 6. Schéma global de la démarche expérimentale

En complément d'échantillonnage, des planches de bardage provenant d'un local de stockage de matériel de la scierie Sciages de Bourbon à Saint Benoît ont été récupérées (Fig. 2). Le bardage était à clins ouverts vertical, épaisseur 30 mm, avec un espace d'environ 1 cm entre chaque clin, sans protection physique (pas d'avant toit) ni finition. Ce bardage a été en service pendant 7 ans, avec une exposition Est, en classe d'emploi 3.2 (EN 335, 2013).

Ce bardage ne présentait aucun signe de dégradation biologique, hormis un vieillissement naturel normal de ce type d'ouvrage en cette situation géographique. A l'occasion de sa dépose, 5 planches ont été récupérées. Ces planches ne contiennent que du duramen. Les faces exposées de ces planches ont été rabotées avant d'être débitées en éprouvettes d'essai.

Les différentes planches ont été stabilisées en conditions ambiantes dans les laboratoires de l'ORLAT pendant 4 mois.

Après stabilisation, les éprouvettes d'essai (50x25x15mm³, L,R,T) ont été découpées à l'ORLAT, numérotées et mises à stabiliser dans les conditions ambiantes du laboratoire.

3.1.1.2. Thuya plicata et Pinus sylvestris

Les éprouvettes de Red Cedar (Duramen) et de Pin sylvestre (Duramen) ont été prélevées dans des planches achetées auprès de l'entreprise Fibres (Le Port, 97420). Pour ces deux essences, l'aubier est distinct du duramen, et seul le duramen était présent dans les planches.

Il s'agit de planches non séchées au-delà de 60°C et non traitées. Pour chaque essence, les éprouvettes ont été découpées dans 10 planches prélevées au hasard chez le revendeur.

La découpe s'est faite à l'ORLAT après un stockage des planches pendant 4 mois en conditions ambiantes. Après stabilisation, les éprouvettes d'essai (50x25x15mm³, L,R,T) ont été découpées, numérotées et mises à stabiliser dans les conditions ambiantes du laboratoire.

Les éprouvettes d'aubier de Pin sylvestre proviennent de lots de bois du CIRAD. Ces éprouvettes sont issus d'arbres provenant de Lozère et sont prélevés dans un lot de 500 éprouvettes d'essai (50x25x15mm³, L,R,T) destinées à la réalisation d'essais normalisés (EN 350, 2016). Ces éprouvettes d'essais servent de témoins dans les différents essais biologiques et répondent à des critères spécifiques :

- Le bois n'a pas été traité, ni séché à une température supérieure à 60°C, ni flotté,
- Le bois est exempt de fentes, taches, pourriture, dégât d'insectes ou autre défaut visible (nœud notamment),

- Le taux de résine est faible, les accroissements annuels compris entre 2.5 et 8 cernes par 10 mm (radial) et le taux de bois final ne dépasse pas 30% de l'ensemble de l'éprouvette.

3.1.1.3. Echantillonnage et répartition des éprouvettes

Les différents essais menés dans ce travail ont été réalisés sur :

- un très large échantillonnage d'aubier, duramen externe et duramen interne de Cryptoméria, afin d'évaluer finement la durabilité (par le biais d'essais de laboratoire) de cette essence et la variabilité associée,
- du Cryptoméria déjà mis en œuvre pendant 7 ans et dont on évaluera la durabilité naturelle résiduelle (performance),
- du duramen de Red Cedar et de Pin sylvestre afin d'encadrer et de comparer les résultats obtenus sur le Cryptoméria (benchmarking) (Van Acker et al., 1999). L'aubier de Red Cedar n'est pas évalué car, comme la plupart des aubiers, il n'est pas durable (Zabel et Morrell, 2020).
- de l'aubier de Pin sylvestre utilisé comme témoin (témoin de virulence) dans les différents essais biologiques.

Le tableau 7 présente le nombre et la répartition des éprouvettes de bois utilisées dans cette étude.

Tableau 7. Vue d'ensemble et répartition des éprouvettes pour les essais biologiques
(DE : Duramen Externe - DI : Duramen Interne - A : Aubier - D : Duramen)

Essence	Massif Forestier	Arbre	Zone	CHAMPIGNONS XYLOPHAGES				TERMITES			
				Poria Placenta		Coniophora puteana		Coptotermes Gestroi		Reticulitermes flavipes	
				Non Délavé	Délavé	Non Délavé	Délavé	Non Délavé	Délavé	Non Délavé	Délavé
<i>C. japonica</i>	Bélouve	C1	A	7	7	8	8	6	6	1	1
			DI	7	7	8	8	6	6	5	3
			DE	7	7	8	8	6	6	4	4
		C2	A	7	7	8	8	6	6	1	4
			DI	7	7	8	8	6	6	4	3
			DE	7	7	8	8	6	6	1	1
	C3	A	8	8	7	7	6	6	5	3	
		DI	8	8	7	7	6	6	1	2	
		DE	8	8	7	7	6	6	3	3	
	Bébour	C4	A	8	8	7	7	6	6	5	4
			DI	8	8	7	7	6	6	1	4
			DE	8	8	7	7	6	6	1	6
<i>T. plicata</i>			D	30	30	30	30	30	30	-	-
<i>P. sylvestris</i>			D	30	30	30	30	30	30	-	-
<i>C. japonica</i> exposé 7 ans			D	30	-	30	-	30	-	-	-
Témoins <i>P. sylvestris</i>			A	16	10	16	10	12	12	17*	
TOTAL *Témoins communs pour les tous les essais sur <i>R. flavipes</i>				196	160	196	160	174	144	49	38
				712				405			
				1117							

3.1.2. Champignons Basidiomycètes et Termites

Les deux souches de champignons Basidiomycètes utilisées dans cette étude, *Poria placenta* (Fries) Cooke sensu J. Eriksson (FRPL 208) et *Coniophora puteana* (Schumacher ex. Fries) Karsten (BAM Ebw.15) sont issues de la mycothèque de BioWooEB, CIRAD. Ces champignons sont des pourritures brunes, devant être systématiquement utilisés dans le cadre d'essais de durabilité sur les résineux.

Les termites appartenant à l'espèce *Reticulitermes flavipes* (ex. *santonensis* De Feytaud) ont également été prélevés dans les élevages de BioWooEB, CIRAD. Ces termites proviennent à l'origine de la forêt de Saint Trojan, Ile d'Oléron, France. Cette zone est reconnue pour être infestée par cette espèce de termites (Observatoire National Termite, 2023). Les termites sont collectés régulièrement dans cette région afin de constituer des élevages.

Les termites appartenant à l'espèce *Coptotermes gestroi* (Wassmann) ont été prélevés dans les élevages de l'ORLAT (Observatoire Régional de Lutte Anti-Termite) de Saint-André (Île de La Réunion). Ces termites proviennent à l'origine de pièges placés sur la commune de Saint André, reconnue pour être infestée par cette espèce de termites (Observatoire National Termite, 2023).

3.2. METHODES

3.2.1. Essais de durabilité naturelle selon la norme cadre EN 350 (2016) et assurance qualité

Les méthodes d'essai et de classification de la durabilité naturelle sont réalisées selon les directives de la norme EN 350 (2016). Il s'agit d'une norme cadre contenant des préconisations spécifiques d'échantillonnage et renvoyant à des normes d'essais dédiées à l'évaluation de la durabilité naturelle. A l'issue de la réalisation des essais de durabilité naturelle, la norme EN 350 (2016) spécifie la classification des bois étudiés dans les différentes classes de durabilité.

Les essais de durabilité naturelle vis-à-vis des champignons Basidiomycètes ont été réalisés selon la norme XP CEN/TS 15083-1 (2006). Au cours de ce travail de recherche, cette norme expérimentale a vu son statut évoluer en norme homologuée EN 113-2 (2020). Cette évolution de statut n'a pas engendré de modification de méthode d'essai pour la durabilité naturelle (durabilité inhérente). La seule modification concernant nos essais est l'exigence au niveau de la virulence des organismes lignivores. Nos essais et nos résultats de virulence répondent aux exigences de la norme XP CEN/TS 15083-1 (2006) et EN 113-2 (2020). La virulence des souches de champignons sera discutée dans la partie résultats. Etant donné que nos essais fongiques ont été effectivement réalisés selon la norme XP CEN/TS 083-1 (2006), il y sera fait référence dans ce manuscrit.

Les essais de durabilité naturelle vis-à-vis des 2 espèces de termites seront réalisés selon le protocole de la norme EN 117 (2013).

L'évaluation de la durabilité naturelle via des essais de laboratoire est, dans la très grande majorité des cas, évaluée sans vieillissement préalable. Toutefois, la norme EN 350 (2016) stipule qu'une éprouve de vieillissement telle que le délavage peut être mise en œuvre avant un essai biologique. Considérant que le Cryptoméria doit être qualifié pour son utilisation en intérieur et en extérieur, en zone tropicale, un délavage a été pratiqué sur la moitié des éprouvettes testées. Au cours de ce travail de recherche, la norme de délavage EN 84 (1997) a été remplacée par une nouvelle version EN 84 (2020). Cette nouvelle version de la norme ne modifie en rien le protocole expérimental, ni le résultat d'essai. Il sera fait mention de l'EN 84 (1997) dans ce manuscrit.

Les essais relatifs à l'évaluation de la durabilité des bois ont été réalisés dans 2 laboratoires dans lesquels une assurance qualité était mise en œuvre effectivement selon la norme ISO 1725 (2017).

Les essais de durabilité vis-à-vis des champignons Basidiomycètes et vis-à-vis des termites *Reticulitermes flavipes* ont été réalisés au laboratoire de préservation du bois, BioWooEB, CIRAD. Le laboratoire disposait d'une accréditation COFRAC pour ces essais (Accréditation n°1-1686, portée disponible sur www.cofrac.fr, résiliation volontaire d'accréditation en décembre 2022).

Les essais de délavage et de durabilité vis-à-vis des termites *Coptotermes gestroi* ont été réalisés à l'ORLAT. Le laboratoire disposait d'une accréditation COFRAC pour ces essais (Accréditation n°1-6718, portée disponible sur www.cofrac.fr, suspension volontaire d'accréditation en août 2023).

Les essais d'évaluation de la durabilité naturelle ont été conduits dans le respect des normes d'essai. Tout point dérogeant à la norme a été préalablement démontré comme n'impactant pas le résultat d'essai. Ces points, peu souvent abordés dans des travaux de thèse, apparaissent important en termes de fiabilité des résultats des essais dans le cadre de l'évaluation de la durabilité naturelle d'une essence ayant déjà prouvé une forte variabilité de résistance aux organismes biologiques.

3.2.2. Délavage des éprouvettes

L'épreuve de vieillissement accéléré par délavage des éprouvettes est réalisée selon le protocole présenté dans la norme EN 84 (1997). Ce protocole comprend trois étapes : une étape d'imprégnation, une étape d'immersion et une étape de séchage.

L'étape d'imprégnation consiste à placer les éprouvettes d'essai dans des récipients de telle sorte que les éprouvettes d'essences différentes et de différentes zones du bois (aubier/duramen) soient dans des récipients séparés. Les éprouvettes sont lestées avec des masselottes pour les empêcher de flotter. Chaque récipient est alors rempli d'eau déionisée de manière à recouvrir les groupes d'éprouvettes d'un excès d'eau suffisant afin qu'elles demeurent immergées pendant toute la durée de l'opération. Les récipients sont placés sous une cloche à vide et un vide de 4 kPa est appliqué pendant 20 min. A l'issue de cette période, les dispositifs sont ramenés à pression ambiante et les éprouvettes laissées dans les récipients rempli d'eau pendant deux heures. L'eau est ensuite changée dans chaque récipient et remplacée par 5 volumes d'eau pour 1 volume de bois.

L'étape d'immersion consiste à laisser les éprouvettes dans l'eau et à changer l'eau au 1^{er} et 2^{ème} jour, puis à effectuer 7 changement d'eau dans les 12 jours d'immersion restant.

A l'issue de cette phase d'immersion, les éprouvettes sont déposées sur des baguettes en ayant soin de laisser un intervalle d'au moins 10 mm entre chacune d'elles, permettant une libre circulation de l'air autour des éprouvettes. Les éprouvettes sont stabilisées en conditions ambiantes (au laboratoire de l'ORLAT) jusqu'à masse constante, c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées consécutives, à 24 h d'intervalle, ne diffèrent pas de plus de $\pm 0,1$ g (Fig. 7), soit pendant 3 semaines dans notre cas.

L'épreuve de vieillissement est réalisée sur la moitié des éprouvettes devant être mises en essais biologiques.



Figure 7. Séchage des éprouvettes après délavage

3.2.3. Evaluation de la durabilité face aux champignons lignivores

La durabilité naturelle vis-à-vis des champignons Basidiomycètes est évaluée selon la norme XP X CEN/TS 15083-1 (2006), dans le strict respect de la norme.

Les éprouvettes d'essais des 3 essences et des différentes zones du bois, délavées ou non, sont stabilisées à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, $65 \pm 5\%$ d'Humidité Relative (HR), suite à leur réception en provenance de l'ORLAT. La stabilisation dure 3 mois jusqu'à masse constante ($\pm 0.1\text{g}$ entre 2 pesées consécutive de 24h).

Toutes les éprouvettes sont mesurées et pesées après stabilisation. Les éprouvettes sont réparties par essence, zone de bois, planche :

- Les éprouvettes seront réparties pour les essais fongiques
- Des éprouvettes appariées serviront de martyr pour déterminer l'humidité initiale des différents lots d'éprouvettes. Par modalité, 10 éprouvettes de calcul d'humidité seront séchées à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 24h, pesées.

On calculera l'humidité relative de chaque éprouvette (mc) selon l'équation 1 :

Équation 1. Humidité relative des éprouvettes

$$mc = \frac{m_1 - m_0}{m_0} (\%)$$

Dans laquelle :

mc : teneur en humidité des éprouvettes de calcul d'humidité

m_1 : masse stabilisée (g) des éprouvettes de calcul d'humidité

m_0 : masse anhydre (g) des éprouvettes de calcul d'humidité

La moyenne de l'humidité des 10 éprouvettes par modalité est déterminée selon l'équation 2 :

Équation 2. Moyenne de l'humidité relative des éprouvettes

$$MC = \sum mc (\%)$$

L'humidité théorique initiale des éprouvettes d'essai est calculée (équation 3)

Équation 3. Humidité théorique initiale des éprouvettes

$$m_i = m_{1e} \times \frac{100}{100 + MC} (g)$$

m_{1e} : masse initiale éprouvette essai (ou masse de l'éprouvette avant essai stabilisée sous une condition climatique de 20°C de température et de 65 % d'humidité relative).

MC : moyenne du teneur en humidité (Equation 2)

Avant essai, les éprouvettes sont stérilisées à la vapeur d'eau pendant 20 min, laissées à reposer en conditions ambiantes pendant 24h, puis stérilisées à nouveau à la vapeur d'eau pendant 10 min.

A l'issue de la stérilisation les éprouvettes sont introduites 2 à 2 dans des flacons de culture préalablementensemencés par *Coniophora puteana* ou *Poria placenta*. Les éprouvettes d'aubier de Pin sylvestre sont utilisées comme témoins de virulence. L'exposition aux champignons dure 16 semaines à 22±2°C, 70±5% HR, à l'obscurité.

A l'issue des 16 semaines, les éprouvettes d'essai sont retirées des flacons, nettoyées du mycélium adhérent.

Les éprouvettes sont placées à l'étuve à 103±2°C pendant 24h afin de déterminer leur masse anhydre (m_3). La perte de masse due à l'activité fongique est alors calculée (Equation 4)

$$PM = \frac{m_i - m_3}{m_i} (\%)$$

Les résultats des pertes de masse sont ensuite exprimés en : pourcentage de perte de masse avec un écart type associé, et, en valeur médiane de perte de masse, afin de pouvoir affecter une classe de durabilité et une variabilité pour chaque essence et zone de bois.

3.2.4. Evaluation de la durabilité face aux termites souterrains

Cette évaluation est réalisée selon les prescriptions de la norme NF EN 117 (2013).

Avant la réalisation de l'essai, les éprouvettes sont stabilisées :

- A BioWooEB, les éprouvettes d'essais sont stabilisées à $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, $65\pm 5\%$ HR, suite à leur réception en provenance de l'ORLAT. La stabilisation dure 3 mois jusqu'à masse constante (à $\pm 0.1\text{g}$ entre 2 pesées consécutives de 24h).
- A l'ORLAT, les éprouvettes d'essai sont stabilisées à température ambiante dans le laboratoire d'essai pendant 3 mois.

Chaque éprouvette d'essai est testée dans une micro-termitière contenant 500g de sable humidifié avec 100g d'eau ainsi qu'un morceau de bois non traité (0,5 g) issu des élevages (*Pinus patula* à l'ORLAT et *Populus trichocarpa* à BioWooEB). On introduit dans chacun des dispositifs un groupe de termites constitué de 250 ouvriers, 10 soldats et éventuellement 10 nymphes. Les micro-termitières ainsi formées sont placées dans une enceinte de tests obscure :

- A 27°C , HR > 75% à BioWooEB pour *Reticulitermes flavipes*,
- A une température et une humidité relative ambiantes à l'ORLAT pour *Coptotermes gestroi*

Les éprouvettes d'aubier de Pin sylvestre sont utilisées comme témoins.

Les dispositifs ainsi constitués (Fig. 8) sont observés deux fois par semaine. A chaque contrôle, on note les dégâts observés sur les éprouvettes et l'activité des termites. Le taux d'humidité du sable dans les dispositifs est maintenu pendant la durée de l'essai par ajouts réguliers d'eau. Les dispositifs sont démontés après huit semaines de mise en présence avec les termites.



Figure 8. Dispositifs d'essais face aux termites (ORLAT)

Evaluation des dégâts réalisés par les termites :

A la fin de l'essai, les éprouvettes sont retirées des dispositifs d'essai et débarrassées des particules de substrat adhérentes à leur surface. Dans chacun des dispositifs, le nombre de termites survivant est recensé afin de déterminer le taux de survie des ouvriers.

L'évaluation du degré d'attaque des éprouvettes par les termites souterrains est réalisée selon deux méthodes : la cotation visuelle (ORLAT, BioWooEB) et la mesure de la perte de masse (ORLAT).

- Cotation visuelle selon EN 117 (2013)

Les éprouvettes sont examinées visuellement et l'étendue des attaques est mesurée avec un comparateur et un pied à coulisse.

Le résultat de l'examen de chacune des éprouvettes est exprimé par une cotation selon les critères exposés dans le tableau 8.

Tableau 8. Cotation des dégâts réalisés par les termites souterrains
(selon norme EN 117, 2013)

Cotation	Type d'attaque	Dégâts
0	Attaque nulle	Aucun dégât
1	Tentative d'attaque	a) Erosion superficielle de profondeur trop faible pour être mesurée s'étendant sur une zone non délimitée de l'éprouvette d'essai ; ou b) Attaque jusqu'à 0,5 mm de profondeur, limitée à une ou des zones dont la surface totale ne dépasse pas 30 mm ² ; ou c) Combinaison de a) et b).
2	Attaque légère	a) Erosion de 1 mm de profondeur limitée à 1/10 de la surface de l'éprouvette d'essai ; ou b) Forage unique jusqu'à 3 mm de profondeur ; ou c) Combinaison de a) et b).
3	Attaque moyenne	a) Erosion inférieure à 1 mm de profondeur sur plus de 1/10 de la surface de l'éprouvette d'essai ; ou b) Erosion supérieure à 1 mm et inférieure à 3 mm sur au plus 1/10 de la surface de l'éprouvette d'essai ; ou c) Forages isolés de profondeur supérieure à 3 mm, ne s'élargissant pas en cavités ; ou d) Toute combinaison de a), b) ou c).
4	Attaque sévère	a) Erosion de profondeur supérieure à 1 mm et inférieure à 3 mm sur plus de 1/10 de la surface de l'éprouvette d'essai ; ou b) forages pénétrant à plus de 3 mm de profondeur et s'élargissant en cavités dans la masse de l'éprouvette ; ou c) combinaison de a) et b).

- **Mesure de la perte de masse des éprouvettes :**

En complément de l'examen visuel, la perte de masse des éprouvettes a été évaluée après l'essai réalisé à l'ORLAT

Pour ce faire, les méthodes utilisées dans le système normatif français prévoient un conditionnement des éprouvettes avant et après essai à température et HR° maîtrisées afin que les éprouvettes de bois aient la même teneur en eau. La teneur en eau est mesurée avec un humidimètre à pointe (Mini BLD2000, Protimeter) (§3.2.5).

Aussi, la perte de masse a été évaluée en retirant mathématiquement la masse d'eau présente dans les éprouvettes avant et après essai biologique, ceci en lien avec l'humidité mesurée par humidimètre à pointes (équation 3).

3.2.5. Mesure de la densité et la teneur en eau

Dans le cadre de l'étude de la prédiction de la densité et de teneur en eau avec la SPIR, toutes les éprouvettes de bois à l'essai ont été mesurées et pesées après découpe et délavage (le cas échéant), après une stabilisation de leur masse dans les conditions ambiantes du laboratoire.

L'humidité de chacune des éprouvettes a été mesurée grâce à un humidimètre à pointes (Mini BLD2000, Protimeter) en enfonçant les pointes à environ 3 mm de la surface dans le sens des fibres (longitudinal). Une mesure est faite par éprouvette.

Les mesures ont été réalisées quelques heures avant passage des éprouvettes au spectromètre afin de limiter les variations dues aux conditions climatiques (température et humidité relative ambiantes).

3.2.6. Mesures statistiques appliquées aux résultats

La comparaison statistique des résultats est réalisée en appliquant le test de Student à 5% et par ANOVA (analyse de variance) à 5% en utilisant le logiciel Xlstat 5.1 (Lumivero, 1331 17th Street Suite 404 Denver, USA).

3.2.7. Acquisition des données spectrales et analyse des données

Les spectres ont été obtenus à l'aide d'un spectromètre FOSS XDS near-infrared « rapid content analyser » (FOSS, DK-3400 Hilleroed) au laboratoire de l'UMR Qualisud de Saint-Pierre (La Réunion).

L'acquisition des données est réalisée dans le visible et le proche infra-rouge (400 nm à 2498 nm) avec un pas de 2 nm.

Une pré-étude a été réalisée afin de déterminer l'utilité de réaliser 3 mesures par face et l'utilité de réaliser une mesure sur chacune des deux faces transversales opposées

(Annexe B). Le résultat de cette pré-étude ayant démontré qu'il n'était pas nécessaire de faire 3 mesures par face mais qu'il était pertinent de faire des mesures sur les deux faces opposées transversales.

L'acquisition des spectres a donc été réalisée sur chacune des deux faces transversales des éprouvettes à l'aide d'un masque en métal délimitant une fenêtre de 1 x 0,5 cm. La moyenne des valeurs obtenues sur chacune des deux faces étant ensuite calculée.

Les analyses des données spectrales et physicochimiques ont été réalisées avec les logiciels Winisi version 4.1 (FOSS, DK-3400 Hilleroed) et Xlstat 5.1 (Lumivero, 1331 17th Street Suite 404 Denver, USA).

Dans nos travaux, des méthodes de chimiométrie sont utilisées pour analyser les spectres obtenus. Il s'agit de méthodes de prétraitement, d'analyse exploratoire et de classification :

Prétraitements

Réduction du bruit

Le bruit est une erreur formant des variations de signal aléatoires le long du spectre. Ses origines potentielles sont nombreuses et peuvent être internes ou externes à l'appareil. L'algorithme utilisé dans notre étude est celui de Savitzky-Golay, qui correspond à un lissage polynomial (Savitzky & Golay, 1964).

Réduction des lignes de base

En spectroscopie, certains spectres montrent une tendance croissante avec les longueurs d'onde qui n'est pas due à la chimie de l'échantillon mais à la diffusion de la lumière dont l'intensité croît avec la longueur d'onde. La méthode la plus courante de réduction des lignes de base est Detrend. Elle consiste à ôter au spectre sa tendance globale, modélisée par un polynôme, qui peut être de plusieurs degrés :

- Detrend d'ordre 0 : le polynôme correspond à une constante qui est égale à la moyenne du spectre
- Detrend d'ordre 1 : le polynôme correspond à une droite identifiée par régression linéaire
- Detrend d'ordre 2 et plus : le polynôme correspond à une équation quadratique (parabole, cubique, etc.).

La dérivation des spectres, est également utilisée pour réduire les lignes de base mais aussi pour amplifier la variance observée (amplification des zones de pente maximale, dans le cas d'une dérivée première ; magnification des spectres dans le cadre d'une dérivée secondaire). L'algorithme de Savitzky-Golay, vu ci-avant, est réalisé par dérivation du polynôme identifié. (Barnes *et al.*, 1989 et 1993).

Réduction de l'effet multiplicatif

L'effet multiplicatif peut être supprimé selon deux méthodes, la transformation logarithmique et la normalisation du signal (méthode SNV-Standard Normal Variate).

Analyse exploratoire

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique qui consiste à réduire le nombre de variables d'un jeu de données pour pouvoir le représenter spatialement, souligner les longueurs d'onde les plus importantes et éventuellement réduire sa dimensionnalité pour d'autres méthodes d'analyse. Pour cela, des ensembles de longueurs d'onde possiblement corrélées entre elles sont converties en variables latentes, appelées composantes principales (CP), par projection orthogonale. Des regroupements d'échantillons en fonction de certaines variables peuvent ainsi être mis en évidence visuellement sur des graphiques modélisant par exemple une CP par rapport à une autre (Martens et Næs, 1989).

Ainsi, l'ACP est un outil de base en chimiométrie qui répond à plusieurs objectifs : exploration et description d'un jeu de données, préparation et nettoyage des données (repérage des individus atypiques), identification de groupes d'individus qui présentent une proximité par rapport à une variable mesurée) et donc de d'identifier les corrélations entre les données.

Classification

Analyse linéaire discriminante (LDA)

L'analyse linéaire discriminante fonctionne à l'aide de composantes de construction en séquence qui optimisent la séparation entre classes d'une variable catégorielle. La méthode cherche à réduire les dimensions des champs d'analyse continue tout en conservant la plus grande précision dans le classement de la catégorie de variables catégorielles. Comme pour une ACP, les composantes de la LDA sont également associées à des vecteurs propres et des valeurs propres afin de représenter la contribution des champs d'analyse à chaque composante et la quantité de variances maintenue par chaque composante (James *et al.*, 2014).

Analyse discriminante par les moindres carrés partiels (PLS)

Le classificateur linéaire choisi pour cette étude est l'analyse discriminante par les moindres carrés partiels (PLS-DA). Le principe de cette méthode est semblable à celui de l'ACP, et repose sur la réduction des longueurs d'onde en variables latentes pour maximiser la variance du jeu de données. En revanche, contrairement à l'ACP, les variables latentes ne sont pas calculées en fonction de la covariance entre différentes longueurs d'onde mais en fonction de la covariance entre les prédicteurs et les références (Barker et Rayens, 2003).

L'algorithme de Kennard-Stone (Kennard et Stone, 1969) est utilisé pour sélectionner les jeux de données d'étalonnage et de validation.

Les mesures spectrales au proche infrarouge et les différents traitements possibles du signal ont été mis en œuvre pour prédire certaines propriétés des éprouvettes soumises à essai : la teneur en eau, la densité, la distinction des 3 essences en essai, la zone de bois (aubier/duramen) et la classe de durabilité naturelle face aux champignons.

Dans la suite de ce manuscrit, l'étude de la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons Basidiomycètes et des termites (résultats et discussion) est présentée dans le §4 et les apports de la spectroscopie dans la détermination des caractéristiques du bois (résultats et discussion) dans le §5.

4. Durabilité naturelle face aux Champignons Basidiomycètes et aux Termites

4.1. RESULTATS

4.1.1. Durabilité naturelle face aux champignons Basidiomycètes

La durabilité naturelle est évaluée selon la norme XP X CEN/TS 15083-1 (2006), devenue EN113-2 (2020).

Il est à noter qu'avec ce changement normatif, la souche de champignon *Poria placenta* est désormais appelée *Rhodonia placenta*, du fait d'une synonymie mise en évidence. Nous maintiendrons l'appellation de la norme XP X CEN/TS 15083-1 (2006) dans ce manuscrit.

La méthode et le nombre d'échantillons nécessaires sont identiques pour ces 2 normes, toutefois, les critères de validité sont différents. Dans le cadre de nos travaux, nos essais sont valides quelle que soit la norme considérée (Tableau 9).

Tableau 9. Validité des essais de dégradation vis-à-vis des champignons Basidiomycètes

Champignon	Dégradation de l'aubier de Pin sylvestre (Témoïn)			
	Perte de masse (%)		Exigences de la norme	
	Moyenne	Médiane	XP X CEN/TS 15083-1	EN 113-2
<i>Poria placenta</i>	36.98	36.55	Perte de masse moyenne : 20% minimum	Perte de masse médiane : 20% Et perte de masse médiane > 30% pour au moins 1 champignon d'essai
Validité	Oui	Oui		
<i>Coniophora puteana</i>	59.12	60.22	Perte de masse moyenne : 30%	Perte de masse médiane : 20% Et perte de masse médiane > 30% pour au moins 1 champignon d'essai
Validité	Oui	Oui		

En termes de validité, il est aussi important de noter qu'aucune éprouvette d'essai n'a été rejetée pour cause de moisissures ou autre contamination, aucune éprouvette d'essai n'était saturée en eau. Toutes les données de perte de masse des éprouvettes d'essai et des éprouvettes témoins ont été exploitées dans nos résultats.

La dégradation fongique est exprimée en pourcentage de la perte de masse (anhydre) de l'éprouvette d'essai. La classification formelle de la durabilité naturelle doit se faire sur la perte de masse médiane des lots d'éprouvettes (soumises au champignon le plus discriminant) (Fig. 3 - Tableau A), mais la perte de masse moyenne et l'écart type

associé sont des valeurs porteuses d'information, et, à ce titre seront discutées dans ce document.

La moyenne de perte de masse après exposition aux champignons Basidiomycètes du *C. japonica* varie en fonction de la zone de prélèvement des éprouvettes (Tableau 10 – Fig. 9). En effet, pour les deux champignons à l'étude, la perte de masse des éprouvettes d'aubier est beaucoup plus importante que celle des éprouvettes de duramen (34.22% contre 8.20% pour cette essence après exposition à *P. placenta* et 43.6% contre 3,9% après exposition à *C. puteana*, tous arbres confondus). Cette observation est valable, à moindre mesure, pour le Pin Sylvestre 36.98% contre 32.72% pour *P. placenta* et 59.12% contre 43.11% pour *C. puteana*).

De plus, concernant Cryptoméria, les écarts types démontrent une forte variabilité dans les résultats obtenus au sein des éprouvettes d'une même zone de prélèvement, comme au sein du duramen de l'arbre 3, dont l'écart type est de 14,15% pour une moyenne de 8.99% pour *C. puteana* avec des valeurs comprises entre 0 et 39,75%.

Concernant les éprouvettes de Red Cedar, le degré d'attaque est faible (en moyenne 0.24% pour *P. placenta* et 0.20% pour *C. puteana*) et la médiane presque nulle dans les deux cas. Ces résultats confirment la très forte durabilité du Red Cedar face aux deux champignons utilisés.

Tableau 10. Médiane, moyenne et écart-type du pourcentage de perte de masse des différentes essences à l'essai non délavées selon la zone de prélèvement des éprouvettes après mise en présence des champignons *P. placenta* et *C. puteana*
(DE = Duramen Externe - DI = Duramen Interne - D = Duramen - A = Aubier)

Essence	Zone	<i>Poria placenta</i>				<i>Coniophora puteana</i>			
		Nb	Médiane (%)	Moyenne (%)	Ecart-Type (%)	Nb	Médiane (%)	Moyenne (%)	Ecart-Type (%)
<i>Cryptomeria japonica</i> Arbre 1	DE	7	9.83	11.24	4.38	8	0.00	1.21	2.15
	DI	7	9.47	9.46	3.63	8	0.76	7.49	10.81
	D	14	9.65	10.35	4.12	16	0.23	4.35	8.63
	A	7	32.04	33.10	6.33	8	42.99	42.85	4.09
<i>Cryptomeria japonica</i> Arbre 2	DE	7	4.99	4.35	3.24	8	0.00	2.24	4.05
	DI	7	11.58	8.92	4.04	8	0.00	2.56	4.38
	D	14	5.58	6.63	4.31	16	0.00	2.40	4.22
	A	7	31.01	33.68	6.36	8	40.15	40.96	4.19
<i>Cryptomeria japonica</i> Arbre 3	DE	8	8.00	6.66	4.43	7	0.00	0.32	0.53
	DI	8	8.01	13.12	10.52	7	26.96	17.67	15.79
	D	16	8.00	9.89	8.70	14	0.00	8.99	14.15
	A	8	37.00	36.98	5.59	7	46.05	46.53	2.33
<i>Cryptomeria japonica</i> Arbre 4	DE	8	5.02	6.71	4.15	7	0.00	0.00	0.00
	DI	8	3.58	5.30	3.76	7	0.00	0.04	0.08
	D	16	4.30	6.00	4.02	14	0.00	0.02	0.06
	A	8	33.28	32.91	2.58	7	44.13	44.54	2.62
<i>Cryptomeria japonica</i> Arbre 1 à 4	DE	30	7.00	7.20	4.75	30	0.00	0.99	2.54
	DI	30	7.82	9.20	6.95	30	0.00	6.81	11.73
	D	60	7.82	8.20	6.04	60	0.00	3.90	8.97
	A	30	33.36	34.22	5.63	30	44.43	43.60	4.03
<i>Pinus sylvestris</i>	D	30	31.58	32.72	6.36	30	48.81	43.11	16.46
	A	16	36.55	36.98	8.03	16	60.22	59.12	3.03
<i>Thuja plicata</i>	D	30	0.00	0.24	0.39	30	0.02	0.20	0.34

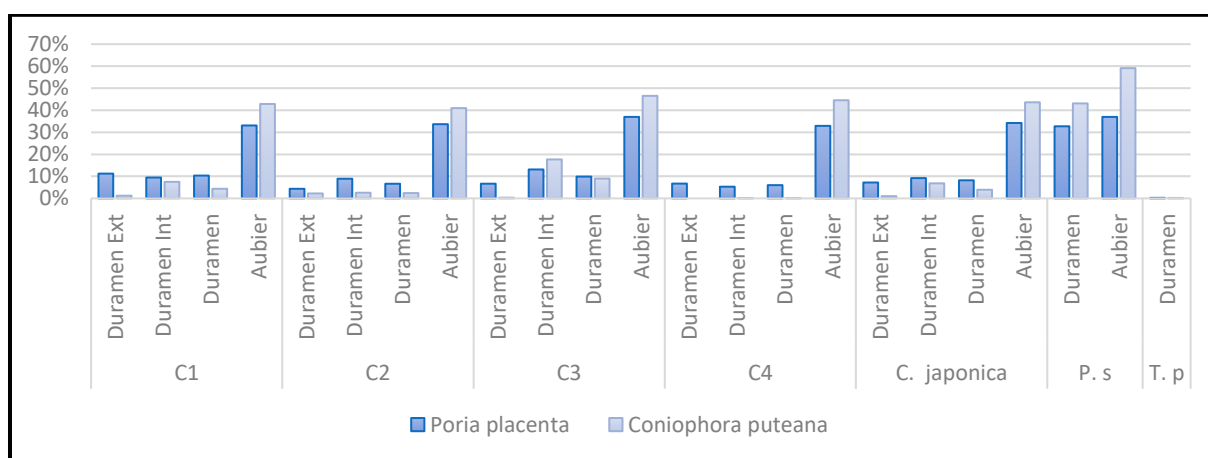


Figure 9. Perte de masse moyenne (%) des différentes essences à l'essai non délavées selon la zone de prélèvement des éprouvettes (DE = Duramen Externe - DI = Duramen Interne - D = Duramen - A = Aubier) après mise en présence des champignons *P. placenta* et *C. puteana*

4.1.1.1. Discrimination des deux champignons sur les différentes essences de bois

Les éprouvettes d'Aubier de Cryptoméria subissent des degrés d'attaque plus importants avec le champignon *C. puteana* (en moyenne 43.60% contre 34.72% avec *P. placenta*), alors que les éprouvettes de duramen subissent des attaques plus importantes avec le champignon *P. placenta* (en moyenne 8.20% contre 3.90% avec *C. puteana*). Ces résultats sont confirmés par comparaison statistique (fig. 10) sauf pour l'arbre 3. Si l'on regarde les résultats du duramen de Cryptoméria dans le détail, en distinguant le duramen interne du duramen externe (fig. 9), *P. placenta* est le champignon le plus discriminant pour le *C. japonica*, sauf pour le duramen interne de l'arbre 3, qui est plus sensible au champignon *C. puteana*.

Ainsi, le champignon le plus discriminant pour le Cryptoméria et le Pin Sylvestre est *P. placenta*.

Concernant le Red Cedar, le test de Student ne permet pas de mettre en évidence une différence significative entre la perte de masse provoquée par *P. placenta* (0.24%) et celle provoquée par *C. puteana* (0.20%). *Poria placenta* sera considéré comme le champignon le plus discriminant car la perte de masse est plus importante pour cette essence de bois.

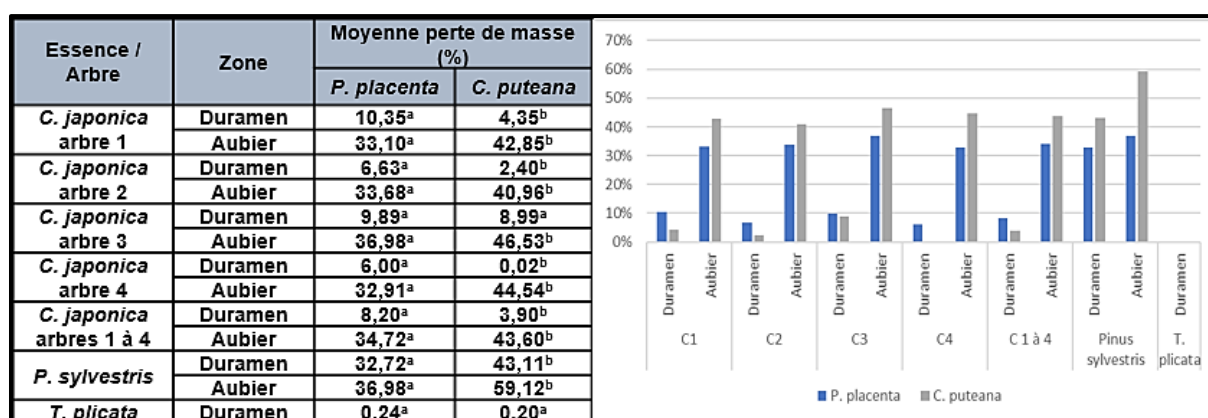


Figure 10. Comparaison de la virulence des deux champignons à l'essai (*P. placenta* et *C. puteana*) selon l'essence de bois, la zone étudiée et l'arbre en question (C1 à C4 = Aubres de Cryptoméria 1 à 4)

Dans le tableau, sur chaque ligne, les moyennes portant des lettres différentes en exposant sont significativement différentes (test de Student à 5%)

4.1.1.2. Comparaison de la durabilité du duramen interne et du duramen externe de *Cryptomeria japonica*

Pour chacun des quatre arbres de *C. japonica* à l'étude, la moyenne de perte de masse des éprouvettes de duramen interne et de duramen externe après exposition à *P. placenta* ne présentent pas de différences significatives (tableau 11). De la même manière, il n'y a pas non plus de différence significative entre les moyennes de perte de masse des éprouvettes de duramen, de duramen interne et de duramen externe tous arbres confondus.

Tableau 11. Comparaison de la perte de masse moyenne (%) du duramen interne et externe de *C. japonica* face à *P. placenta*

Sur chaque ligne, les moyennes portant des lettres différentes en exposant sont significativement différentes (Anova à 5%)

Arbre	Duramen Ext.	Duramen Int.	Duramen
C1	11,24 ^a	9,46 ^a	10,35^a
C2	4,35 ^a	8,92 ^a	6,63^a
C3	6,66 ^a	13,12 ^a	9,89^a
C4	6,71 ^a	5,30 ^a	6,00^a
C1 à C4	7,20 ^a	9,20 ^a	8,20^a

Il faut noter le comportement paradoxal du duramen de l'arbre 3 avec *C. puteana*, seul arbre pour lequel *C. puteana* génère une perte de masse moyenne de 17.67% dans le duramen interne, alors que le duramen externe n'est quasiment pas dégradé.

4.1.1.3. Comparaison de la durabilité naturelle des différents arbres de *Cryptomeria japonica*

Le pourcentage de perte de masse de l'aubier des 4 arbres de *C. japonica* à l'étude n'est pas significativement différent (Anova à 5%). Cependant, la comparaison statistique des éprouvettes de duramen distingue les arbres 1 et 3 des arbres 2 et 4 (Fig. 11).

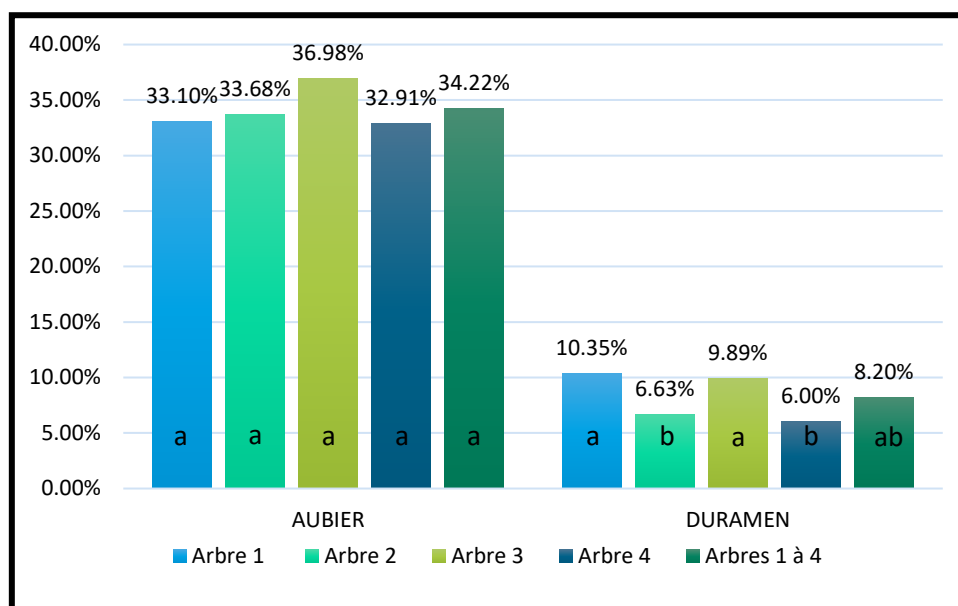


Figure 11. Comparaison de la perte de masse des éprouvettes de duramen et d'aubier de chaque arbre de *C. japonica* face à *P. placenta*
Pour chaque zone (Aubier et Duramen), les moyennes portant des lettres différentes en pied d'histogramme sont significativement différentes (Anova à 5%)

4.1.1.4. Détermination de la durabilité naturelle des trois essences de bois utilisées

La durabilité naturelle des trois essences utilisées a été déterminée selon les dispositions prévues dans la norme EN 350 (2016) en fonction de la médiane de la perte de masse (%) des éprouvettes et de la répartition des valeurs individuelles de perte de masse (%) dans les différentes classes de durabilité (Fig. 3).

Ainsi, si on prend en compte le champignon le plus discriminant, soit *P. placenta* pour *C. japonica* et *T. plicata* et *C. puteana* pour *P. sylvestris*, on obtient la classification suivante (tableau 12) :

- **Le Cryptoméria est classé « Durable » (DC2)**
- **Le Red Cedar est classé « Très Durable » (DC1)**
- **Le Pin Sylvestre est classé « Non Durable » (DC5)**

Tableau 12. Détermination de la classe de durabilité (DC) de chaque essence selon EN 350 (2016)

	Essence	Nb	Moy. (%)	Ecart Type (%)	Min. (%)	Max. (%)	Médiane (%)	DC
P. placenta	<i>C. japonica</i>	60	8,20%	6,04%	0,00%	35,94%	7,82%	DC2
	<i>T. plicata</i>	30	0,24%	0,39%	0,00%	1,59%	0,00%	DC1
	<i>P. sylvestris</i>	30	32,72%	6,36%	22,35%	49,22%	31,58%	DC5
C. puteana	<i>C. japonica</i>	60	3,90%	8,97%	0,00%	39,75%	0,00%	DC1
	<i>T. plicata</i>	30	0,20%	0,34%	0,00%	1,49%	0,02%	DC1
	<i>P. sylvestris</i>	30	43,11%	16,46%	7,31%	62,34%	48,81%	DC5

Au vu de la variabilité observée dans les résultats, les valeurs individuelles de perte de masse des éprouvettes de duramen (après mise en présence du champignon le plus discriminant pour chacune d'elles) sont réparties dans les différentes classes de durabilité (tableau 13).

Tableau 13. Répartition des valeurs individuelles de perte de masse des éprouvettes de duramen des 3 essences de bois dans les différentes classes de durabilité (selon le champignon le plus discriminant pour chaque essence) (v = variable)

		Nb	DC1	DC2	DC3	DC4	DC5	CLASSE DE DURABILITE
P. placenta	<i>C. japonica</i>	60	37%	32%	22%	8%	2%	DC 1-2-3v
	<i>T. plicata</i>	30	100%	0%	0%	0%	0%	DC1
C. puteana	<i>P. sylvestris</i>	30	0%	7%	3%	10%	80%	DC5

Ainsi, toutes les éprouvettes de duramen de Red Cedar appartiennent à la classe de durabilité 1 « Très Durable ». Les éprouvettes de duramen de Pin Sylvestre sont quant à elles majoritairement (80%) classées dans la classe de durabilité 5 « Non Durable ». Les 20% restants se répartissent dans les classes de durabilité 2, 3 et 4.

En revanche, les éprouvettes de Cryptoméria sont réparties dans les classes de durabilité 1 à 5, avec des taux importants dans les classes 1, 2 et 3 (respectivement 37%, 32% et 22%). Les recommandations de la norme EN 350 ne permettent pas de conclure. En effet, la norme prévoit de définir la classe de durabilité dans un intervalle « x-y » lorsqu'au moins 40% des valeurs sont comprises dans la classe x et au moins 40% dans la classe y. Cette classification n'est pas possible dans le cas du Cryptoméria, aussi, nous avons fait le choix de le « classer » : DC 1-2-3 v (v signifiant la variabilité des résultats).

4.1.1.5. Effet du délavage et de l'exposition naturelle (classe d'emploi 3.2) sur la durabilité naturelle des trois essences à l'étude

Les pertes de masse médiane des éprouvettes d'aubier de Pin sylvestre (tableau 10) répondent pleinement aux exigences des normes XP X CEN/TS 15083-1 (2006) et EN 113-2 (2020) et nous permettent de valider cet essai. Tout comme dans le cas des éprouvettes non délavées, les pertes de masse de toutes les éprouvettes d'essai ont été considérées (pas d'éprouvette saturée en eau, ni contaminée).

Comme pour les éprouvettes non délavée, l'observation des résultats de perte de masse sur les éprouvettes de Cryptoméria délavées et exposées pendant 7 ans en condition d'emploi 3.2 (Tableaux 14 et 15) met aussi en évidence une durabilité moindre de l'aubier par rapport au duramen ainsi que des différences de degré d'attaque entre les deux champignons.

La variabilité observée pour les éprouvettes délavée apparait moindre que pour les éprouvettes non délavées. En effet, les écarts types sont largement inférieurs à la moyenne pour toutes les éprouvettes soumises à *P. placenta*.

Tableau 14. Médiane, moyenne et écart-type du pourcentage de perte de masse des différentes essences à l'essai délavées selon la zone de prélèvement des éprouvettes après mise en présence des champignons *P. placenta* et *C. puteana*
(DE = Duramen Externe - DI = Duramen Interne - D = Duramen - A = Aubier)

Essence	Zone	<i>Poria placenta</i>				<i>Coniophora puteana</i>			
		Nb	Médiane (%)	Moyenne (%)	Ecart-Type (%)	Nb	Médiane (%)	Moyenne (%)	Ecart-Type (%)
<i>Cryptomeria japonica</i> Arbre 1	DE	7	25.28	24.18	3.49	8	13.90	12.62	5.92
	DI	7	24.35	24.68	2.58	8	20.16	19.81	8.21
	D	14	24.81	24.43	3.08	16	14.71	16.21	8.01
	A	7	29.89	29.63	4.29	8	36.00	35.43	1.87
<i>Cryptomeria japonica</i> Arbre 2	DE	7	14.39	14.31	5.84	8	1.17	2.81	4.52
	DI	7	19.74	17.68	6.42	8	2.40	4.44	6.13
	D	14	16.16	15.99	6.36	16	1.18	3.63	5.44
	A	7	31.65	32.48	7.06	8	42.57	41.58	4.49
<i>Cryptomeria japonica</i> Arbre 3	DE	8	14.64	16.76	5.21	7	0.56	4.91	7.36
	DI	8	21.87	22.50	5.36	7	23.34	21.21	11.56
	D	16	18.22	19.63	6.01	14	11.08	13.06	12.66
	A	8	37.77	37.57	5.43	7	39.30	39.74	3.97
<i>Cryptomeria japonica</i> Arbre 4	DE	8	21.76	20.03	4.24	7	1.85	3.22	3.04
	DI	8	19.82	18.95	5.02	7	5.50	8.15	7.09
	D	16	21.13	19.49	4.68	14	3.10	5.68	5.98
	A	8	31.82	31.78	7.58	7	35.50	37.40	3.43
<i>Cryptomeria japonica</i> Arbre 1 à 4	DE	30	19.12	18.79	5.98	30	2.56	6.01	6.79
	DI	30	21.49	20.94	5.75	30	10.46	13.32	11.13
	D	60	20.84	19.86	5.86	60	5.89	9.67	9.91
	A	30	32.76	32.99	6.91	30	37.56	38.53	4.29
<i>Pinus sylvestris</i>	D	30	28.92	28.59	6.30	30	48.68	41.96	17.89
	A	16	36.49	36.64	7.53	16	51.14	51.95	4.17
<i>Thuja plicata</i>	D	30	0.17	0.22	0.25	30	0.00	0.01	0.02

Tableau 15. Médiane, moyenne et écart-type du pourcentage de perte de masse des éprouvettes de duramen (D) de *C. japonica* exposées naturellement, après mise en présence des champignons *P. placenta* et *C. puteana*

Essence	Zone	<i>Poria placenta</i>				<i>Coniophora puteana</i>			
		Nb	Médiane (%)	Moyenne (%)	Ecart-Type (%)	Nb	Médiane (%)	Moyenne (%)	Ecart-Type (%)
<i>C. japonica</i> exposé 7 ans	D	30	33.88	33.46	5.38	30	25.20	23.04	9.88

La perte de masse moyenne des éprouvettes de duramen *C. japonica* après épreuve de délavage est significativement plus importante que celle observée sur les éprouvettes non délavées, ceci pour les deux champignons utilisés. Celle-ci est encore plus importante pour les éprouvettes exposées naturellement pendant 7 ans (Tableau 16 – Fig. 12 et 13).

En ce qui concerne les éprouvettes d'aubier de Cryptoméria, les faibles différences observées dans la perte de masse des éprouvettes délavées par rapport aux éprouvettes non délavées ne sont pas significatives pour *P. placenta*. On observe cependant diminution significative de perte de masse pour *C. puteana*.

Tableau 16. Moyenne de perte de masse (en %) des 3 essences face aux deux champignons avec et sans épreuve de délavage et après exposition naturelle (pour le duramen de *C. japonica*)
Pour chaque champignon, et sur chaque ligne, les moyennes portant deux lettres différentes en exposant sont significativement différentes (selon Anova à 5%)

		<i>P. placenta</i>			<i>C. puteana</i>		
		Non délavé	Délavé	Exposé 7a	Non délavé	Délavé	Exposé 7a
<i>C. japonica</i>	Duramen	8.20 ^a	19.86 ^b	33.46 ^c	3.90 ^a	9.67 ^b	23.04 ^c
	Aubier	34.22 ^a	32.99 ^a	-	43.60 ^a	38.53 ^b	-
<i>P. sylvestris</i>	Duramen	32.72 ^a	28.59 ^a	-	43.11 ^a	41.96 ^a	-
	Aubier	36.98 ^a	36.64 ^a	-	59.12 ^a	51.95 ^b	-
<i>T. plicata</i>	Duramen	0.24 ^a	0.22 ^a	-	0.20 ^a	0.01 ^b	-

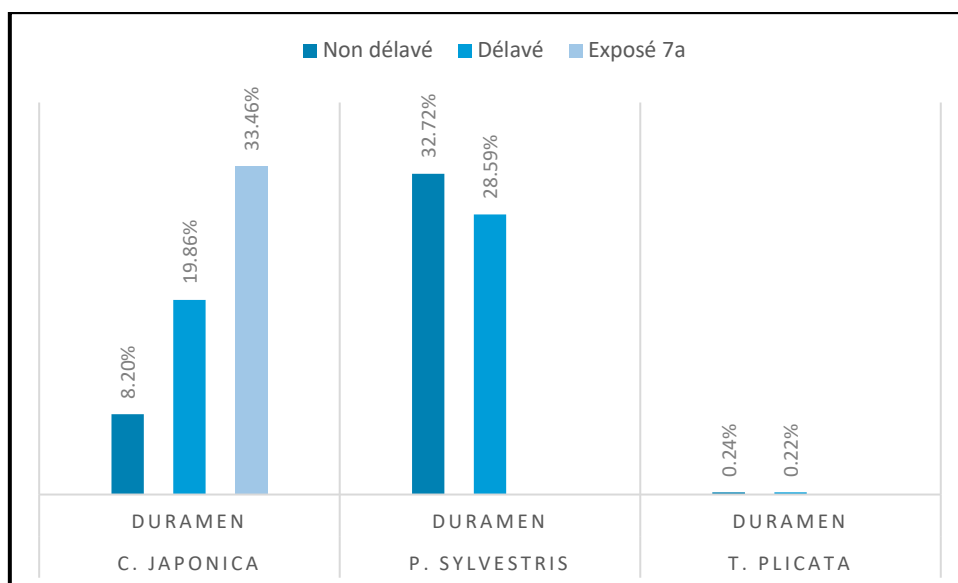


Figure 12. Effet du délavage et de l'exposition naturelle sur la perte de masse moyenne (%) des éprouvettes soumises à *Poria placenta*

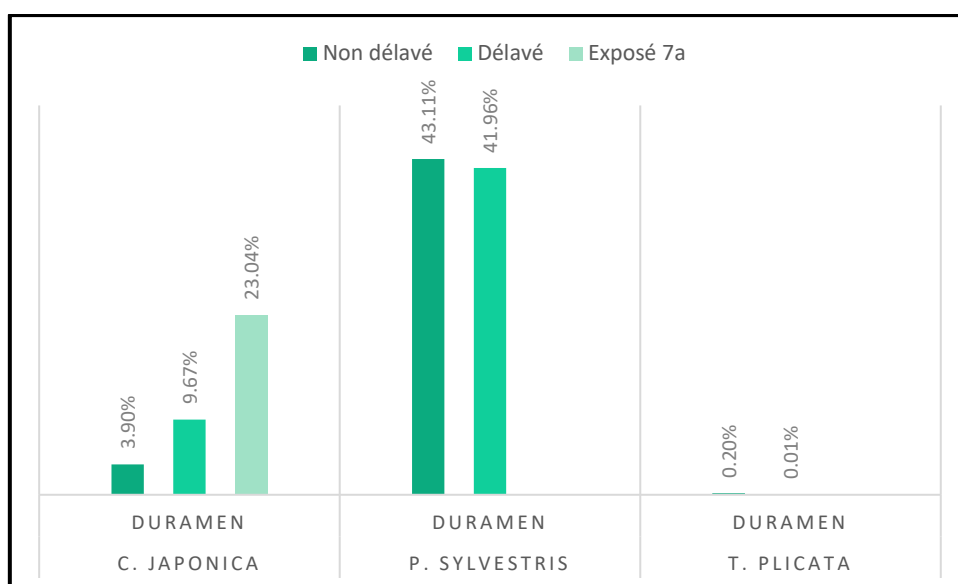


Figure 13. Effet du délavage et de l'exposition naturelle sur la perte de masse moyenne (%) des éprouvettes soumises à *C. puteana*

Les éprouvettes de Pin Sylvestre et de Red Cedar, soumises à *P. placenta*, présentent le même degré d'attaque, avec et sans épreuve de délavage. La perte de masse est cependant significativement moindre pour les éprouvettes d'aubier de Pin Sylvestre et de duramen de Red Cedar soumises à *C. puteana*.

Détermination du champignon le plus discriminant

Comme pour les éprouvettes non délavées, *P. placenta* provoque des attaques plus importantes que *C. puteana* sur les éprouvettes de duramen de Cryptoméria délavées et exposées 7 ans, ainsi que sur les éprouvettes de duramen de Red Cedar délavées. *P. placenta* est donc le champignon le plus discriminant pour ces deux essences.

Le duramen de Pin Sylvestre délavé est quant à lui plus sensible à *C. puteana*, qui est donc le champignon le plus discriminant pour cette essence.

Détermination de la durabilité naturelle résiduelle des 3 essences

La durabilité naturelle inhérente et résiduelle des trois essences à l'étude, après délavage ou exposition en condition d'emploi 3.2 pendant 7 ans (pour le Cryptoméria) a été évaluée selon les dispositions prévues dans la norme EN 350 (2016). Ainsi, si on prend en compte le champignon le plus discriminant, soit *P. placenta* pour *C. japonica* et *T. plicata*, et *C. puteana* pour *P. sylvestris*, on obtient la classification suivante pour les éprouvettes ayant subi un délavage artificiel en laboratoire (tableau 17) :

- **Le Cryptoméria délavé est classé « Faiblement Durable » (DC4)**
- **Le Red Cedar délavé est classé « Très Durable » (DC1)**
- **Le Pin Sylvestre délavé est classé « Non Durable » (DC5)**

Le Cryptoméria, après exposition en classe d'emploi 3.2 pendant 7 années, présentent une durabilité encore moindre :

- **Le Cryptoméria exposé pendant 7ans est classé « Non Durable » (DC 5)**

Tableau 17. Détermination de la classe de durabilité (DC) de chaque essence après délavage ou exposition naturelle (selon la norme EN 350 (2016))

		Nb.	Moy. (%)	Ecart Type (%)	Min. (%)	Max. (%)	Médiane (%)	DC
Poria placenta	<i>C. japonica</i>	60	19.86%	5.96%	3.67%	34.04%	20.84%	DC4
	<i>T. plicata</i>	30	0.22%	0.25%	0.00%	0.99%	0.17%	DC1
	<i>P. sylvestris</i>	30	28.59%	6.30%	16.35%	47.20%	28.92%	DC4
Coniophora puteana	<i>C. japonica</i>	60	9.67%	9.91%	0.00%	42.00%	5.89%	DC2
	<i>T. plicata</i>	30	0.01%	0.02%	0.00%	0.11%	0.00%	DC1
	<i>P. sylvestris</i>	30	41.96%	17.89%	2.21%	63.46%	48.68%	DC5
P. placenta	<i>C. japonica</i> exposé 7 ans	30	33.46%	5.38%	17.33%	43.76%	33.88%	DC5
C. puteana		30	23.04%	9.88%	1.28%	43.50%	25.20%	DC4

Le délavage a donc un effet sur la durabilité naturelle du Cryptoméria ; lequel est classé « Durable » (DC 2) sans délavage et « Faiblement Durable » après épreuve de délavage (DC 4). De plus, cette essence est classée « Non Durable » après exposition en condition d'emploi 3.2 pendant 7 ans (DC 5).

Le niveau de durabilité des deux autres essences de bois reste quant à lui identique, avec et sans épreuve de délavage.

Pour plus de précisions sur la durabilité naturelle des trois essences après épreuves de délavage, une répartition des valeurs individuelles de perte de masse des éprouvettes de duramen des 3 essences de bois dans les différentes classes de durabilité a été réalisée, selon le champignon le plus discriminant pour chaque essence (Tableau 18).

Tableau 18. Répartition des valeurs individuelles de perte de masse des éprouvettes de duramen des 3 essences de bois dans les différentes classes de durabilité (selon le champignon le plus discriminant) après délavage et exposition naturelle

Champignon	Essence	Epreuve	Nb	DC1	DC2	DC3	DC4	DC5	CLASSE DE DURABILITE
P. placenta	<i>C. japonica</i>	Délavé	60	2%	2%	18%	77%	2%	4
		Exposé 7a	30	0%	0%	0%	20%	80%	5
	<i>T. plicata</i>	Délavé	30	100%	0%	0%	0%	0%	1
C. puteana	<i>P. sylvestris</i>	Délavé	30	3%	7%	7%	7%	77%	5

La répartition des valeurs confirme le résultat du classement réalisé en prenant en compte la médiane (Tableau 17).

On remarque cependant que la forte variabilité dans les résultats, mise en évidence sur le duramen de Cryptoméria non délavé, n'est pas observée ici. En effet, 77% des éprouvettes se répartissent dans la classe de durabilité 4 et 18% dans la classe 3.

4.1.2. Durabilité face aux termites souterrains

4.1.2.1. Durabilité face aux termites souterrains *Coptotermes gestroi* de la Réunion

Les résultats des essais permettant de déterminer la durabilité naturelle des trois essences de bois sont présentés dans la figure 14 et les tableaux 19 et 20.

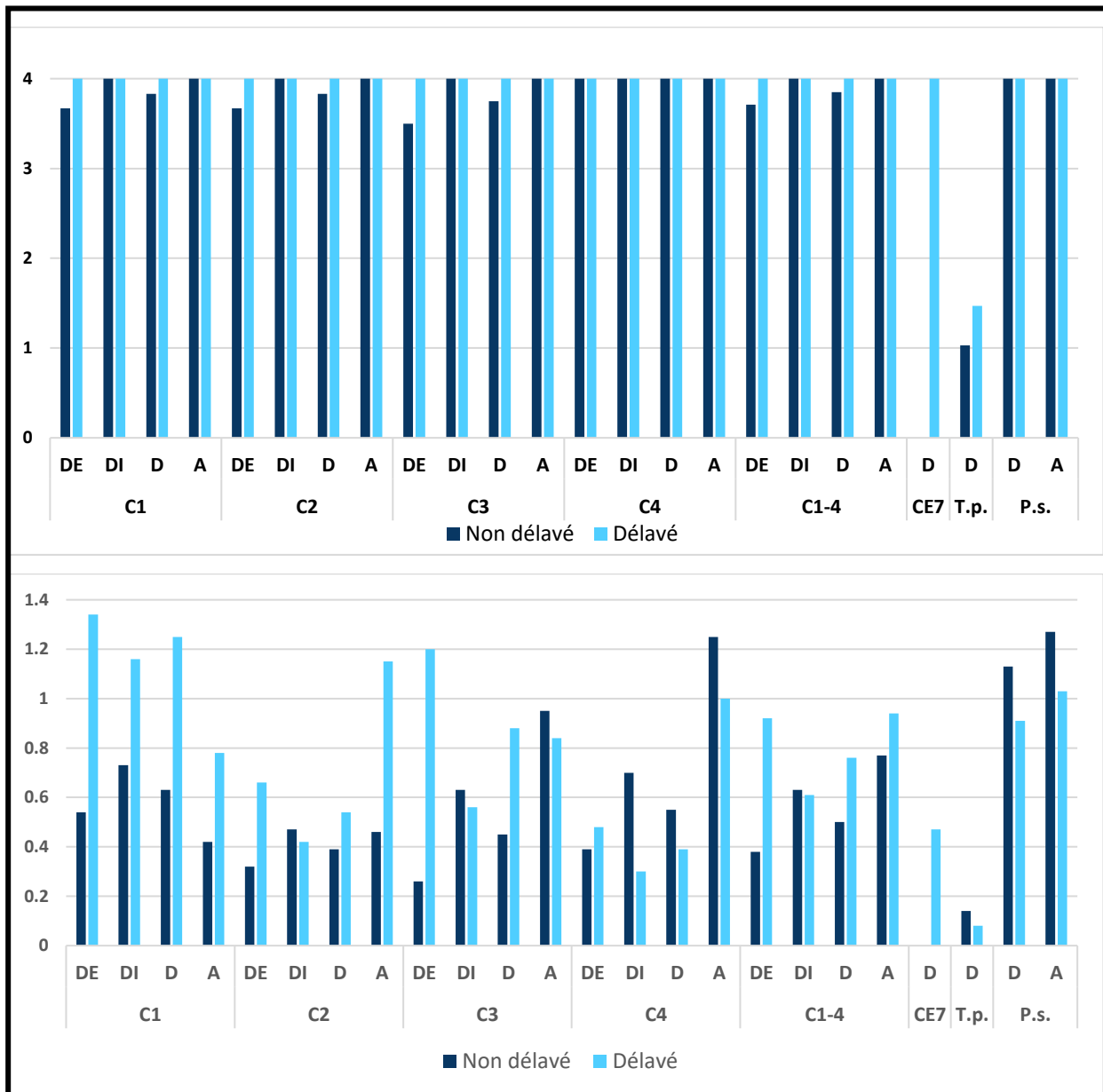


Figure 14. Moyenne des cotations (en haut) et des pertes de masse en grammes (en bas) des éprouvettes avant et après délavage ou exposition naturelle, selon la zone de prélèvement, après mise en présence du termite souterrain *C. gestroi*
 (D = Duramen – DE – Duramen Externe – DI = Duramen Interne – A = Aubier)
 (C = Cryptoméria – CE7 = Cryptoméria exposé 7 ans – T.P. = *Thuya plicata* – P.s. = *Pinus sylvestris*)

Tableau 19. Perte de masse anhydre, cotation et taux de mortalité des ouvriers après mise en présence du termite souterrain *C. gestroi* des éprouvettes non délavées selon la zone de prélèvement

Essence	Arbre	Zone	Nb	Perte de masse Anhydre (g)		Cotation		Mortalité des Ouvriers (%)	
				Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
<i>C. japonica</i>	1	DE	6	0.54	0.33	3.67	0.47	53.73	6.72
		DI	6	0.73	0.30	4.00	0.00	69.53	19.71
		D	12	0.63	0.33	3.83	0.37	61.63	16.71
		A	6	0.42	0.07	4.00	0.00	74.00	13.33
	2	DE	6	0.32	0.12	3.67	0.47	75.00	13.65
		DI	6	0.47	0.33	4.00	0.00	61.80	11.13
		D	12	0.39	0.26	3.83	0.37	68.40	14.10
		A	6	0.46	0.14	4.00	0.00	74.87	16.55
	3	DE	6	0.26	0.37	3.50	0.50	68.93	15.71
		DI	6	0.63	0.53	4.00	0.00	60.67	8.43
		D	12	0.45	0.50	3.75	0.43	64.80	13.27
		A	6	0.95	0.66	4.00	0.00	82.53	11.22
	4	DE	6	0.39	0.08	4.00	0.00	70.20	7.77
		DI	6	0.70	0.17	4.00	0.00	74.53	6.25
		D	12	0.55	0.20	4.00	0.00	72.37	7.37
		A	6	1.25	0.32	4.00	0.00	67.40	8.13
1 à 4	DE	24	0.38	0.28	3.71	0.45	66.97	14.08	
	DI	24	0.63	0.37	4.00	0.00	66.63	13.71	
	D	48	0.50	0.35	3.85	0.35	66.80	13.90	
	A	24	0.77	0.51	4.00	0.00	74.70	13.77	
<i>T. plicata</i>	-	D	30	0.14	0.11	1.03	1.38	100.00	0.00
<i>P. sylvestris</i>	-	D	30	1.13	0.27	4.00	0.00	77.29	14.12
		A	30	1.27	0.30	4.00	0.00	50.33	8.03

Tableau 20. Perte de masse anhydre, cotation et taux de mortalité des ouvriers après mise en présence du termite souterrain *C. gestroi* des éprouvettes délavées ou exposées naturellement selon la zone de prélèvement

Essence	Arbre	Zone	Nb	Perte de masse anhydre (g)		Cotation		Mortalité des ouvriers (%)	
				Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
<i>C. japonica</i>	1	DE	6	1.34	0.19	4.00	0.00	64.80	6.88
		DI	6	1.16	0.56	4.00	0.00	74.60	12.24
		D	12	1.25	0.42	4.00	0.00	69.70	11.07
		A	6	0.78	0.05	4.00	0.00	73.80	8.06
	2	DE	6	0.66	0.40	4.00	0.00	91.00	9.56
		DI	6	0.42	0.10	4.00	0.00	96.60	7.60
		D	12	0.54	0.31	4.00	0.00	93.80	9.08
		A	6	1.15	0.74	4.00	0.00	79.80	24.04
	3	DE	6	1.20	0.20	4.00	0.00	69.13	4.55
		DI	6	0.56	0.31	4.00	0.00	91.20	9.96
		D	12	0.88	0.41	4.00	0.00	80.17	13.48
		A	6	0.84	0.05	4.00	0.00	90.87	9.90
	4	DE	6	0.48	0.11	4.00	0.00	88.93	9.68
		DI	6	0.30	0.14	4.00	0.00	85.27	9.80
		D	12	0.39	0.16	4.00	0.00	87.10	9.91
		A	6	1.00	0.13	4.00	0.00	58.33	9.48
1 à 4	DE	24	0.92	0.44	4.00	0.00	78.47	14.09	
	DI	24	0.61	0.47	4.00	0.00	86.92	12.94	
	D	48	0.76	0.48	4.00	0.00	82.69	14.17	
	A	24	0.94	0.41	4.00	0.00	75.70	18.59	
<i>C. japonica</i>	Exposé 7a	D	30	0.47	0.32	4.00	0.00	99.27	2.26
<i>T. plicata</i>	-	D	30	0.08	0.07	1.47	0.07	100.00	0.00
<i>P. sylvestris</i>	-	D	30	0.91	0.44	4.00	0.00	62.90	14.18
		A	12	1.03	0.42	4.00	0.42	40.33	7.43

Durabilité des éprouvettes selon le résultat de cotation des dégâts

Les éprouvettes témoins de virulence non traitées (aubier de Pin Sylvestre) présentent une attaque de niveau 4 à l'examen visuel et les colonies correspondantes ont au moins 50 % de survivants. Les essais sont donc valides au sens de la norme EN 117 (2013).

La moyenne des cotations des éprouvettes d'aubier de Cryptoméria non délavées sont toutes égales à 4, comme c'est le cas pour le duramen de Pin Sylvestre. Les éprouvettes de duramen du Cryptoméria non délavées présentent une cotation moyenne de 3.85 avec des valeurs comprises en moyenne entre 3.65 et 4 selon les arbres Ce qui démontre la sensibilité de ces deux essences face aux attaques de *Coptotermes gestroi*.

Le bois de Red Cedar non délavé présente une moyenne de cotation égale à 1.03, indiquant une durabilité moyenne.

La classe de durabilité des trois essences de bois étudiées vis-à-vis de *C. gestroi*, déterminée selon les critères de la norme EN 350 (2016) est présentée dans le tableau 21 :

- **Le Cryptoméria est « Sensible » à *C. gestroi***
- **Le Red Cedar est « Moyennement Durable » face à *C. gestroi***
- **Le Pin Sylvestre est « Sensible » à *C. gestroi***

Tableau 21. Répartition des éprouvettes de duramen non délavées dans les différentes classes de cotation et détermination de la durabilité naturelle des 3 essences de bois

Essence	Nb	Nombre d'éprouvettes par cotation (%)					Classe de durabilité
		Cotation 0	Cotation 1	Cotation 2	Cotation 3	Cotation 4	
<i>C. japonica</i>	48	0.00	0.00	0.00	14.58	85.42	SENSIBLE
<i>T. plicata</i>	30	60.00	6.67	6.67	23.33	3.33	MOYENNEMENT DURABLE
<i>P. sylvestris</i>	30	0.00	0.00	0.00	0.00	100	SENSIBLE

Influence du délavage et de l'exposition naturelle en classe d'emploi 3.2

Le bois de Cryptoméria, après délavage, présente une moyenne d'attaque plus importante (cotation moyenne égale 4, contre cotation moyenne égale à 3.85 sans délavage). Le délavage augmente donc le degré d'attaques moyen provoqué par *C. gestroi*, bien que cette différence ne soit pas statistiquement significative (ANOVA à 5%) et n'influe pas sur son classement et donc sa performance. Ce résultat est visible également sur les éprouvettes exposées en classe d'emploi 3.2 pendant 7 ans.

Les éprouvettes de Pin Sylvestre sont cotées en moyenne 4 après épreuve de délavage, comme les éprouvettes non délavées.

Enfin, les éprouvettes de Red Cedar, connaissent un degré d'attaque à peine supérieur après délavage (cotation moyenne 1.47 contre 1.03) sans que la différence ne soit statistiquement significative (ANOVA à 5%).

Une répartition des éprouvettes de duramen délavées dans les différentes classes de cotation a été réalisée afin de déterminer leur durabilité après délavage selon EN 84 et exposition pendant 7 ans en classe d'emploi 3.2 (Tableau 21).

Tableau 22. Répartition des éprouvettes de duramen délavées ou exposées naturellement dans les différentes classes de cotation et détermination de la durabilité naturelle des trois essences de bois

Essence	Epreuve	Nb	Nombre d'éprouvettes par cotation (%)					Classe de durabilité
			Cotation 0	Cotation 1	Cotation 2	Cotation 3	Cotation 4	
<i>C. japonica</i>	Délavés selon EN 84	48	0	0	0	0	100	SENSIBLE
<i>T. plicata</i>		30	43.33	13.33	6.67	26.67	10	MOYENNEMENT DURABLE
<i>P. sylvestris</i>		30	0	0	0	0	100	SENSIBLE
<i>C. japonica</i>	Exposé 7 ans en classe d'emploi 3.2	30	0	0	0	0	100	SENSIBLE

Selon cette classification, le résultat global ne change pas pour les trois essences. En revanche, il est plus franc pour le Cryptoméria, dont toutes les éprouvettes sont cotées 4. Concernant le Red Cedar, le nombre d'éprouvettes cotées « 4 » est plus important (1 éprouvette non délavée versus 3 éprouvettes délavées). Au total, 6 éprouvettes ont été prélevées dans chaque planche de Red Cedar utilisées (3 non délavées et 3 délavées). Les 4 éprouvettes cotées « 4 » proviennent toutes de la planche 1. Les deux autres étant notées 3. Cette planche est donc particulièrement sensible à *C. gestroi*.

Taux de mortalité des termites en fin d'essai

Le taux de mortalité des ouvriers de termites dans les dispositifs comprenant du Cryptoméria non délavé est particulièrement élevé (en moyenne 74.70% pour l'aubier et 66.80% pour le duramen). Ces taux augmentent après délavage des éprouvettes (75.70% pour l'aubier et 82.69% pour le duramen). Ce qui est assez paradoxal. La différence n'est statistiquement significative (ANOVA à 5%) qu'entre les éprouvettes de duramen. Enfin, la mortalité dans les dispositifs contenant les éprouvettes de duramen de Cryptoméria exposé pendant 7 ans en classe d'emploi 3.2 est presque totale (99,27%) et statistiquement supérieure à celle du duramen de Cryptoméria délavé selon EN 84 (ANOVA à 5%).

On observe donc un gradient dans le taux mortalité dans les dispositifs contenant du duramen entre le Cryptoméria non délavé, le Cryptoméria délavé et le Cryptoméria exposé 7 ans en classe d'emploi 3.2.

Concernant le Pin Sylvestre la différence observée entre les éprouvettes non délavées (en moyenne 50.33% pour l'aubier et 77.29% pour le duramen) et délavée (en moyenne 40.33% pour l'aubier et 62.90% pour le duramen) n'est pas statistiquement significative (ANOVA à 5%).

Enfin, la mortalité des ouvriers de termite est totale dans les dispositifs comprenant des éprouvettes de duramen de Red Cedar, qu'ils soient délavés ou non. Cette mortalité totale intervient avant la fin de la deuxième semaine de mise en présence.

Durabilité des éprouvettes selon le résultat de perte de masse

La perte de masse est une donnée additionnelle qui n'est pas évaluée dans l'EN 117 (2013) et non nécessaire à la classification selon la norme EN 350 (2016). La perte de masse est évaluée en grammes car elle est inféodée au nombre de termites en présence dans le dispositif.

Les résultats de perte de masse permettent de mieux comparer les résultats obtenus sur les différents essences et zone de bois (Fig. 15 – Tableau 23). Ainsi, sans épreuve de délavage ou exposition en classe d'emploi 3.2, la moyenne de perte de masse des éprouvettes de duramen de Red Cedar (0,14g) est significativement inférieure à celle de duramen de Cryptoméria (0,50g), celles-ci étant significativement inférieure à celle de duramen de Pin Sylvestre (1,13g) (ANOVA à 5%).

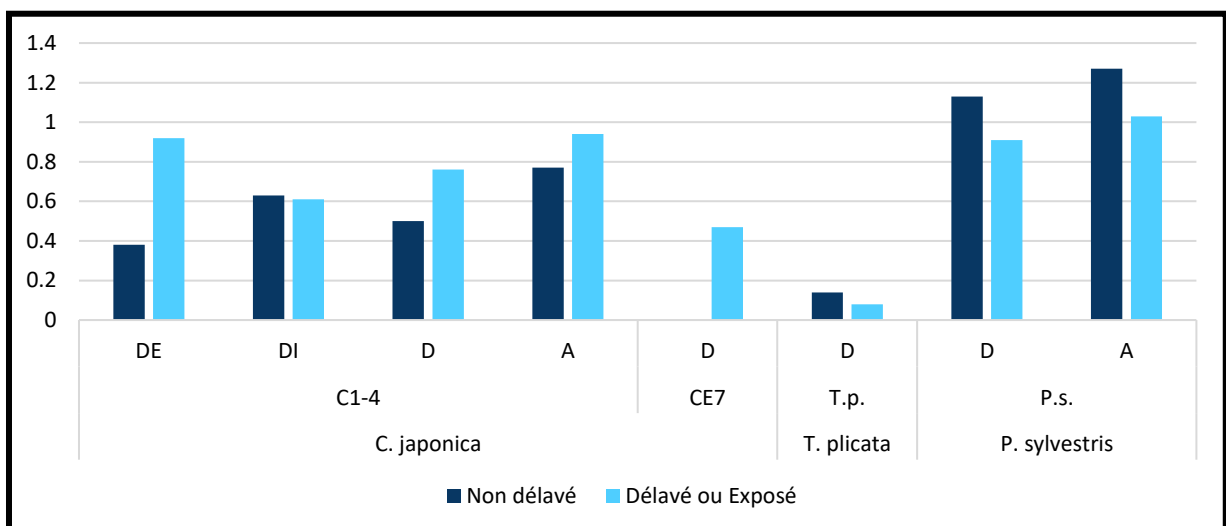


Figure 15. Perte de masse (g) des éprouvettes sans délavage et avec délavage ou exposition naturelle

Le délavage des éprouvettes de Cryptoméria induit une perte de masse plus importante pour le duramen externe, le duramen et l'aubier, cependant, seule la différence observée dans le duramen externe est significative (ANOVA à 5%).

Tableau 23. Moyenne de la perte de masse (g) des éprouvettes selon leur cotation visuelle

Cotation	<i>C. japonica</i>		<i>P. sylvestris</i>		<i>T. plicata</i>
	Aubier	Duramen	Aubier	Duramen	Duramen
0	-	-	-	-	0.05
1	-	-	-	-	0.10
2	-	-	-	-	0.18
3		0.16	-	-	0.17
4	0.86	0.67	1.15	1.02	0.26

Corrélation entre la cotation visuelle et la perte de masse

Une étude de la corrélation des données de perte de masse avec celles de cotation visuelle a été réalisée (Fig. 16). Il n'existe pas de corrélation entre ces données. En effet, comme observé sur le graphique, il existe une tendance générale car les valeurs les plus élevées de perte de masse correspondent bien à la plus forte cotation (4). Cependant, des éprouvettes ayant une faible perte de masse (presque nulle) sont cotées 4 (Annexe C).

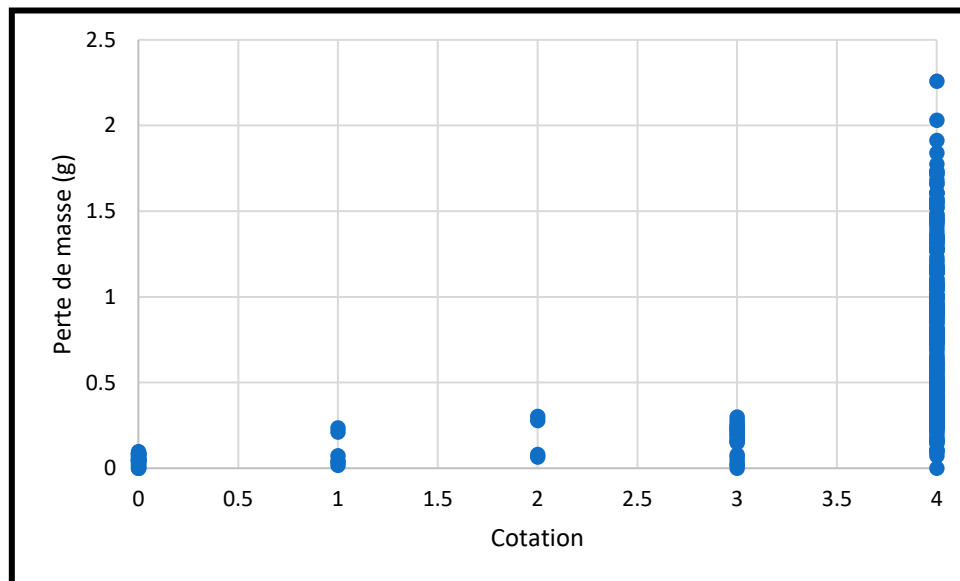


Figure 16. Corrélation entre la perte de masse des éprouvettes et la cotation visuelle

4.1.2.2. Durabilité face aux termites souterrains *Reticulitermes flavipes*

Les éprouvettes témoins de virulence non traitées (aubier de Pin Sylvestre) présentent une attaque de niveau 4 à l'examen visuel et les colonies correspondantes ont au moins 50 % de survivants. Les essais sont donc valides au sens de la norme EN 117 (2013).

Les éprouvettes d'aubier de Cryptoméria soumises aux attaques du termite souterrain *R. flavipes* sont fortement attaquées et présentent une cotation moyenne égale à 4 (Tableau 24 – Fig. 17). Le degré d'attaque est presque autant important sur les éprouvettes de duramen non délavées (en moyenne 3.33) ou délavées (en moyenne 3.69). Le délavage induisant un degré d'attaque supérieur sans que cette différence ne soit statistiquement significative (ANOVA à 5%).

Tableau 24. Cotation des éprouvettes non délavées et taux de mortalité des termites après mise en présence du termite souterrain *R. flavipes*, selon la zone de prélèvement des éprouvettes (DE : Duramen Externe – DI : Duramen Interne – D : Duramen – A : Aubier)

Essence	Zone	NON DELAVE				DELAVE			
		Nb	Cotation		Taux de mortalité des ouvriers (%)	Nb	Cotation		Taux de mortalité des ouvriers (%)
			Moyenne	Ecart-type			Moyenne	Ecart-type	
<i>C. japonica</i>	A	12	4	0	88.97	12	4	0	87.93
	DE	9	3.11	0.87	100	14	3.57	0.73	100
	DI	11	3.45	0.78	100	12	3.83	0.37	100
	D	20	3.33	0.84	100	26	3.69	0.60	100
<i>P. sylvestris</i> (Témoins)	A	17	4	0	44.94				

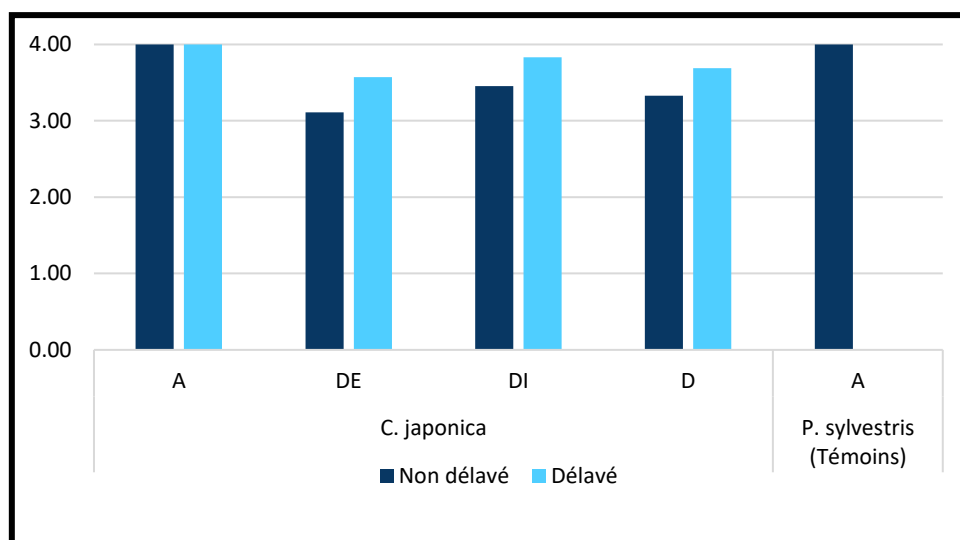


Figure 17. Moyenne des cotations des éprouvettes avant et après selon la zone de prélèvement après mise en présence du termite souterrain *R. flavipes* (D = Duramen – DE – Duramen Externe – DI = Duramen Interne – A = Aubier)

Ainsi, la répartition des éprouvettes de duramen de *C. japonica* dans les différentes classes de cotation permet de déterminer que le duramen de Cryptoméria est « Sensible » au termite *R. flavipes* avec une certaine variabilité (Tableau 25) qui est moins présente après délavage.

Tableau 25. Répartition des éprouvettes de duramen de *C. japonica* délavées dans les différentes classes de cotation et détermination de la durabilité naturelle face à *R. flavipes*

<i>C. japonica</i>	Nb	% d'éprouvettes ayant la cotation indiquée ci-dessous					Classe de Durabilité
		Cotation 0	Cotation 1	Cotation 2	Cotation 3	Cotation 4	
Non délavé	20	0	0	25%	20%	55%	SENSIBLE
Délavé	26	0	0	8%	15%	77%	SENSIBLE

Il est à noter que la mortalité des ouvriers est totale dans les dispositifs comprenant du duramen (non délavé et délavés) et inférieure à 20% dans les dispositifs comprenant de l'aubier (Tableau 24).

4.2. Discussion sur la durabilité naturelle face aux champignons et aux termites

Durabilité face aux champignons Basidiomycètes

Les résultats des essais réalisés sur *Cryptoméria japonica* de La Réunion confirment les résultats globaux obtenus par Kutnik *et al.* (2012). En effet, la perte de masse médiane des éprouvettes de duramen de cette essence face à *P. placenta*, champignon le plus discriminant correspond à 7.82%, ce qui induit le classement de cette essence dans la classe de durabilité DC2 « Durable ».

La variabilité de cette essence a déjà été mise en évidence pour le *Cryptoméria* de La Réunion (Kutnik *et al.*, 2012) et issus d'autres zones géographiques (Matsuoka *et al.* 1970 ; Tewari, 1978 ; Scheffer et Morrel, 1998, Yamamoto *et al.*, 2004). Cependant, du fait de notre très large échantillonnage, nos travaux permettent de mieux explorer cette variabilité.

Du point de vue de nos résultats, les valeurs individuelles de perte de masse des éprouvettes de duramen non délavées après mise en présence de *P. placenta*, champignon le plus discriminant sont réparties entre 0% et 35.94%. L'écart type (6.04%) est donc presque équivalent à la moyenne (8.20%). Aussi, la répartition des valeurs individuelles de perte de masse des éprouvettes de duramen de cette essence dans les différentes classes de durabilité ne permet pas de déterminer la classification de cette essence puisque celles-ci sont réparties dans les 5 classes de durabilité, avec des taux importants dans les classes 1, 2 et 3 (respectivement 37%, 32% et 22%). La norme EN 350 (2016) prévoit de définir la classe de durabilité dans un intervalle « x-y » lorsqu'au moins 40% des valeurs sont comprises dans la classe x et au moins 40% dans la classe y. Ce qui n'est pas le cas ici. Il est à noter que cette répartition n'avait pas été réalisée par Kutnik *et al.* en 2012 car ces dispositions n'étaient pas prévues dans la version antérieure de la norme EN 360 (1996).

Cette étude met en évidence la nécessité de revoir les dispositions prévues dans cette norme afin que celles-ci soient applicables à tout type de résultats. Il est proposé ici de prendre en compte toutes les classes de durabilité comprenant au moins 20% des valeurs individuelles et de définir la classe de durabilité dans un intervalle «x-y», « x » étant la classe de durabilité la plus faible et « y » étant la plus forte. Ainsi, dans notre étude, la durabilité naturelle du *C. japonica* issus de la Réunion serait indiquée « DC1-DC3 », faisant ainsi apparaître clairement la forte variabilité.

Cette variabilité a une incidence sur la détermination de la performance de cette essence : en effet, l'étude démontre que les planches provenant de l'arbre 1 correspondent à une durabilité moyenne (DC3) alors que les planches prélevées dans les trois autres arbres sont durables (DC2). Ainsi, si on se réfère à la norme EN 460 (2020), les planches de duramen issues de l'arbre 1 présenteraient une durabilité naturelle suffisante pour une utilisation en classes d'emploi 3.1 et 3.2 alors que pour

les planches issues des arbres 2, 3 et 4, il peut être recommandé de recourir à la durabilité conférée (traitement de préservation ou modification du bois) ou à l'amélioration des performances (par exemple au travers d'une finition ou à la conception) pour certains usages dans la classe d'emploi 3.2.

Dans l'étude de Kutnik *et al.* (2012), les auteurs avaient émis l'hypothèse que cette forte variabilité pourrait avoir été causée par la présence, parmi les échantillons à l'essai, de portions de bois juvénile ou de transition, qui peuvent être difficiles à distinguer visuellement du duramen et dont la durabilité peut être beaucoup plus faible, comme démontré ici (l'aubier étant classé DC5). Dans nos travaux, les éprouvettes de duramen ont été prélevées avec soin afin de s'exonérer de cette hypothèse, et, de surcroît, la durabilité a été évaluée en distinguant le duramen interne du duramen externe. La comparaison des moyennes de perte de masse des éprouvettes issues de ces deux zones ne présentant pas une différence significative.

La durabilité naturelle du *Cryptoméria* de La Réunion est tout de même supérieure à celle observée dans les arbres issus d'Asie du Sud Est ou d'Europe, classés non durable (DC5) selon la norme EN 350 (2016). La variabilité des niveaux de durabilité naturelle dépend de nombreux facteurs tels que l'origine et l'âge des arbres, qui influencent la nature et la quantité de métabolites secondaires présents dans le bois de cœur (Cheng *et al.* 2005). L'âge des arbres dans notre étude étant la même pour tous les arbres, on peut ici émettre l'hypothèse que la plus grande durabilité des arbres de la Réunion provient de leur origine, en lien avec les conditions pédoclimatiques du territoire. Cependant, aucun enregistrement n'a été retrouvé quant à l'origine des arbustes introduits en 1874 et des clones utilisés dès 1853 pour constituer les peuplements que l'on trouve aujourd'hui sur le territoire réunionnais. Cette hypothèse rejoindrait les conclusions de Yamamoto *et al.* (2004) sur l'origine génétique de la durabilité du *Cryptoméria*. Il conviendrait donc, dans le cadre de la production de clones, de sélectionner les arbres présentant une durabilité déjà avérée.

Les deux autres essences de bois utilisées dans nos travaux, le Pin Sylvestre et le Red Cedar, permettent de réaliser une analyse comparative. En effet, la variabilité dans leur durabilité face aux champignons Basidiomycètes est beaucoup moindre : le duramen de *Pinus sylvestris* est non durable ; 80% des valeurs de perte de masse individuelles des 30 éprouvettes testées sont comprises dans la classe de durabilité DC5. Les autres se répartissent dans les classes 2, 3 et 4. Le duramen de *Thuja plicata* est très durable ; 100% des valeurs de perte de masse individuelles des 30 éprouvettes testées sont comprises dans la classe de durabilité DC1.

Pour ces deux essences, les dispositions de classement prévues dans la norme EN 350 (2016) s'appliquent sans difficultés et les résultats concordent avec ceux indiqués dans cette norme. Cependant, le fascicule de documentation FD P20-651 (2011) indique que le Pin Sylvestre a une longévité comprise entre 10 ans et 50 ans lorsqu'il est mis en œuvre en classes d'emploi 3.1 et 3.2. Cependant, si on se réfère aux préconisations de la norme EN 460 (2023) (Fig. 3 – Tableau C), sa durabilité naturelle

peut s'avérer suffisante en classe d'emploi 3.1 mais il peut être nécessaire de recourir à la durabilité conférée ou à l'amélioration des performances pour certains usages, et surtout, en classe d'emploi 3.2, il est recommandé de recourir à la durabilité conférée. Il convient donc de modérer les préconisations de ce fascicule de documentation concernant cette essence.

Effet du délavage selon EN 84 (1997) et de l'exposition naturelle en classe d'emploi 3.2

Les résultats mettent en évidence que le délavage en laboratoire (EN 84, 1997) n'a pas d'incidence sur la perte de masse des éprouvettes de duramen de Pin Sylvestre et de Red Cedar, quel que soit le champignon concerné et non plus sur leur performance (respectivement classés DC5 et DC1 comme les éprouvettes non délavées).

Cependant, le délavage en laboratoire exerce une influence significative sur la perte de masse des éprouvettes de duramen de Cryptoméria et donc sur la performance de cette essence qui serait ainsi utilisable uniquement dans les classes d'emploi 1 et 2, voire 3, selon les dispositions de la norme EN 460 (2023).

L'exposition naturelle du duramen de Cryptoméria en classe d'emploi 3.2 pendant 7 ans induit une performance encore moindre, puisqu'il serait utilisable, ainsi, uniquement dans la classe d'emploi 1, voire 2, selon les dispositions de cette même norme. Il est important de noter ici que la durée de 7 ans est une durée faible, au vu des assurances données dans le cadre de la construction (assurance décennale) et surtout de la durabilité attendue par les acteurs de la construction.

Peu d'études ont été réalisées afin de mesurer les effets du vieillissement en laboratoire selon la norme EN 84 et l'exposition naturelle, sur la durabilité naturelle du bois massif face aux champignons Basidiomycètes. Dans un essai circulaire réalisé par 5 laboratoires (Brischke *et al.*, 2013), des résultats similaires ont été démontrés sur le duramen de 4 essences de bois (*Pinus sylvestris*, *Robinia pseudoacacia*, *Quercus robur* et *Fagus sylvatica*) face à *Coniophora puteana*. Cependant, dans cette étude, ce sont des éprouvettes normalisées (50x25x15 mm³, L,R,T) qui ont été exposées pendant 6 mois en condition d'emploi 3.2 (en Allemagne à Hannover-Herrenhausen) et non pas des planches de bois comme dans nos travaux. Ainsi, si on ne prend en compte, dans cette étude, que les résultats des essais « valides » selon la norme EN 113-2 (2020), on observe que pour les essences non durables (*Pinus sylvestris* et *Fagus sylvatica*), la performance est la même sans pré-traitement ou avec délavage ou exposition naturelle, alors que pour les essences réputées durables, *Robinia pseudoacacia* et *Quercus robur*, l'exposition naturelle provoque une perte de performance significative par rapport au lessivage en laboratoire. Il est à noter ici que la durabilité naturelle de *Quercus robur* présente aussi variabilité avérée (EN 350, 2016).

Dans une autre étude, Se Golpayegani *et al.* (2010) démontrent que la durabilité du duramen de *Morus alba*, essence très durable, n'est pas influencée par le délavage selon EN 84 (1997).

Ainsi, les résultats de nos travaux, confortés par les travaux résumés ci-avant, indiquent que le prétraitement des éprouvettes par délavage avant essai face aux champignons Basidiomycètes n'est pas utile dans le cas d'essences de bois non durables, comme le Pin Sylvestre, dans lesquelles il n'y a certainement pas de molécules (lessivables) limitant leur dégradation par les champignons.

Cependant, une épreuve de pré-altération devrait être imposée dans le système de normalisation afin de mieux qualifier la performance des essences de bois présentant une grande variabilité, comme c'est le cas pour le Cryptoméria ou encore le chêne rouvre (*Quercus robur*). Les résultats de notre étude sur le Cryptoméria, mettent en évidence que les effets du délavage en laboratoire selon EN 84 (1997) sont moindres par rapport à l'exposition naturelle pendant 7 ans en classe d'emploi 3.2. Ce qui suggère que le protocole de délavage décrit dans la norme EN 84 (1997) correspond à un degré d'altération moindre par rapport à celui d'une exposition naturelle des planches, avant découpe en éprouvettes, pendant 7 années en situation d'emploi 3.2. Dans l'étude réalisée par Brischke *et al.* (2013), l'exposition des éprouvettes normalisée pendant 6 mois en classe d'emploi 3.2 provoque également une altération plus importante face au champignon *C. puteana* que celle observée après lessivage en laboratoire.

Il conviendrait donc de revoir les dispositions du protocole décrit dans la norme EN 84 (1997) en prévoyant un nombre de cycles de délavages plus important et/ou l'application d'une pression plus importante ; ceci afin que ce délavage corresponde à une exposition naturelle supérieure à 10 ans.

De plus, le protocole décrit dans la norme EN 84 (1997) ne concerne que le délavage, alors que dans le cadre de l'exposition naturelle, le bois est soumis à une combinaison de différents facteurs complémentaires comme l'évaporation, l'exposition aux UV et l'activité microbienne (moisissures notamment), comme décrit par Brown et Williams (1992).

Aussi, il conviendrait donc de simuler ces différents facteurs en laboratoire. Dans le système normatif européen, il existe une méthode d'essai concernant l'évaporation accélérée (EN 73, 2020) utilisé sur des éprouvettes traitées avant essais biologiques et un protocole concernant l'exposition aux UV (EN 927-6, 2018) utilisé dans le cadre de l'évaluation de la durabilité des produits de revêtement. Cependant, la réalisation des épreuves les unes après les autres ne permet pas de simuler la complémentarité des facteurs et surtout, il apparaît délicat de simuler une exposition microbienne en laboratoire.

Une autre option, qui permettrait de traiter tous ces aspects, et qui est fortement recommandée ici, consisterait à exposer naturellement les éprouvettes déjà découpée afin de limiter la durée d'exposition. Ceci avec des modalités (site et mode d'exposition, durée) qui restent à définir plus précisément en fonction de l'allocation géographique future envisagée pour le bois.

Durabilité face aux termites souterrains

La durabilité d'une essence de bois face aux termites est un élément à prendre en compte pour une mise en œuvre de cette essence dans une zone géographique où ces insectes sont présents. La réglementation française exige que les éléments en bois participant à la solidité de la structure soient résistants pendant au moins 10 ans (Loi 99-471 du 8 juin 1999 ; Décret 2006-591 du 23 mai 2006 ; Code de la construction). A cet effet, doivent être mis en œuvre pour les éléments participant à la solidité des structures, soit des bois naturellement résistants aux insectes ou des bois ou matériaux dérivés dont la durabilité a été renforcée par traitement.

Notre étude démontre que le Cryptoméria de La Réunion est sensible aux deux espèces de termites utilisés. Le termite *C. gestroi* apparaît comme plus virulent que le *R. flavipes* puisque toutes les éprouvettes de duramen sont notées 3 ou 4 alors que les valeurs se répartissent dans les cotations 2, 3 et 4 concernant le termite métropolitain. Le délavage des éprouvettes ou leur exposition naturelle confirme ces résultats. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Kutnick *et al.* (2012).

L'analyse des résultats du taux de mortalité des termites en fin d'essai tend à démontrer la présence de molécules biologiquement efficaces vis-à-vis des termites dans cette essence, particulièrement efficaces face à *R. flavipes* puisque la mortalité est totale en fin d'essai dans les dispositifs contenant les éprouvettes de duramen, délavées ou non. Cependant, pour *R. flavipes*, la mortalité est moindre dans les dispositifs contenant de l'aubier, ce qui permet de démontrer logiquement que le duramen contient plus de molécules « anti-termites » que l'aubier, comme déterminé par Cheng *et al* (2005). Ces résultats ne sont pas confirmés dans les essais vis-à-vis de *C. gestroi*. On s'attendait à ce que la mortalité soit moins importante dans les dispositifs contenant les éprouvettes de duramen délavées ou exposées avant essai, du fait du lessivage potentiel des métabolites secondaires (extractibles). Cependant, notre étude démontre à l'inverse que les termites meurent en plus grand nombre après consommation du duramen délavé, et encore plus après consommation du bois exposé.

Les résultats concernant le duramen de Pin Sylvestre sont conformes à la classification normalisée (EN 350, 2016). Il s'agit d'une essence « sensible ». Cependant, les résultats concernant le Red Cedar divergent : en effet, il est classé comme « Sensible » aux termites dans cette norme alors que notre étude le classe « Moyennement

Durable » face à *C. gestroi*, qu'il soit délavé ou non. Ceci avec une certaine variabilité car les éprouvettes sont cotées entre 0 et 4.

Cependant, le résultat des cotations de cette étude permet de critiquer le barème de classification des attaques de la norme EN 117 (2013). En effet, l'Annexe C présente des photographies des éprouvettes de duramen de Red Cedar, de Cryptoméria et de Pin Sylvestre dont les dégâts sont cotés 4 et cotés 3 après mise en présence de *C. gestroi*.

Ainsi, cette observation démontre, pour les éprouvettes cotées 4, que les dégâts sur le Red Cedar correspondent à un seul forage pénétrant à plus de 3 mm de profondeur et s'élargissant en une petite cavité dans la masse de l'éprouvette alors que les dégâts observés sur les éprouvettes de Cryptoméria et de Pin Sylvestre correspondent à une combinaison d'érosions de profondeur supérieure à 1 mm et inférieures à 3 mm sur plus de 1/10 de la surface et de forages pénétrant à plus de 3 mm de profondeur et s'élargissant en cavités très volumineuses dans la masse de l'éprouvette.

De plus, la mortalité des termites dans les dispositifs n'est pas prise en compte dans le système de classification normalisé. En effet, dans le cas du Red Cedar, la mortalité totale des termites intervient, dans tous les dispositifs, avant la fin de la deuxième semaine de mise en présence. Ce qui indique que les dégâts n'auraient pas été plus importants après exposition plus longue que les 4 semaines prévues dans la norme EN 117 (2013). A l'origine, la norme EN 117 a été développée pour des produits de protection du bois et non pour la détermination de la durabilité naturelle des essences (Ozanne, 2001). Du point de vue expérimental, cette norme est un essai de non-choix, donnant accès aux termites à toutes les faces d'une éprouvette de bois. Si cette éprouvette de bois ne présente pas d'effet répulsif, soit par le biais d'un traitement ou de la présence de métabolites secondaires (volatiles et répulsifs) : les termites consommeront systématiquement une portion de bois d'où une cotation souvent défavorable. L'ancienne version de la norme cadre EN 350 (1996), faisait référence à l'utilisation de la norme d'essai EN 118 pour évaluer la durabilité vis-à-vis des termites. Cette norme est un essai de non-choix, mais une seule partie de la surface (L,R) est accessible aux termites. Sur le même principe, cet essai de non-choix a été développé pour démontrer l'efficacité préventive d'un produit de traitement du bois. Cet essai est donc aussi favorable à un bois présentant une répulsivité vis-à-vis des termites (Ozanne, 1996). Ainsi, le système normatif Européen de classification de la durabilité naturelle bois vis-à-vis des termites peut être vu comme une transposition « de bonne volonté », mais maladroite et erratique d'essais.

Aussi, pour mieux étudier les dégâts réalisés par les termites *C. gestroi*, la perte de masse des éprouvettes a été mesurée et permet, pour le Cryptoméria, de déterminer que le duramen externe est significativement plus consommé après délavage en laboratoire. Ce qui laisserait penser que les molécules biologiquement efficaces vis à vis des termites sont particulièrement présentes dans cette zone et ont donc été lessivées.

La mesure de perte de masse permet également de mieux comparer les dégâts correspondant aux différentes cotations. Il est d'abord utile de noter que, concernant le Red Cedar, la moyenne de perte de masse des éprouvettes n'ayant subies aucune attaque (cotation 0) est égale à 0,05g. Ce qui correspond donc à l'erreur due à la précision des manipulations (incertitude de mesure liées à la balance et à l'humidimètre). Concernant la cotation 3, qui ne concerne que le duramen de Cryptoméria et celui de Red Cedar, la perte est très sensiblement la même (respectivement 0.16 et 0.17 g). En revanche, concernant la cotation 4, la comparaison des pertes de masses moyennes des différentes essences à l'étude rejoint les conclusions faites sur la cotation visuelle des dégâts ; cette classe regroupant des éprouvettes de Red Cedar, de Cryptoméria et de Pin Sylvestre dont les moyennes de masses sont très différentes (respectivement 0.26g, 0.74g et 1.06g).

Aussi, il conviendrait donc, afin de mieux déterminer la durabilité des essences de bois face aux termites, de mettre en place un système de classification tenant compte de l'aspect visuel des dégâts et de la perte de masse, et de prendre aussi en compte le taux de mortalité des termites. Ce type de système existe dans la normalisation Américaine (Norme E1-09, AWPA, 2009). Pour ce faire, il conviendrait de compléter les résultats de cette thèse avec quelques essences de durabilité différentes et plusieurs espèces de termites, dont les termites de bois sec, pour lesquels, il n'existe pas de protocoles normalisés. Il apparaît effectivement important de mieux connaître la durabilité naturelle des essences face à ce type de termites car il existe des techniques permettant de limiter fortement les infestations de termites souterrain dans les constructions neuves (barrières anti-termites physiques et physico-chimiques) et des moyens de surveiller leur présence autour du bâti (mise en place de stations de piégeage souterraines).

Aussi, dans le système de classification normalisé, il conviendrait de préciser pour chaque essence de bois, sa durabilité par rapport à chacune des espèces de termites utilisées. En effet, notre étude démontre bien que le Red Cedar n'est pas sensible face à *C. gestroi* alors que dans la norme EN 350 (2016), celui-ci est déclaré comme « Sensible », sans précisions sur l'espèce ayant servi à établir ce classement.

Enfin, il conviendrait également de revoir la détermination et la définition de la classe de durabilité « Moyennement Durable » qui n'a pas réellement de sens telle quelle. Il est précisé dans la norme que « La classe de durabilité « M », dérivée d'un essai en laboratoire, n'a qu'une valeur informative. Les autres paramètres, tels que la taille de la population et la dynamique des apparitions de termites dans la région géographique où il est prévu d'utiliser ce bois ou ce matériau dérivé du bois, doivent également être évalués » sans aucune précision complémentaire. Aussi, ayant testé depuis 2003 de nombreuses essences de bois et autres matériaux biosourcés face aux termites, il m'a toujours semblé délicat de donner un avis sur l'utilisabilité d'essences classées « moyennement durables ». Il serait donc préférable de définir si une essence est consommable ou pas par les termites, donc « sensible » ou « durable » par des essais de laboratoire. Et, par l'étude de la mortalité des termites, par des essais de choix, et

par les résultats face à différents types de termites, de nuancer cette classification. En suivant cette logique, pour l'utilisation du Red Cedar à La Réunion, celui-ci pourrait répondre aux exigences réglementaires pour une utilisation comme élément de structure dans des constructions neuves, protégées par une barrière physique ou physico-chimique, ceci après vérification que cette essence est résistante aux attaques de termites de bois sec, comme *Cryptotermes brevis*, très présent à La Réunion.

Ainsi, au vu de la variabilité du Cryptoméria face aux champignons Basidiomycètes, la Spectroscopie Proche Infra-Rouge (SPIR) est utilisée dans nos travaux pour élaborer des modèles prédictifs.

5. Apports de la SPIR dans la détermination des caractéristiques des bois en essai

5.1. RESULTATS

5.1.1. Analyses des données spectrales

5.1.1.1. Résumé des données

La base de données comprend 2619 enregistrements de spectres acquis, soit 1600 spectres issus d'éprouvettes non délavées et 1019 spectres issus d'éprouvettes délavées. Chaque spectre étant constitué de 1050 variables numériques acquises entre 400 nm et 2500 nm, avec un pas de 2 nm.

Le tableau 26 reporte le nombre d'enregistrements par variable qualitative et quantitative par type de traitement (non délave et délavé).

Tableau 26. Résumé des données spectrales (nombre de spectres acquis par variable)

VARIABLES	TRAITEMENT			
	NON DELAVE	DELAVE	TOTAL	
Nombre de Spectres total	1600	1019	2619	
Essences (Cryptoméria – Pin sylvestre – Red Cedar)	1600	1019	2619	
Forêts (Bébour – Bélouve)	402	468	870	
Arbres ou N° de planche (C1 à C4 pour Cryptoméria – Planches 1 à 10 pour Pin sylvestre et Red Cedar)	1467	953	2420	
Zone Duramen (Interne ou externe) - Aubier	1600	1019	2619	
Densité	621	953	1574	
Humidité Relative	667	1019	1686	
<i>Poria placenta</i>	% Perte de masse (moyenne)	160	160	320
	Classe de durabilité	160	160	320
<i>Coniophora puteana</i>	% Perte Masse (moyenne)	196	160	356
	Classe de durabilité	196	160	356
<i>Coptotermes gestroi</i>	Cotation visuelle	162	132	294
	Classe de durabilité	162	132	294
	Perte de masse (g)	162	132	294
	% perte de masse (moyenne)	162	132	294
<i>Reticulitermes flavipes</i>	Cotation visuelle	69	64	133
	Classe de durabilité	69	64	133

5.1.1.2. Données spectrales

Les graphes des valeurs d'absorbance ($\log(1/R)$) pour l'ensemble des spectres ($n = 2619$) ne présentent pas de profils atypiques. Une grande dispersion est présente selon l'axe des absorbances. Cette variabilité en absorbance, certainement due à la dispersion de la lumière, est très bien corrigée en appliquant un algorithme de correction de tendance (Detrend) ou en appliquant la dérivée (première et/ou secondaire).

Le graphe des valeurs d'écart type en fonction des longueurs d'onde (Fig. 18) permet de repérer les bandes spectrales présentant le plus de variation. Dans le visible (400 nm -800 nm) la longueur d'onde 528 nm correspondant à l'absorption dans le vert présente la plus grande variation, dans le proche infrarouge (1100 nm -2500 nm) les bandes suivantes sont marquées : 1214 nm (-CH₂) ; 1460 nm (O-H de l'amidon et N-H) ; 1174 nm (O-H de la cellulose) ; 1932 nm (O-H de l'eau et/ou cellulose) ; 2106 nm (O-H et C-O, de l'amidon et/ou cellulose) et 2274 nm (O-H cellulose).

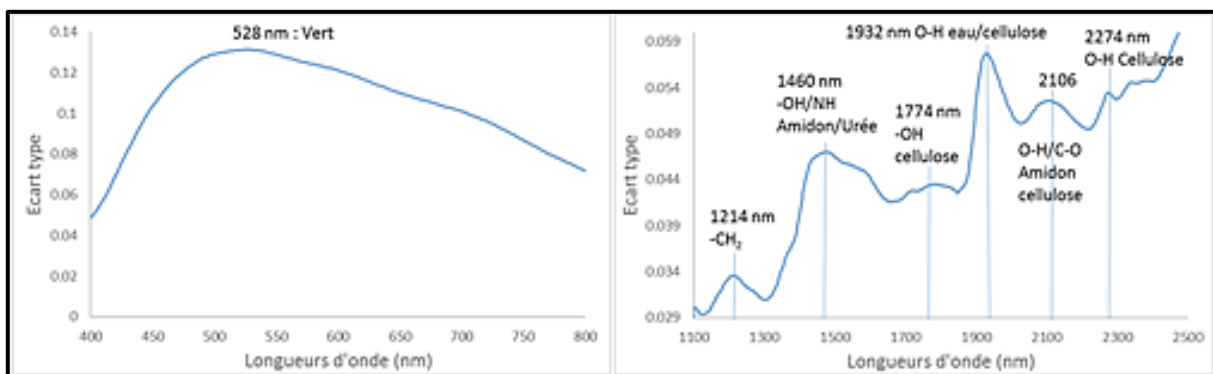


Figure 18. Valeurs d'écart types des absorbances en fonction des longueurs d'onde

Les spectres moyens en fonction du traitement (Fig. 19) présentent des profils similaires, seule la valeur moyenne en absorbance est plus forte dans le cas des échantillons délavés. Les spectres moyens par essence présentent également des profils similaires (Fig. 20) avec des différences en unité d'absorbance. Ces différences sont surtout marquées dans le visible ; ainsi les éprouvettes de Pin Sylvestre (Duramen et Aubier) sont significativement différentes des éprouvettes de Cryptoméria et de Red cedar.

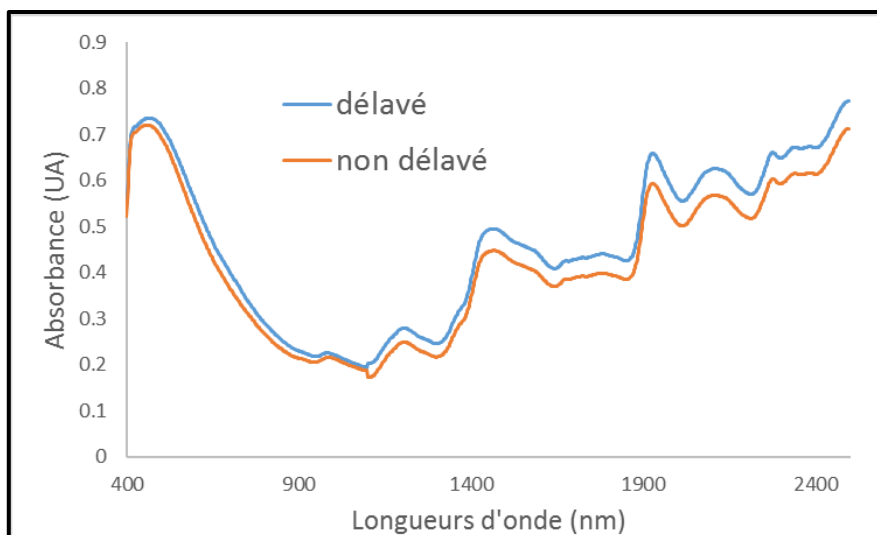


Figure 19. Spectres moyens en fonction du traitement (délavés / non délavés) des éprouvettes, toutes essences confondues

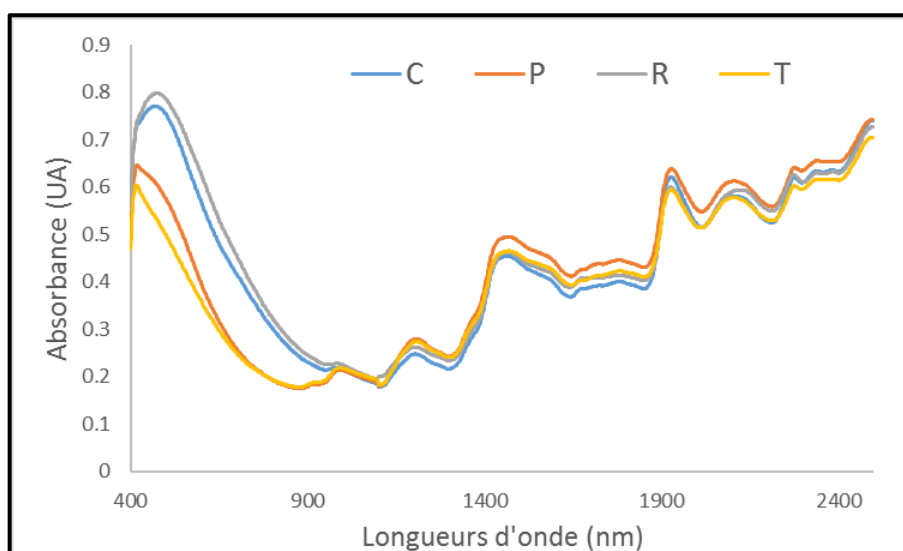


Figure 20. Spectres moyens par essence
 (C=Cryptoméria (Aubier et Duramen) ; P = Duramen de Pin ; R = Duramen de Red Cedar ;
 T = Témoins - aubier de Pin)

Les calculs des dérivées premières des spectres en $\log(1/R)$ et des dérivées secondes (Fig. 21), permettent de corriger les effets additifs et multiplicatifs et offrent une meilleure résolution des pics d'absorption, tout en conservant un rapport signal sur bruit satisfaisant.

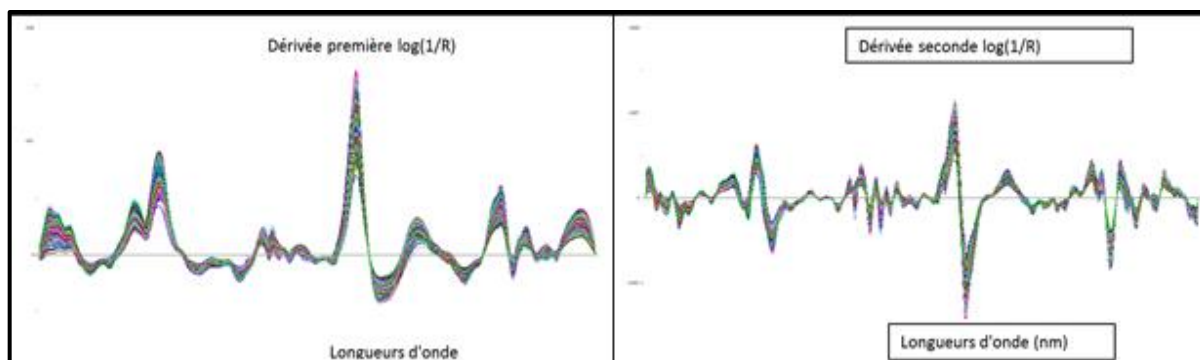


Figure 21. Spectres en dérivée première et dérivée seconde

5.1.1.3. Données physico-chimiques et de durabilité

Variables Quantitatives

Les statistiques descriptives sont reportées dans le tableau 27. Les valeurs de densité et d'humidité sont réparties, selon une loi Normale, entre 0.253 et 0.663 pour la densité et entre 6 et 14 pour l'humidité (Fig. 22 et 23).

Tableau 27. Statistiques descriptives des variables quantitatives (toutes essences et toutes zones confondues)

Variable	Traitement	Nb.	Min.	Max.	Moyenne	Variance (n-1)	Ecart-type (n-1)
Densité	Total	1574	0.253	0.663	0.389	0.005	0.071
	Non délavé	621	0.253	0.663	0.377	0.005	0.071
	Délavé	953	0.263	0.640	0.398	0.005	0.070
Teneur en eau (%)	Total	1686	6.00	14.00	9.47	1.82	1.35
	Non délavé	667	6.00	14.00	9.13	2.36	1.54
	Délavé	1019	7.00	13.00	9.70	1.33	1.15
<i>P. placenta</i> Perte de masse moyenne (%)	Total	320	0.00	54.99	21.55	2.145	14.65
	Non délavé	160	0.00	54.99	21.78	2.61	16.17
	Délavé	160	0.00	53.78	21.33	1.69	12.99
<i>C. puteana</i> Perte de masse moyenne (%)	Total	406	0.00	63.48	22.45	4.75	21.81
	Non délavé	190	0.00	63.48	22.85	5.11	22.61
	Délavé	216	0.00	63.46	21.97	4.34	20.83

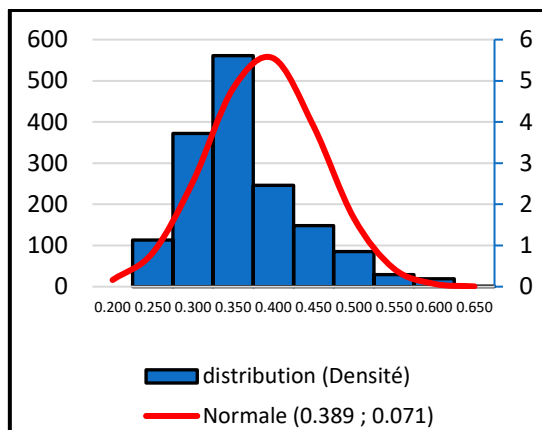


Figure 22. Histogrammes des valeurs de densité et courbe de loi normale

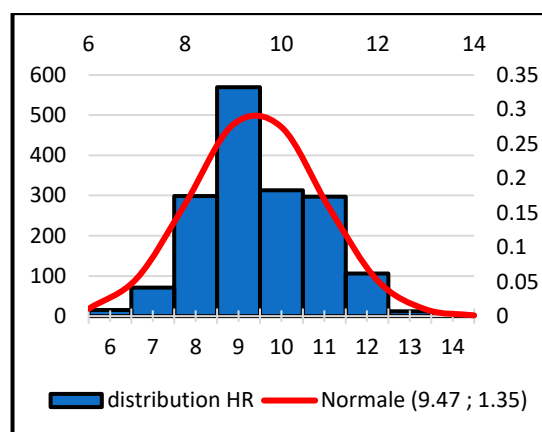


Figure 23. Histogramme des valeurs de Teneur en eau et courbe de loi normale

La perte de masse après exposition au champignon *P. placenta* varie entre 0% et 54.99% ; la répartition des valeurs suit une loi Normale avec une forte dysmétrie à gauche (Fig. 24), en effet 24 % des valeurs sont inférieures à 5.6%. Alors que la perte de masse après exposition au champignon *C. puteana* présente une distribution rectangulaire pour les valeurs supérieures à 6% ; 40% des valeurs observées étant inférieures à 6% (Fig. 25).

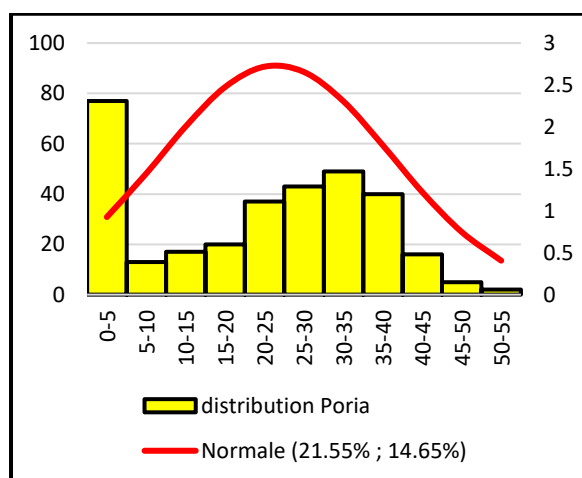


Figure 24. Histogramme des valeurs de perte en masse (%) après exposition à *Poria placenta*

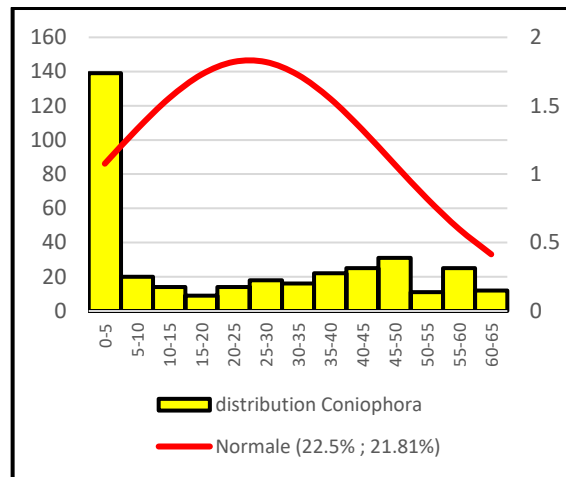


Figure 25. Histogramme des valeurs de perte en masse (%) après exposition à *Coniophora puteana*

Variables qualitatives

Les résultats de perte de masse des éprouvettes après essai vis-à-vis des deux champignons ont été réparties dans 2 classes : les éprouvettes notées DC 1 et DC 2 sont considérées comme « Durables » (modalité « O ») et les éprouvettes notées DC 3 à DC 5 sont considérées comme « Non Durables » (modalité « N »),

Ainsi, le tableau 27 résume les effectifs et les fréquences par modalité et par type de traitement en fonction de la souche de champignon utilisée. Le nombre de tests par classe de traitement est homogène, en revanche le nombre d'observations par modalité des 2 variables est très déséquilibré.

Tableau 28. Résumé des variables quantitatives en fonction des pré-traitements

	Pré-traitement	Nb d'observations	Modalités	Effectif par modalité	Fréquence par modalité (%)
<i>P. placenta</i>	Non délavé	160	N	143	89.38%
			O	17	10.63%
	Délavé	160	N	149	93.13%
			O	11	6.88%
<i>C. puteana</i>	Non délavé	160	N	142	88.75%
			O	54	33.75%
	Délavé	160	N	122	76.25%
			O	38	23.75%

5.1.1.4. Analyses des données spectrales

a. Analyse en Composantes Principales (ACP) sur l'ensemble des échantillons (spectres complets – $\log(1/R)$)

Une première ACP est réalisée sur l'ensemble des variables spectrales, sous la forme $\log(1/R)$, pour l'ensemble des échantillons. Les 3 premières composantes principales expliquent 97,73% de la variance totale (respectivement 59,70%, 34,37% et 3,66%). La répartition est la même selon l'axe 1 pour les échantillons délavés et non délavés. Il existe cependant un décalage entre ces deux classes selon l'axe 2 (Fig. 26).

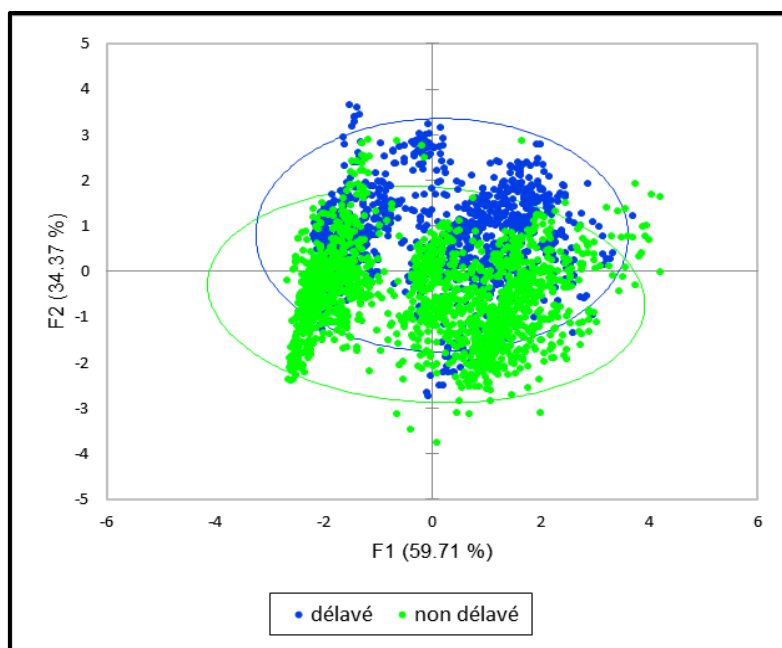


Figure 26. Répartition des spectres selon le premier plan de l'ACP, spectres complets $\log(1/R)$

Les loadings associés à la première composante montrent que celle-ci est essentiellement due à la couleur, ceux associés à la deuxième composante correspondent aux hydroxyles O-H, alors que ceux associés à la troisième sont similaires au spectre moyen (Fig. 27).

Le léger décalage observé selon l'axe 2 de l'ACP, peut être dû à une légère différence de teneur en eau. En effet, la teneur moyenne en eau des échantillons délavés est de 9,7% alors que celle des non-délavés est de 9,1%.

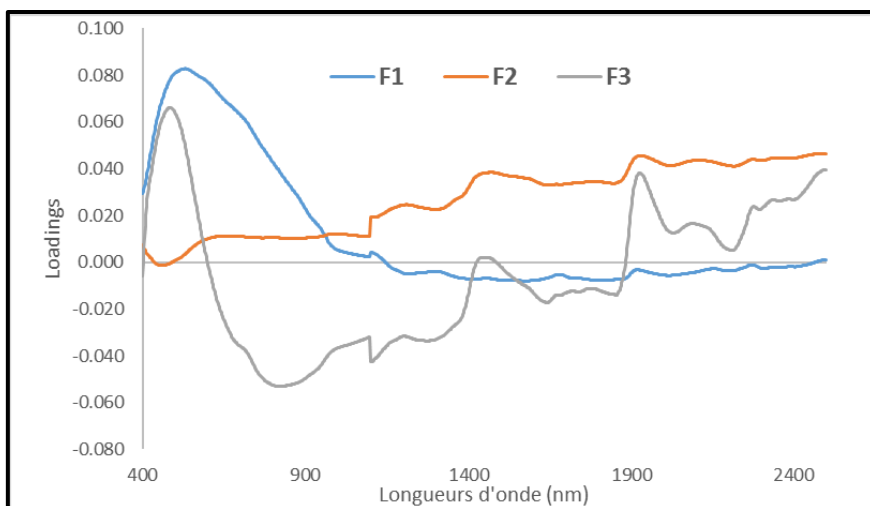


Figure 27. Loadings associés aux 3 premières composantes

b. Analyse en Composantes Principales (ACP) sur l'ensemble des échantillons (Dérivée seconde de $\log(1/R)$)

L'ACP réalisée à partir de la dérivée seconde (Savitzky-Golay, smoothing 11 points order 2) calculée sur le segment : 430-1058 ; 1130-2488 nm (995 variables), confirme les observations sur spectres bruts. On retrouve un léger décalage selon l'axe 1 entre échantillons délavé et non-délavés. La répartition en clusters selon l'axe 2 reste similaire selon les deux classes (Fig. 28).

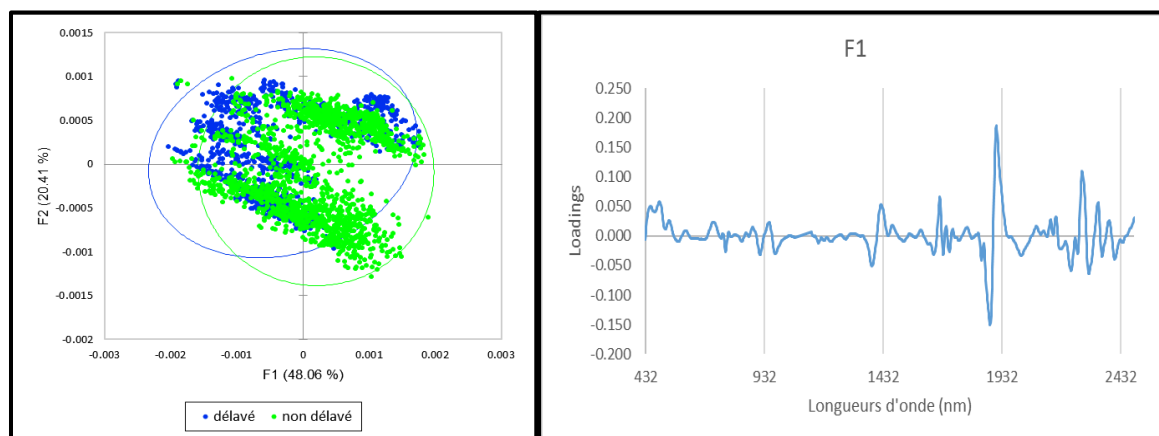


Figure 28. Répartition des spectres selon le premier plan de l'ACP, dérivée seconde des spectres $\log(1/R)$; Loadings associés à CP1

Ce léger décalage selon l'axe 1 est due à la différence de teneur en eau entre les échantillons délavés et non-délavés comme l'indique la visualisation des loadings associés au facteur 1 (Fig. 28).

c. Analyse Factorielle Discriminante

Une analyse factorielle discriminante (AFD), réalisée sur la base des 3 premières composantes principales (CP) comme variables explicatives et sur le type de traitement (non délavé ou délavé) comme variable de classe, permet en validation croisée de classer correctement 80,8% des 2619 échantillons. La différence spectrale entre les deux types de traitement, due à la teneur en eau, est significative.

En compléments :

- Si l'on retire la première composante principale de l'analyse, le taux de classification correcte baisse alors à 79,5%, mais dans le même temps on améliore le taux de classification correcte des éprouvettes délavées (de 66,8% à 71,2%) et abaisse un peu celui des éprouvettes non délavées (de 89,2% à 84,7%).
- Si l'ACP est calculée en retirant les bandes principales de l'eau (1364-1462 ; 1828-1968) la variance expliquée est : 43,6% par l'axe 1 ; 18,2% par axe 2 et 10,6% par l'axe 3. La répartition des individus selon les plans 1/2 et 1/3 restent identique à celle observée lors de l'ACP spectres avec bandes de l'eau, le décalage entre Délavés/non Délavés est nettement moins marqué (Fig. 29). Les Loadings associés à la première composante (Fig. 30) présentent alors des maximums pour les longueurs d'onde 2272 nm et 1672 nm.

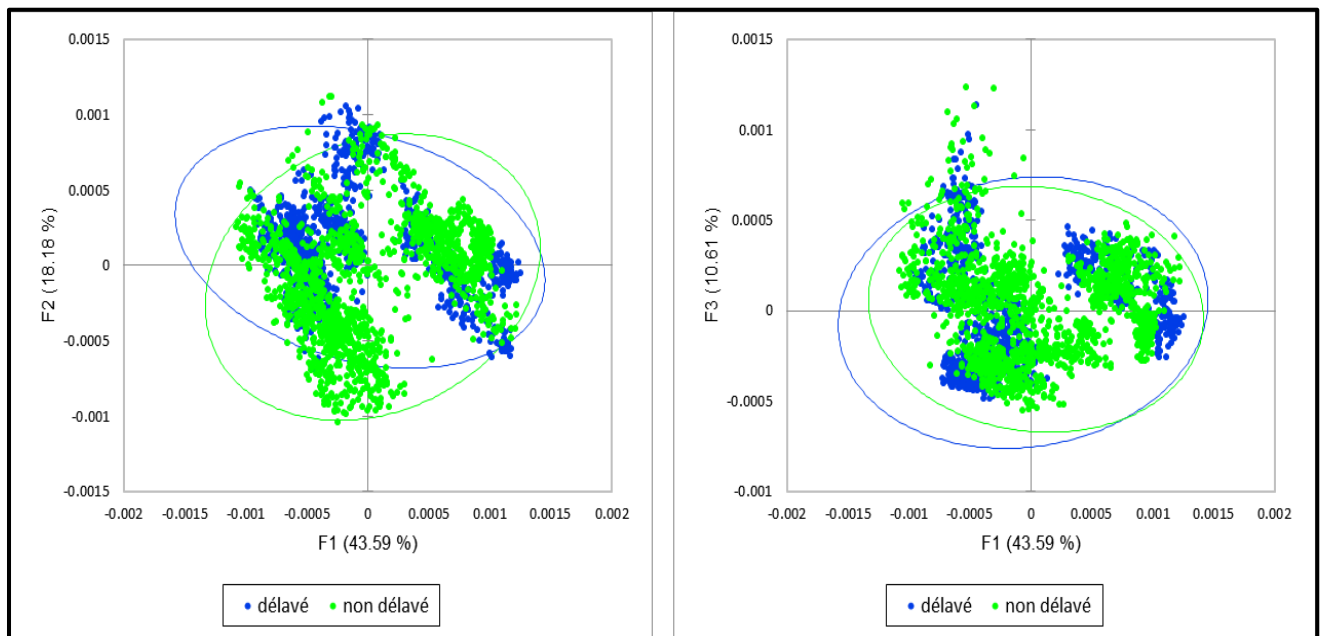


Figure 29. Répartition des spectres selon le premier plan et le plan 1/3 de l'ACP sur dérivée seconde des spectres Log(1/R) sans les bandes de l'eau

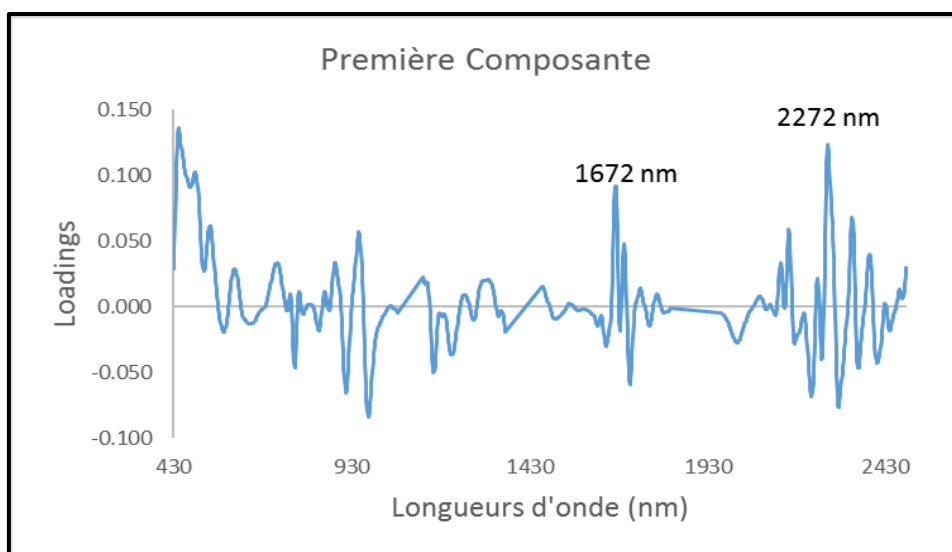


Figure 30. Loadings associés à la première composante principale

La visualisation des différentes essences sur les plans 1/2 et 1/3 de la même ACP (2619 individus, 874 variables, dérivée seconde des spectres) permet de mettre en évidence une tendance à la séparation des échantillons en fonction espèces de bois (Fig. 31).

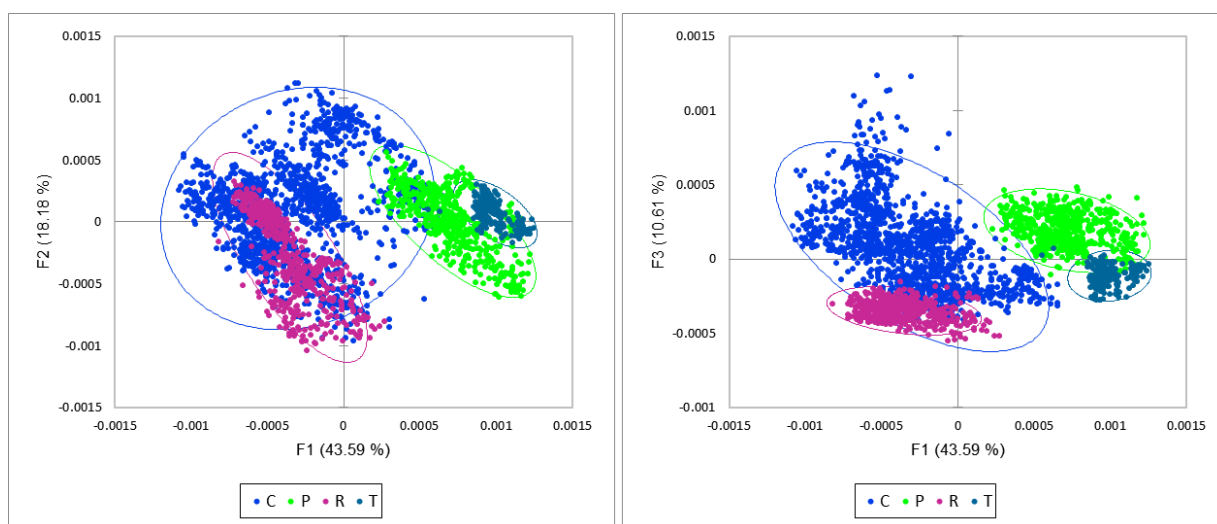


Figure 31. Répartition des individus selon les plans 1/2 et 1/3 de l'ACP sur dérivée seconde des spectres sans les bandes de l'eau. Visualisation des types d'essences

Une vue détaillée de la répartition des échantillons selon le premier plan de l'ACP par essence et par traitement (Fig. 32) met en évidence des différences entre les

échantillons délavés et non délavés pour les éprouvettes d'aubier de Pin Sylvestre (T) et les éprouvettes de Red Cedar (R) avec pour l'aubier de Pin Sylvestre (T), une séparation selon l'axe 1, et pour le Red Cedar (R) une séparation selon l'axe 2. Le Cryptoméria (C) et le duramen de Pin Sylvestre (P) ne présentent pas de différences entre les échantillons délavés ou non délavés sur ce premier plan (ni sur le plan 1/3).

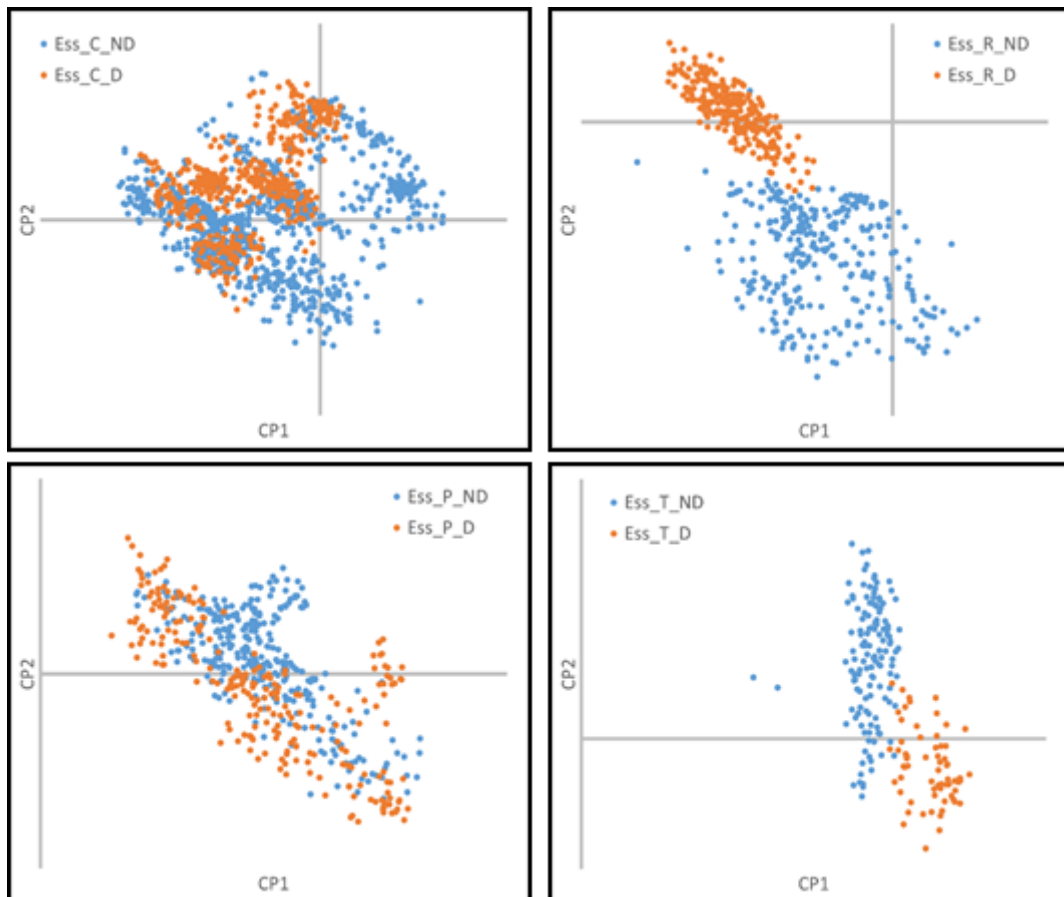


Figure 32. Détail des répartitions selon de plan 1/2 de l'ACP par essence et par traitement

On note par ailleurs que 2 groupes (Fig. 31) sont nettement séparés selon l'axe 1 : le premier regroupant éprouvettes de Cryptoméria (C) et de Red Cedar (R) et le second regroupant les éprouvettes de Pin Sylvestre (Duramen = P et Aubier = T), ceci pour les éprouvettes non délavées et délavées.

d. ACP par essence ; Dérivée seconde de $\log(1/R)$

Les ACP réalisées par essence confirment cette précédente observation. Le tableau 29 résume le nombre d'échantillons par essence et le pourcentage de variance expliqué par les 3 premières composantes principales pour chaque ACP. Les ACP ont été réalisées sur la dérivée seconde des spectres (SG 2,5,5) pour les segments (430-1058 ; 1130-1362 ; 1464-1826 ; 1970-2488) soit 874 variables.

Tableau 29. Pourcentage de variance expliqué par les 3 premières composantes des ACP réalisées par essence, nombre d'individus

Essence	Nb.	CP1	CP2	CP3	Somme
Cryptoméria (C) (Duramen)	1320	36,4%	23,6%	11,9%	71,8%
Red Cedar (R) (Duramen)	550	55,5%	16,0%	10,0%	81,5%
Pin Sylvestre (P) (Duramen)	550	41,9%	17,6%	12,2%	71,8%
Pin Sylvestre (T) (Aubier)	199	64,3%	15,4%	7,4%	87,1%

Les représentations des individus, selon les premiers plans factoriels (Fig. 33), confirment que l'effet du délavage impacte de façon plus prononcée les spectres dans le cas du Duramen de Red Cedar (R) et de l'Aubier de Pin (T). Cet effet est moins marqué pour le Cryptoméria (C) (Aubier et Duramen confondus) et le Duramen de Pin (P).

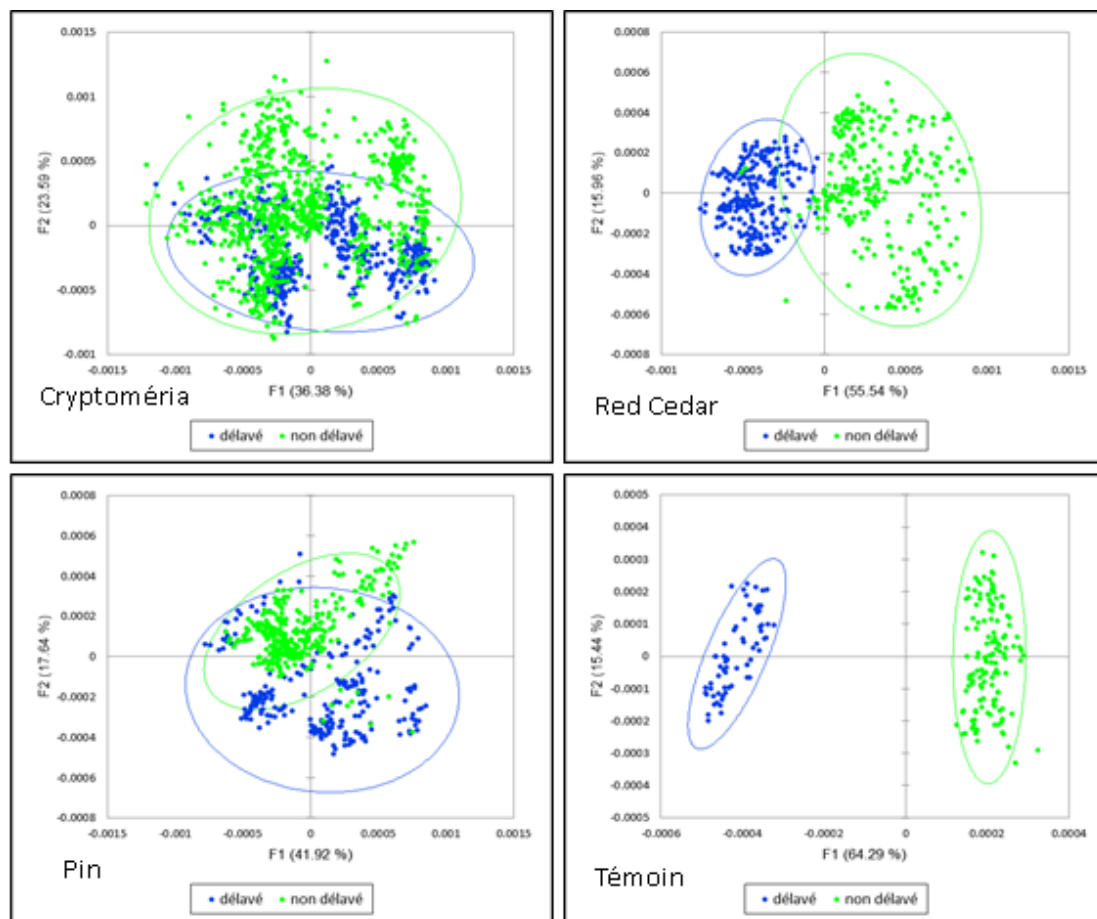


Figure 33. Répartition des spectres selon les premiers plans principaux des ACP réalisées par essence

e. Analyse Discriminante

Echantillons Non délavés

Les spectres $\log(1/R)$ complets des 1600 échantillons non délavés, toutes essences de bois, sont retenus pour cette étude.

Sur cette base, deux sets d'échantillons sont sélectionnés sur la base des spectres en utilisant l'algorithme de Kennard-Stone : un set d'apprentissage (70 % des échantillons ; $N = 1120$) et un set de validation (30% de l'effectif ; $N = 480$). La répartition par essence des échantillons dans le jeu d'apprentissage est proche de la répartition originale pour l'ensemble des échantillons (tableau 30).

Une analyse en composantes principales est réalisée sur le set d'apprentissage, les 3 premières composantes expliquent 96.82% de la variance totale des 710 échantillons. Les coordonnées des échantillons de validation (309) sont calculées par projection sur les axes de cette ACP.

Tableau 30. Répartition des échantillons Non Délavés par essence : sets d'apprentissage et de validation
 (C = Cryptoméria (Aubier et Duramen) – R = Red Cedar (Duramen) – P = Pin Sylvestre (Aubier et Duramen))

Essence	Ensemble		Learning		Validation	
Cryptoméria	852	53%	619	39%	233	15%
Red Cedar	302	19%	235	15%	67	4%
Pin Sylvestre	446	28%	266	16%	180	11%
Total	1600	100%	1120	70%	480	30%

La projection des échantillons de validation sur le premier plan principal de l'ACP du set d'apprentissage permet de vérifier que le set de validation couvre bien la plage de variation de l'ensemble des échantillons (Fig. 34).

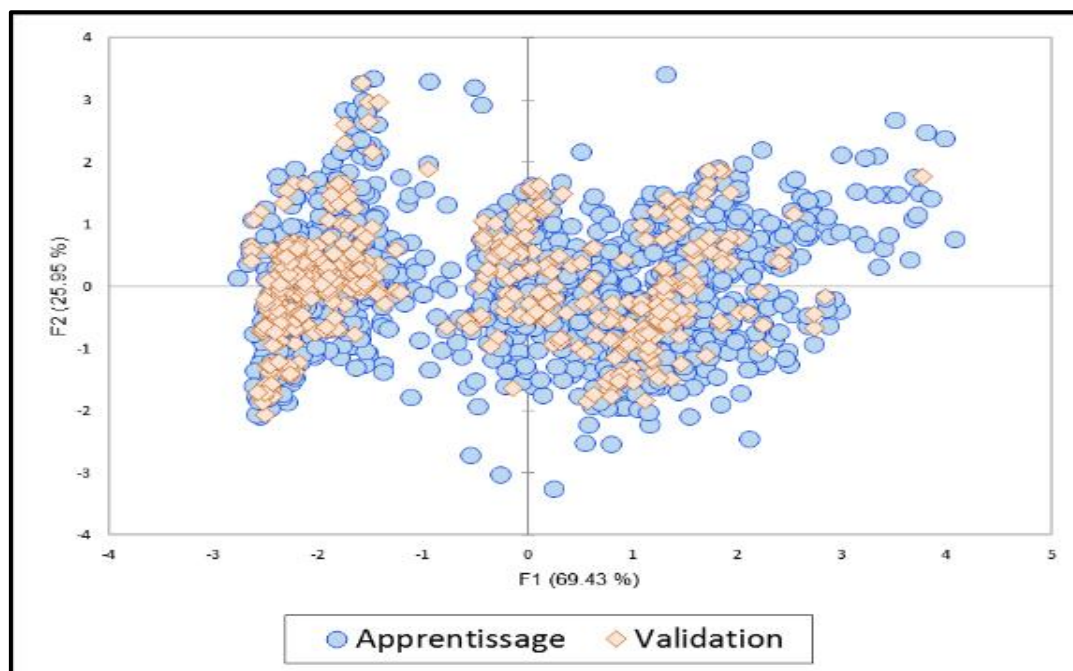


Figure 34. Projection des échantillons de validation sur le premier plan principal de l'ACP d'apprentissage. Echantillons Non délavés

Une analyse discriminante linéaire (LDA) est réalisée sur la base des 4 premières composantes principales avec pour variable de classification « essence ».

La matrice de confusion en apprentissage présentée dans le Tableau 31.

Tableau 31. Matrice de confusion en apprentissage
(LDA sur la base des 4 premières composantes principales de l'ACP)

1120 ND	Cryptoméria	Red Cedar	Pin Sylvestre	
Cryptoméria	406	8	0	
Red Cedar	107	218	0	
Pin Sylvestre	106	9	266	
	619	235	266	
	66%	93%	100%	75%

En apprentissage le taux moyen d'échantillons bien classés est de 75 %. Par classe ce taux est supérieur, sauf pour l'essence Cryptoméria (66%), pour laquelle 107 des échantillons sont vus comme Red Cedar, 106 comme du Pin Sylvestre.

La prédiction des échantillons de validation (309) conduit à un taux de bien classés de 68 %, avec la répartition présentée dans le tableau 32.

Tableau 32. Matrice de confusion en validation
(LDA sur la base des 4 premières composantes principales de l'ACP)

480 ND	Cryptoméria	Red Cedar	Pin Sylvestre	
Cryptoméria	116	1	0	
Red Cedar	58	59	0	
Pin Sylvestre	59	7	180	
	233	67	180	
	50%	88%	100%	68%

D'autres approches ont été testées (non détaillées dans ce manuscrit) :

- Une approche par SIMCA (Soft Independent Modelling of Class Analogy) sur les mêmes jeux de données ne permet pas de classification correcte des échantillons de validation. En effet, il y a beaucoup d'incertains par classe (au seuil $\alpha = 5\%$), même si la répartition par classe est supérieure à 70%.
- Une approche par QDA (Quadratic Discriminant Analysis) sur les 4 premières composantes principales, sur les mêmes jeux de données, permet de classer correctement 85% des échantillons de validation. Un résultat similaire à une approche FDA, la classe C a un taux de bien classé de 72% et 100% des échantillons R sont bien classés. Les taux pour P et T sont 98% et 97%, toujours en validation (n = 480 échantillons).
- Une approche par LDA-Mahalanobis sur les 4 premières composantes principales, sur les mêmes jeux de données, permet de classer correctement 86% des échantillons de validation.

Echantillons délavés

Les spectres $\log(1/R)$, complets des 1019 échantillons délavés sont retenus pour cette étude. Sur cette base 2 sets d'échantillons sont sélectionnés sur la base des spectres en utilisant l'algorithme de Kennard-Stone : un set d'apprentissage (70 % des échantillons ; N = 710) et un set de validation (30% de l'effectif ; N = 309). La répartition par essence des échantillons dans le jeu d'apprentissage est proche de la répartition originale pour l'ensemble des échantillons (tableau 33).

Une ACP est réalisée sur le set d'apprentissage, les 3 premières composantes expliquent 96.82% de la variance totale des 710 échantillons. Les coordonnées des échantillons de validation (309) sont calculées par projection sur les axes de cette ACP.

Tableau 33. Répartition des échantillons Délavés par essence : sets d'apprentissage et de validation

Essence	Origine		Learning		Validation	
Cryptoméria	468	46%	356	35%	112	11%
Red Cedar	248	24%	161	16%	87	8%
Pin Sylvestre	303	30%	193	19%	110	11%
Total	1019		710 70%		309 30%	

La projection des échantillons de validation sur le premier plan principal de l'ACP du set d'apprentissage permet de vérifier que le set de validation couvre bien la plage de variation de l'ensemble des échantillons (Fig. 35).

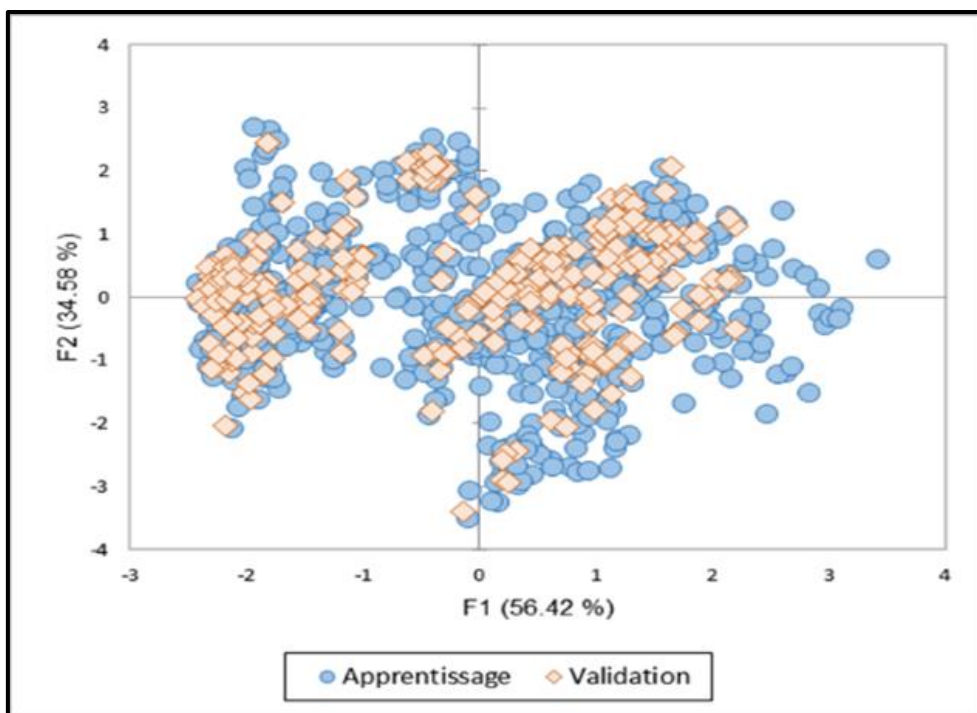


Figure 35. Projection des échantillons de validation sur le premier plan principal de l'ACP d'apprentissage. Echantillons délavés

Une analyse discriminante linéaire (LDA) est réalisée sur la base des 4 premières composantes principales avec pour variable de classification « essence ».

La matrice de confusion en apprentissage est présentée dans le Tableau 34.

Tableau 34. Matrice de confusion en apprentissage (LDA sur la base des 4 premières composantes principales de l'ACP)

710 délavés	Cryptoméria	Red Cedar	Pin Sylvestre	
Cryptoméria	289	1	0	
Red Cedar	65	158	0	
Pin Sylvestre	2	2	193	
	356	161	193	
	81%	98%	100%	85%

En apprentissage le taux de bien classés est de 85 %, par classe ce taux est bien supérieur, sauf pour l'essence Cryptoméria (81%), pour laquelle 65 des échantillons sont vus comme Red Cedar et 2 comme Pin. La prédiction des échantillons de validation (309) conduit à un taux de bien classés de 97 % (Tableau 35).

Tableau 35. Matrice de confusion en validation
(LDA sur la base des 4 premières composantes principales de l'ACP)

309 délavés	C	R	P	
Cryptoméria	112	1	0	
Red Cedar	0	86	0	
Pin Sylvestre	0	0	110	
	112	87	110	
	100%	99%	100%	97%

5.1.1.5. Analyses par zones du bois

Pour cette analyse, seules les 1320 éprouvettes de Cryptoméria sont utilisées. La répartition des éprouvettes selon leur zone de prélèvement (Aubier – Duramen Interne et Duramen Externe) sont présentées dans le tableau 36, ainsi que le traitement réalisé (non délavées ou délavées). Les 120 éprouvettes pour lesquels la provenance n'est pas connue (NC) correspondent aux éprouvettes prélevés dans des planches de bardages exposées naturellement pendant 7 ans.

Tableau 36. Répartition des éprouvettes de Cryptoméria selon leur origine et le pré-traitement réalisé
(A : Aubier ; DE : Duramen externe ; DI : Duramen interne ; NC : non connu)

Cryptoméria	A	DE	DI	NC	Total
Non délavé	246	246	240	120	852
Délavé	154	154	160	0	468
Total	400	400	400	120	1320

Par ailleurs pour l'essence Cryptoméria, les éprouvettes ont été prélevées dans 3 arbres provenant de la forêt de Bélouve (Forêt X – Arbres 1 à 3) et dans 1 arbre provenant de la forêt de Bébour (Forêt Y – Arbre 4). Leur répartition est présentée dans le tableau 37.

Tableau 37. Répartition des éprouvettes de Cryptoméria selon leur origine
(Forêt X = Bélouve – Forêt Y = Bébour – NC = Non connue, correspondant aux éprouvettes provenant de planches exposées 7 ans comme bardage)

Cryptoméria	Forêt X			Forêt Y	Forêt NC	Total
	1	2	3	4	NC	
Non délavé	183	186	181	182	120	852
Délavé	117	114	119	118	0	468
Total	300	300	300	300	120	1320

a. Echantillons non délavés

Une ACP (spectre entier, $\log(1/R)$) est réalisée par traitement des échantillons de l'essence Cryptoméria. Pour les échantillons non délavés, les 3 premières CP expliquent 98,2% de la variance des 852 échantillons, les graphiques (Fig. 36) des scores des 852 échantillons pour les deux premières CP, en coloriant les échantillons en fonction de leur zone de bois, de leur origine (forêt) et de leur appartenance forêt/planche, montrent :

- Une différence en fonction de la zone de prélèvement des éprouvettes de bois : les éprouvettes d'aubier sont séparées des éprouvettes de Duramen selon l'axe 1. Cette analyse confirme que les éprouvettes « NC », qui correspondent aux éprouvettes de Cryptoméria exposées 7 ans en classe d'emploi 3 sont effectivement des éprouvettes de Duramen.
- Peu de différences entre les forêts X et Y et NC, mais des clusters au sein des forêts X et Y, certainement dues à la zone de bois,
- Peu de différences entre les appartenances forêt/arbre/planche, mais là aussi des clusters au sein de chaque modalité.

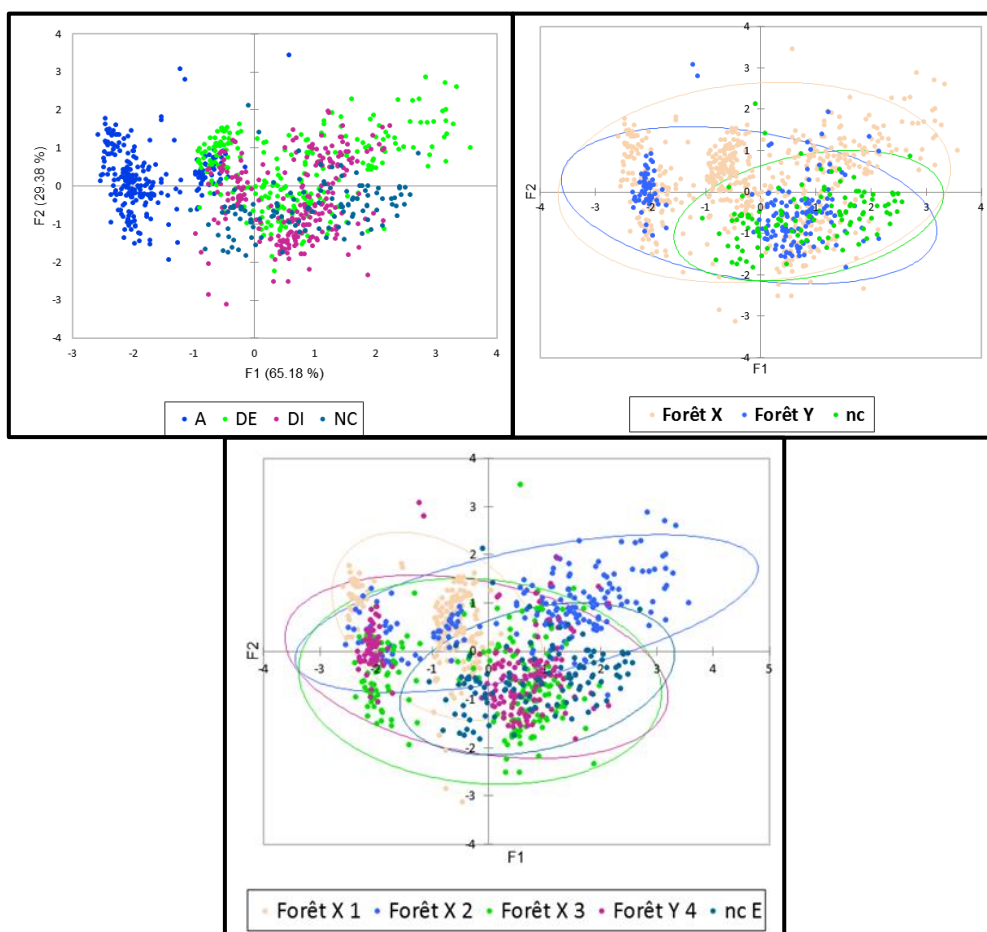


Figure 36. Répartition des échantillons Cryptoméria non délavés selon le premier plan de l'ACP spectre $\log(1/R)$. Visualisation par zone de bois, origine (forêt) et appartenance (forêt/arbre)

b. Echantillons délavés

Une ACP (spectre entier, $\log(1/R)$) est réalisée par traitement des échantillons de l'essence Cryptoméria. Pour les échantillons délavés, les 3 premières CP expliquent 98,3% de la variance des 468 échantillons, les graphiques (Fig. 37) des scores des 468 échantillons pour les deux premières CP, en coloriant les échantillons en fonction de leur zone de bois, de leur origine (forêt) et de leur appartenance forêt/planche, montrent :

- Aucune différence en fonction de la zone de bois,
- Une différence entre les origines forêts X et Y, selon l'axe 2
- Des différences entre les appartenances Forêt/Arbre, avec l'arbre 1 de la forêt X qui ne forme qu'un seul cluster alors que les arbres 2 et 3 de cette forêt présentent 3 clusters (peut-être en relation avec les zones du bois). Les échantillons de forêt Y (arbre 4) forment 4 clusters.

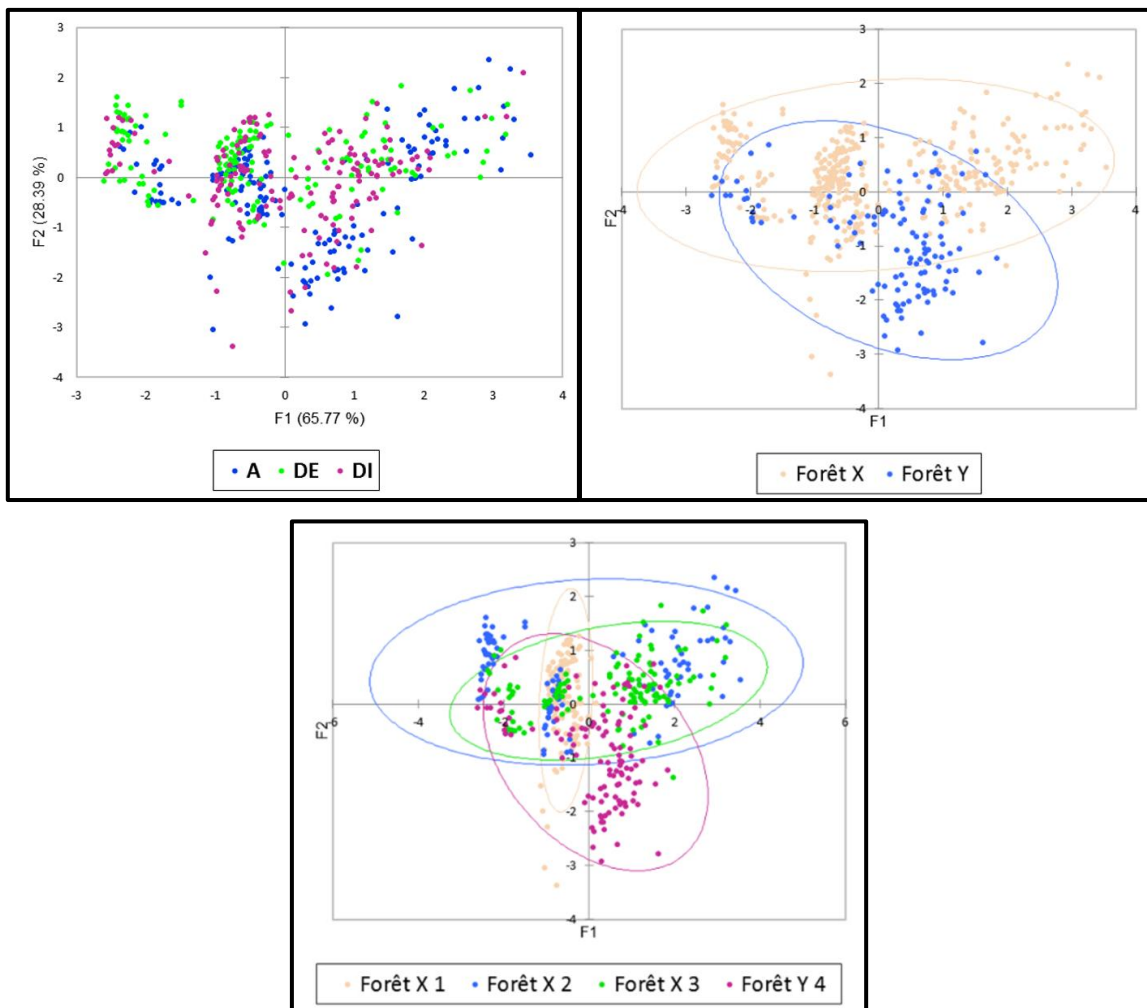


Figure 37. Répartition des échantillons Cryptoméria délavés selon le premier plan de l'ACP spectre $\log(1/R)$. Visualisation par zone de bois, origines (forêt) et appartenance (forêt/arbre)

5.1.1.6. Analyse de la Densité

La figure 38 présente le résultat des mesures de densité moyenne des différentes essences en fonction du pré-traitement réalisé. Les mesures ont été réalisées quelques heures avant le passage des éprouvettes au spectromètre afin de limiter les variations dues aux conditions climatiques entre la prise de la mesure et l'acquisition des données spectrales ; du fait des propriétés hygroscopiques du bois.

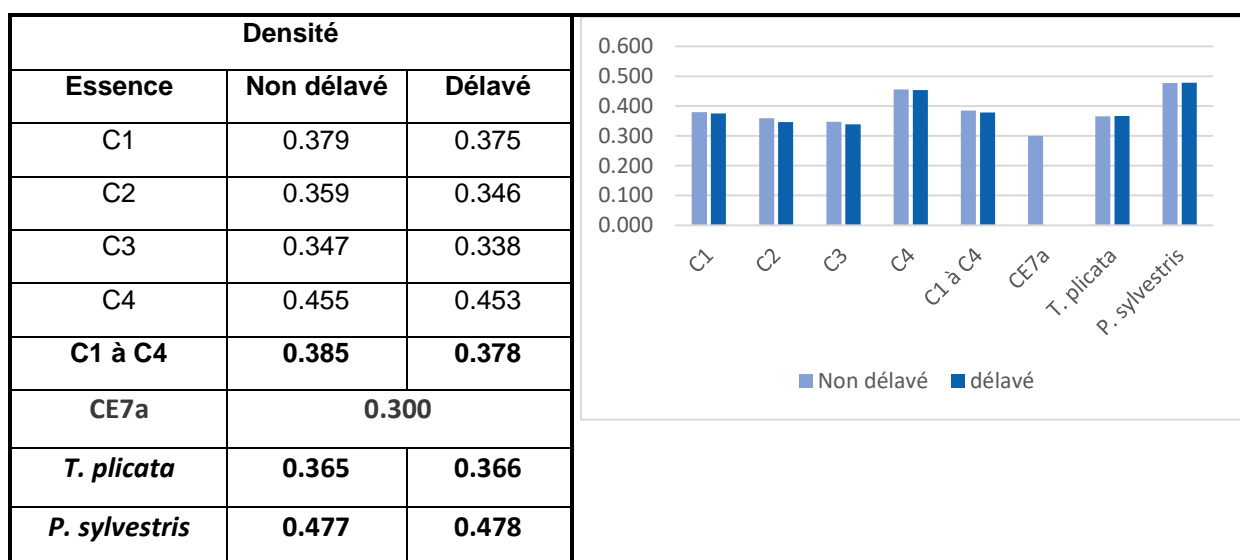


Figure 38. Densité moyenne des différentes essences
(C1 à C4 correspondent aux 4 arbres de *C. japonica* – CE7a correspond au *Cryptoméria* exposé)

La base de données spectrales contient 1574 valeurs de densité avec les spectres correspondants (tableau 25), la densité moyenne est de 0.389 pour une gamme comprise entre 0.25 et 0.66. La répartition en nombre de valeurs est de 953 pour les éprouvettes délavées et 621 pour les éprouvettes non délavées. Les deux populations présentent les mêmes distributions, celles-ci suivent des lois normales, légèrement dissymétriques à droite (Fig. 39 et 40).

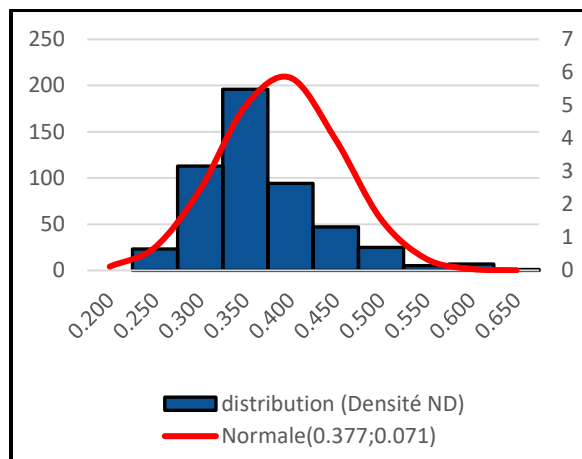


Figure 39. Histogramme des valeurs de densité pour les éprouvettes non-délavées et courbe de loi normale

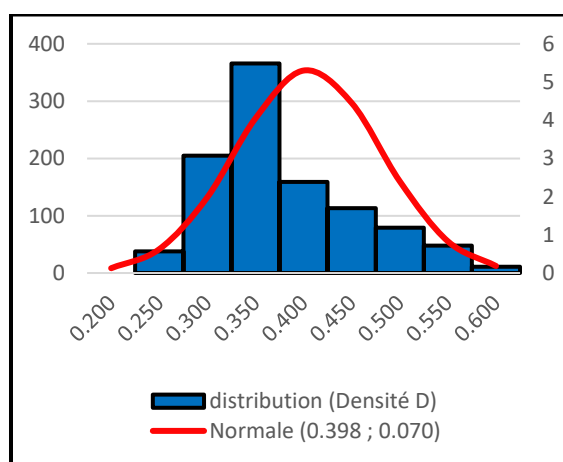


Figure 40. Histogrammes des valeurs de densité pour les éprouvettes délavées et courbe de loi normale

Calibration PLS population entière

Sur ces observations une première calibration est réalisée sur la base de l'ensemble des échantillons, en utilisant la régression PLS.

Différents traitements mathématiques et sélection de segments sont appliqués aux spectres afin de trouver le modèle le plus performant en termes de SEC, R^2 et SECV. Sont également pris en compte le nombre de termes PLS retenus et le nombre d'outliers. Les paramètres communs sont : cross validation (4 groupes, random), 2 passes pour élimination des outliers, limite pour le test t (outliers) 2,5.

Les paramètres des différents modèles et leurs performances sont reportés dans le tableau 38.

Tableau 38. Paramètres et performances des modèles PLS pour la variable densité

N°	Nb.	Moy.	Min.	Max.	SD	SEC	R ²	SECV	1-VR	#terms	Outliers	% outliers	Maths	Segment
1	1512	0.356	0.25	0.64	0.069	0.021	0.905	0.021	0.903	15	62	3.9%	Non	400-2498
2	1499	0.386	0.25	0.66	0.068	0.028	0.835	0.028	0.83	15	75	4.8%	Non	400-1098
3	1519	0.387	0.25	0.64	0.069	0.02	0.913	0.021	0.91	14	55	3.5%	Non	1100-2498
4	1515	0.386	0.25	0.64	0.068	0.022	0.897	0.022	0.894	14	59	3.7%	snv	400-2498
5	1523	0.387	0.25	0.64	0.07	0.022	0.904	0.022	0.901	15	51	3.2%	detrend	400-2498
6	1514	0.386	0.25	0.64	0.068	0.021	0.905	0.021	0.903	15	60	3.8%	snv_D	400-2498
7	1521	0.386	0.25	0.64	0.068	0.022	0.898	0.022	0.896	14	53	3.4%	snv	1100-2498
8	1515	0.387	0.25	0.64	0.069	0.02	0.914	0.021	0.911	15	59	3.7%	detrend	1100-2498
9	1524	0.387	0.26	0.64	0.069	0.022	0.901	0.022	0.899	15	50	3.2%	snv_D	1100-2498
10	1522	0.387	0.25	0.64	0.069	0.019	0.928	0.019	0.923	14	52	3.3%	1,4,4	1100-2498
11	1515	0.387	0.23	0.64	0.069	0.019	0.926	0.019	0.922	14	59	3.7%	D_1,4,4	1100-2498
12	1519	0.386	0.26	0.64	0.069	0.019	0.924	0.02	0.92	15	55	3.5%	snv_1,4,4	1100-2498
13	1526	0.387	0.62	0.64	0.069	0.019	0.925	0.02	0.919	15	48	3.0%	snv_D_1,4,4	1100-2498
14	1519	0.387	0.25	0.64	0.069	0.019	0.929	0.019	0.923	15	55	3.5%	2,5,5	1100-2498
15	1520	0.387	0.25	0.64	0.069	0.019	0.926	0.02	0.92	14	54	3.4%	D_2,5,5	1100-2498
16	1523	0.87	0.25	0.64	0.07	0.019	0.925	0.02	0.92	15	51	3.2%	1,4,4	400-2498

Le modèle 10, basé sur la dérivée première des spectres proche infrarouge (1100 nm – 2500 nm) présente les meilleures performances selon les critères retenus : SEC = 0,019 et R² = 0,928, avec un taux d'outliers de 3,3% et 14 termes PLS.

La prédiction de la base avec ce modèle (Fig. 41), en incluant les outliers, conduit à une erreur de prédiction de SEP = 0,024 avec un biais de 0,001, R² de 0,889 et une pente (valeurs labo vs valeurs prédites) de 1,004.

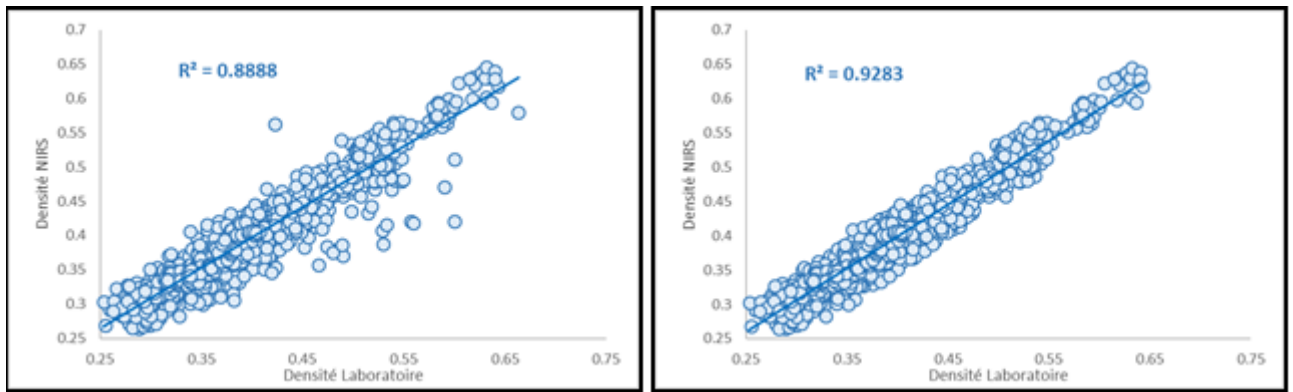


Figure 41. Densité : teneurs prédites en fonction des teneurs mesurées
Avec outliers (gauche) sans outliers (droite)

Les résidus (incluant les outliers) de cette régression suivent une loi normale (Fig. 42).

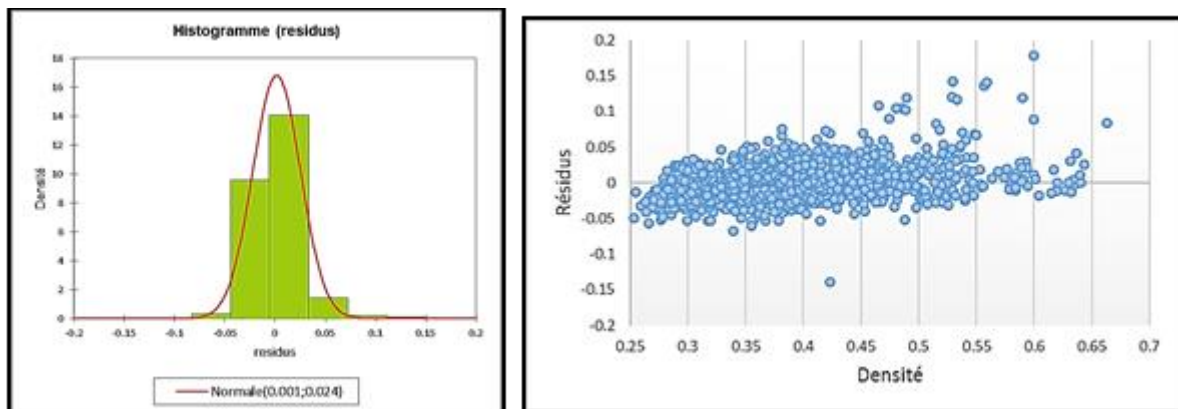


Figure 42. Densité : représentation des résidus

Validation du modèle

a. Set d'apprentissage et set de validation

L'algorithme de Kennard-Stone est appliqué aux dérivés premières des spectres afin de constituer un set d'apprentissage (70 % des échantillons ; N = 1102) et un set de validation (30% de l'effectif ; N = 472).

Statistique	Nb.	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance (n-1)	Ecart-type (n-1)
Densité Learning	1102	0.255	0.643	0.390	0.005	0.073
Densité validation	472	0.253	0.663	0.387	0.005	0.068

Les paramètres du modèle d'apprentissage sont les suivants, sur la base des dérivées premières pour le segment 1100 nm - 2500 nm :

Nb.	Moy	Min	Max	SD	SEC	R ²	SECV	1-VR	#terms	Outliers	Outliers (%)
1067	0.388	0.26	0.64	0.071	0.02	0.921	0.021	0.916	13	35	3.2%

Ce modèle est appliqué aux données de validation (N = 472), les performances de prédiction sont :

Nb.	Mean	SD	SEP	SEPC	Bias	R ²	Slope
472	0.384	0.064	0.02	0.02	0.002	0.913	1.013

L'erreur de prédiction en validation est de SEP_{val} = 0,02 unité de densité, similaire à l'heure de calibration en apprentissage SEC = 0.02, il n'y a pas de biais significatif et la pente de la régression (valeurs labo vs valeurs prédites) n'est significativement pas différente de 1.

b. Calibrations par type de traitement (non-délavé / délavé)

Deux modèles, un par type de traitement des éprouvettes (non-délavé / délavé), sont développés en régression PLS avec les mêmes paramètres que précédemment.

Les paramètres des modèles sont :

	Nb.	Moy	Min	Max	SD	SEC	R ²	SECV	1-VR	#termes	Outliers	% outliers
Non Délavés	602	0.374	0.26	0.64	0.067	0.018	0.926	0.02	0.915	14	19	3.1%
Délavés	915	0.395	0.26	0.64	0.07	0.016	0.946	0.017	0.938	14	38	4.0%

Les deux modèles présentent des performances similaires, pour valider cette approche chaque modèle est appliqué à la population complémentaire : Non-délavés prédit avec modèle délavés et délavés prédit avec modèle non-délavés.

Les paramètres statistiques des prédictions obtenues sont :

Traitement	Nb.	Mean	SD	SEP	SEPC	Bias	R ²	Slope
Non délavé	621	0.367	0.076	0.034	0.022	0.033	0.813	0.833
Délavé	953	0.414	0.067	0.033	0.028	-0.016	0.838	0.965

Les erreurs de prédiction sont dans les deux cas supérieures à celles des modèles, mais après correction du biais celles-ci sont du même ordre que celles des modèles.

Les modèles sont performants, seul un biais est induit quand ils sont appliqués à la population complémentaire. Le choix de développer un modèle sur la base complète est justifié en termes de performances et de robustesse.

Calibration Local Régression

L'approche Local Regression est testée sur ce jeu de données. L'objectif est de développer des modèles « furtifs » appliqués à chaque échantillons (spectres) en fonction de son voisinage.

Le principe est de sélectionner sur la base des corrélations spectrales les N échantillons les plus similaires à l'échantillon à prédire et de trouver le nombre de facteurs optimum associés à cette sélection. Le nombre maximum d'échantillons à inclure dans les modèles a été optimisé à 100 et le nombre minimum à 50, le nombre de facteurs minimum est de 5 et le maximum est de 14. La corrélation spectrale limite pour la sélection des voisins est de 0,5.

Les performances de cette calibration sont :

SEP	Biais	SEP(C)	Pente	R²	Facteurs min	Facteurs Max
0.021	0	0.021	0.993	0.916	5	7

Celles-ci sont très similaires à celles obtenues en PLS, ce qui confirme une linéarité dans les données et permet de retenir un modèle PLS basé sur l'ensemble des données.

5.1.1.7. Analyse de la Teneur en eau

La figure 43 présente le résultat des mesures de teneur en eau des différentes essences. Les mesures ont été réalisées quelques heures avant le passage des éprouvettes au spectromètre afin de limiter les variations dues aux conditions climatiques entre la prise de la mesure et l'acquisition des données spectrales ; du fait des propriétés hygroscopiques du bois.

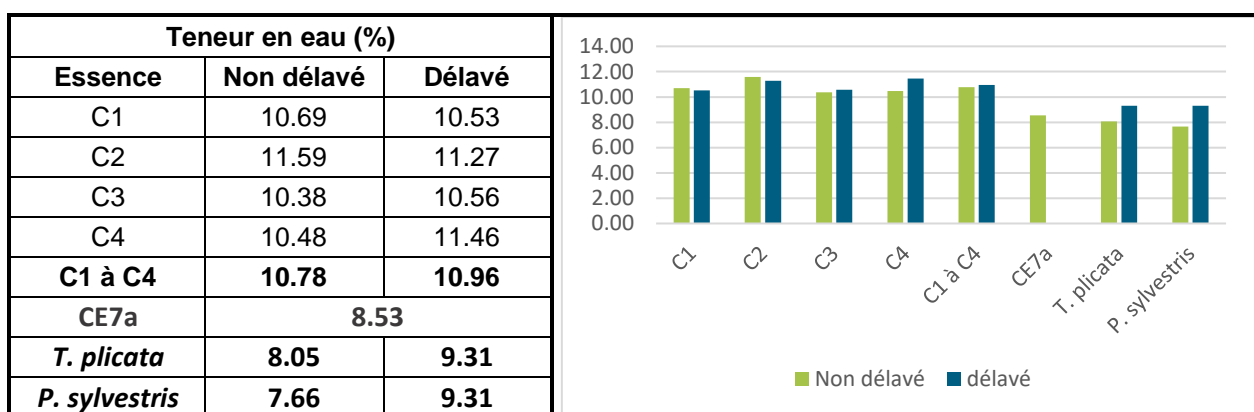


Figure 43. Teneur en eau moyenne des différentes essences

(C1 à C4 correspondent aux 4 arbres de *C. japonica* – CE7a correspond au Cryptomérida exposé naturellement)

Les données d'humidité relative sont réparties de la façon suivante (Tableau 39).

Tableau 39. Répartition des données de teneur en eau

Statistique	Nb.	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart-type
Teneur en eau (%)	1686	6.0	14.0	9.48	1.81	1.35
Teneur en eau (%) Non délavés	667	6.0	14.0	9.13	2.36	1.54
Teneur en eau (%) Délavés	1019	7.0	13.0	9.70	1.33	1.15

La moyenne de teneur en eau des échantillons délavés est supérieure à la moyenne des échantillons non délavés, mais les distributions des teneurs sont similaires pour les deux types de traitement.

Calibration quantitative :

La régression PLS est appliquée sur la base des données spectrales pour l'ensemble des échantillons ayant une valeur de teneur en eau (1686 échantillons, toutes essences confondues). En ne retenant que la gamme dans l'infrarouge et en prenant la dérivée première des spectres les performances du modèle sont :

Teneur en eau	Nb.	Mean	SD	SEC	R ²	SECV	1-VR	#termes	Outliers
	1643	9.461	1.311	0.676	0.734	0.692	0.721	15	43

Ces performances sont globalement insuffisantes pour prédire la teneur en eau (Fig. 44). Il existe bien une tendance sur l'ensemble des valeurs, mais les valeurs individuelles prédites sont extrêmement dispersées.

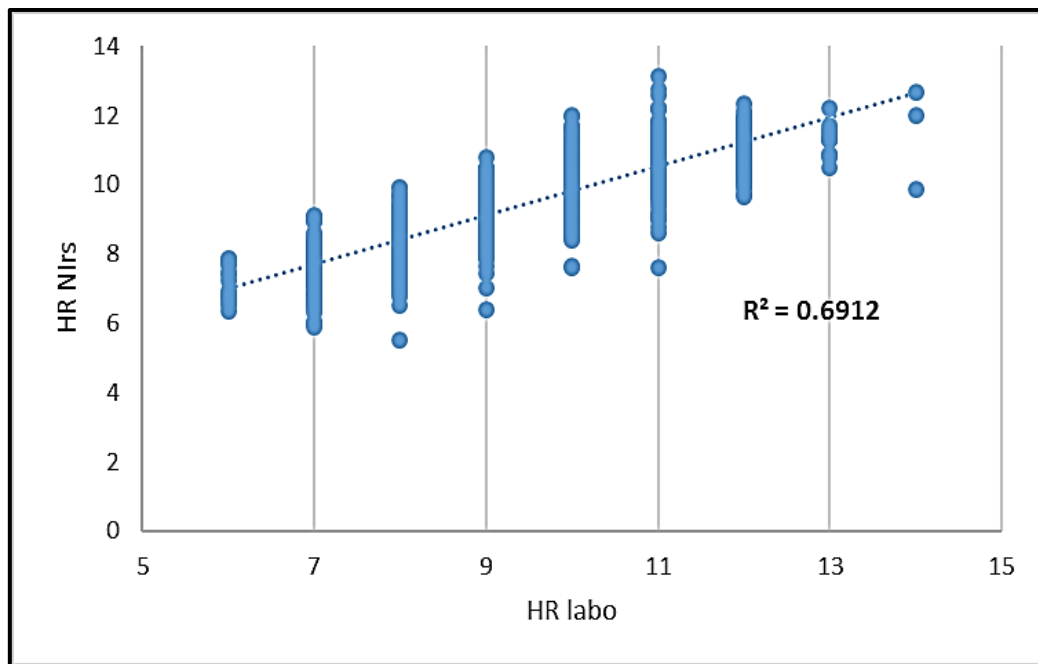


Figure 44. Teneurs en eau prédites versus valeurs mesurées

Les mêmes niveaux de performances sont observés pour des modèles PLS développés pour les sous bases : Non délavés / délavés.

5.1.1.8. Durabilité face aux champignons lignivores Basidiomycètes

a. Résumé des données

Les données comprennent 511 entrées : 271 non délavées et 240 délavées. Dans cette étude, les données des essais réalisés avec *P. placenta* et *C. puteana* sont confondues (Tableau 40 et Fig. 45).

Tableau 40. Effectif par classe de durabilité selon le type de traitement et l'essence

Essence	Délavé	Non délavé	DC1	DC2	DC3	DC4	DC5	Total
Cryptoméria	120	157	95	29	28	91	34	277
Pin Sylvestre	60	54	1	4	3	29	77	114
Red cedar	60	60	120					120
Total	240	271	216	33	31	120	111	511

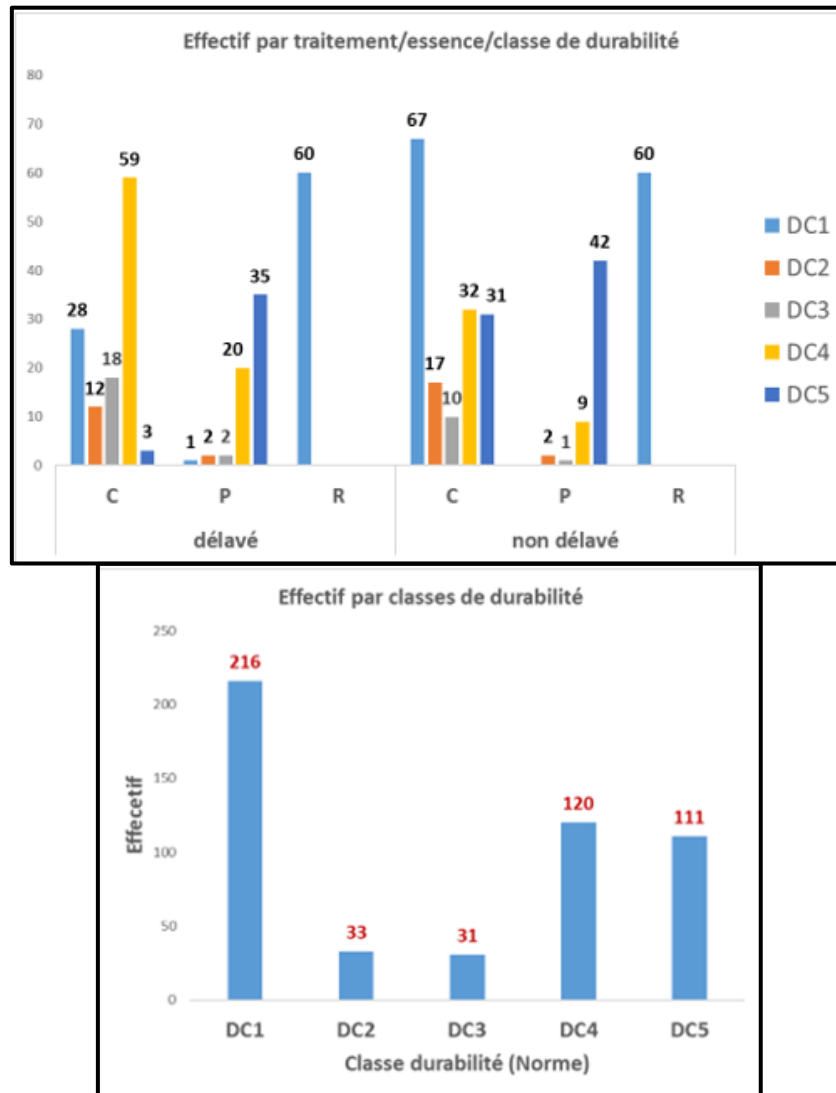


Figure 45. Répartition des effectifs (C=Cryptoméria ; P=Pin Sylvestre ; R=Red Cedar)

b. Analyses

Pour les analyses, les valeurs de durabilité des éprouvettes sont réparties selon 3 modalités :

- **5 classes** : les éprouvettes sont réparties selon les 5 classes de durabilité (DC1 à DC5)
- **3 classes** : les éprouvettes notées DC1 et DC2 sont considérées comme Durables (D) ; les éprouvettes notées DC3 comme Moyennement Durables (MD) et les éprouvettes notées DC4 et DC5 sont considérées comme Non Durables (ND)
- **2 classes** : les éprouvettes notées DC1 et DC2 sont considérées comme Durables (D) ; les éprouvettes notées DC3, DC4 et DC5 sont considérées comme Non Durables (ND)

Analyse discriminante PCA/LDA

Une analyse discriminante PCA/LDA est réalisée sur l'ensemble des spectre brut dans le proche infrarouge uniquement (Tableaux 41 à 43).

Cette analyse discriminante permet en validation croisée de classer correctement 52% des échantillons lorsqu'on prend en compte 5 classe, 62% des échantillons lorsqu'on prend en compte 3 classes et 78% des échantillons lorsqu'on prend en compte 2 classes de durabilité.

Tableau 41. Matrice de confusion 5 Classes

LDA	Valeurs mesurées					
	DC1	DC2	DC3	DC4	DC5	
Valeurs prédites						
DC1	127	1	0	0	1	
DC2	20	11	28	6	3	
DC3	15	5	14	5	7	
DC4	51	14	45	18	3	
DC5	3	2	33	2	97	
	216	33	120	31	111	511
	59%	33%	12%	58%	87%	52%

Tableau 42. Matrice de confusion 3 classes

LDA	Valeurs mesurées			
	Durable	Moyennement durable	Non durable	
Valeurs prédites				
Durable	137	1	9	
Non durable	27	6	154	
Moyennement durable	85	24	68	
	249	31	231	511
	55%	19%	67%	62%

Tableau 43. Matrice de confusion 2 classes

LDA	Valeurs mesurées		
	Durable	Non durable	
Valeurs prédites			
Durable	175	36	
Non durable	74	226	
	249	262	511
	70%	86%	78%

Classifieur Bayésien naïf

La méthode de classification naïve bayésienne, appliquée sur le jeu de données en prenant en compte 2 classes de durabilité, permet de classer correctement 61% des échantillons en apprentissage (soit 77% des échantillons « durables » et 46% des échantillons « non durables ») (Tableau 44). Les valeurs sont sensiblement les mêmes en validation (Tableau 45).

Tableau 44. Matrice confusion en apprentissage (2 classes)

	Durable	Non durable	Total	%
Durable	191	58	249	77%
Non durable	141	121	262	46%
			511	61%

Tableau 45. Matrice confusion en validation (2 classes)

	Durable	Non durable	Total	%
Durable	186	63	249	75%
Non durable	142	120	262	46%
			511	60%

K plus proches voisins

L'algorithme des k plus proches voisins appliquée sur le jeu de données en prenant en compte 2 classes de durabilité, permet de classer correctement 85% des échantillons (soit 78% des échantillons « durables » et 92% des échantillons « non durables ») (Tableau 46).

Tableau 46. Matrice de confusion 2 classes

	Durable	Non durable	Total
Durable	193	22	
Non durable	56	240	
Total	249	262	511
	78%	92%	85%

Régression MPLS (Modified Partial Least Squares)

La régression MPLS appliquée sur la dérivée seconde des spectres dans le proche infrarouge corrigés SNV, avec sélection (Kennard-Stone) de 358 données en apprentissage et 153 en validation donne des résultats intéressants avec, en validation, un R^2 égal à 0.722 et une erreur de prédiction (SEP) égale à 9%. (Tableaux 47 et 48 ; Fig. 46).

Tableau 47. Performances de l'équation de régression en apprentissage

Learning	Nb.	Mean	SD	SEC	RSQ	SECV	1-VR	#	Mat hs	Terms	Correction	Outliers	Outliers (%)
g	354	0.1512	0.1706	0.0824	0.7666	0.0856	0.7474	686	2,5,5	6	SNV	4	1%

Tableau 48. Paramètres statistiques du set de validation

Validation	Nb.	Mean	SD	Bias	SEP	SEPC	Slope	R^2
	153	0.176	0.141	0.013	9%	0.092	0.891	0.722

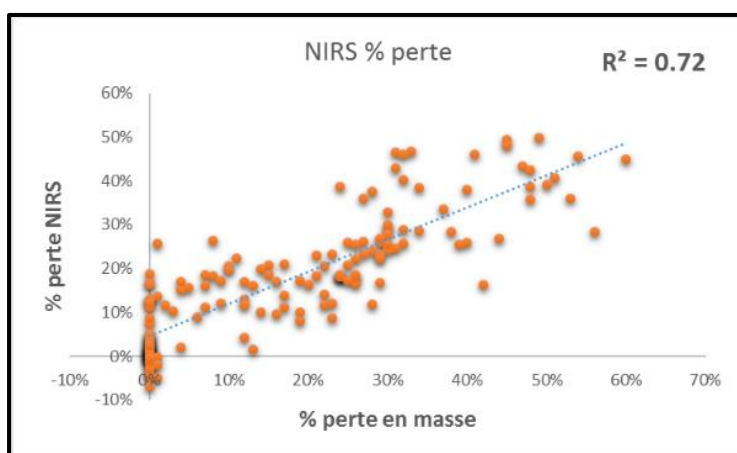


Figure 46. Pourcentages de perte de masse - Valeurs prédites vs valeurs mesurée (validation)

Cette régression permet, en validation croisée de classer correctement 63% des éprouvettes lorsqu'on utilise un système à 5 classes et 82% lorsqu'on utilise 2 classes (Tableaux 49 et 50).

Tableau 49. Matrice de confusion 5 classes sur la base des valeurs prédites (validation)

	DC1	DC2	DC3	DC5	DC5	Total	%
DC1	37	3	7	6	0	53	70%
DC2	0	1	2	8	0	11	9%

DC3	2	0	3	4	0	9	33%
DC4	0	3	7	34	4	48	71%
DC5	0	0	0	11	21	32	66%
						153	63%

Tableau 50. Matrice de confusion 2 classes sur la base des valeurs prédites (validation)

	Durable	Non durable	Total	%
Durable	41	23	64	64%
Non durable	5	84	89	94%
			153	82%

5.2. Discussion sur les apports de spectroscopie proche infra-rouge

L'utilisation de la spectroscopie proche infra-rouge (SPIR), couplée à des analyses mathématiques et statistiques (chimométrie) connaît un fort développement dans le secteur des sciences du bois (Tsuchikawa et Kobori, 2015 ; Chaix, 2019). Ainsi, nos travaux permettent de mieux cerner le potentiel de cet outil pour mettre en évidence les effets du délavage, pour distinguer les essences de bois, déterminer la densité et la teneur en eau, ainsi que dans la prédiction de la durabilité naturelle face aux champignons Basidiomycètes.

Effets du délavage

L'étude de l'influence du délavage met en évidence des différences spectrales importantes au niveau des bandes principales de l'eau (1364-1462 nm et 1828-1968 nm) entre les éprouvettes non délavées et les éprouvettes délavées ; ceci étant dû à la différence de teneur en eau moyenne mesurée dans les éprouvettes non délavées (9.13%) et délavées (9.70%). Cependant, le retrait de ces bandes d'eau avant calcul de l'ACP met en évidence des différences intéressantes pour les longueurs d'onde égales à 1672 nm et 2272 nm. La longueur d'onde égale à 1672 nm, associée à la lignine (Tsuchikawa *et al.*, 2004) s'avère particulièrement discriminante dans les travaux de Tsuchikawa *et al.* (2003a) sur la classification de plusieurs essences de bois. La longueur d'onde égale à 2272 nm est associée aux liaisons O-H de la cellulose (Feraz *et al.*, 2007). Le délavage a surtout un effet sur les extractibles, et non pas sur la cellulose ou la lignine. C'est le cas par exemple sur les éprouvettes d'aubier de Pin sylvestre, pour lesquelles on peut poser l'hypothèse du délavage des sucres comme déterminé par Karlsson *et al.* (2012) dans leurs travaux. Une analyse chimique des éprouvettes avec et sans délavage serait pertinente pour déterminer le type de molécules affectées et leur concentration.

Classification – différenciation des essences de bois

Le NIRS apparaît comme un outil performant pour distinguer les essences de bois étudiées. En effet, dans nos travaux, les analyses discriminantes linéaires réalisées sur les quatre premières composantes des ACP permettent, en validation de classer correctement 100% des éprouvettes non délavées de Pin Sylvestre, 88% des éprouvettes de Red Cedar non délavées et 50% des éprouvettes de Cryptoméria non délavées. Ces taux sont beaucoup plus intéressants sur les éprouvettes délavées puisqu'ils atteignent 100% pour le Cryptoméria et le Pin Sylvestre et 99% pour le Red Cedar. Ces résultats indiquent donc que le délavage augmente la signature chimique du bois de Cryptoméria par rapport aux deux autres essences étudiées. Les résultats

sur les éprouvettes délavées concordent avec les études réalisées sur le sujet (Tsuchikawa *et al.*, 2003b ; Peng *et al.*, 2021) en termes de performance.

Nos travaux permettent de mettre en évidence, sur les éprouvettes non délavées de Cryptoméria, la possibilité de distinguer les éprouvettes prélevées dans le duramen et les éprouvettes prélevées dans l'aubier. D'ailleurs, la visualisation des éprouvettes de Cryptoméria sur le premier plan de l'ACP (spectre $\log(1/R)$) permet de vérifier que les éprouvettes prélevées sur les planches exposées pendant 7 ans correspondent bien à du duramen. Cependant, ces différences n'apparaissent pas dans l'analyse des éprouvettes délavées. Ceci certainement du fait du lessivage de molécules discriminantes.

Ces résultats démontrent bien l'applicabilité du NIRS à la classification des essences de bois, qui du fait de la rapidité et simplicité des manipulations, pourrait être réalisée dans le cadre de contrôles lors de l'achat de bois par des revendeur ou encore directement sur des chantiers dans le cadre d'expertises, sans que les analyses ne détruisent les planches étudiées.

Détermination de la densité du bois

Dans notre étude, les modèles de prédiction réalisés à partir de l'analyse discriminante par les moindres carrés partiels sont particulièrement robustes. Le modèle le plus performant (modèle 10, tableau 9), présente un $R^2=0.93$ et une erreur de prédiction $SEP=0.024$. Cette erreur est comparable à celles réalisées de manière traditionnelle avec un mesureur de densité de type « pilodyn » sur des échantillons similaires, qui est d'environ 0.022 (Schimleck *et al.*, 2011). Ce modèle est plus performant que ceux déterminés précédemment dans différentes études sur la densité du Cryptoméria japonica (Watanabe *et al.*, 2012 ; Fujimoto *et al.*, 2015).

De plus, le modèle développé est utilisable sur des éprouvettes non délavées et délavées avec une précision plus grande que les deux modèles développés pour ces deux types de « prétraitement » séparément. Le choix de développer un modèle sur la base complète est ainsi justifié en termes de performances et de robustesse.

En complément, dans nos travaux, la durabilité face aux champignons n'est pas corrélée à la densité des éprouvettes (résultats non détaillés dans ce manuscrit). Pourtant, plusieurs études tendent à démontrer une corrélation entre ces données (Beauchene, 2012 ; Lehnenbach *et al.*, 2019 ; Perrot *et al.*, 2020). On peut ainsi émettre l'hypothèse que la corrélation entre la densité et la durabilité face aux champignons est relative à l'espèce de bois étudiée.

De la même manière le degré d'attaques par les termites, exprimé par la cotation visuelle des dégâts ou la perte de masse, n'est pas corrélé à la densité, comme

démontré dans plusieurs études (Rashmi et Sundararaj, 2013 ; Owoyemi et Olaniran, 2014). Là aussi, la corrélation est peut-être relative à l'espèce de bois étudiée.

Détermination de la teneur en eau

Dans nos travaux, le modèle développé sur la base de la régression des moindres carrés partiels, appliquée dans la gamme de l'infrarouge en prenant la dérivée première des spectres, donne des résultats satisfaisants pour prédire la teneur en eau des éprouvettes ($R^2=0.734$). Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Fujimoto *et al.* (2015) sur le *C. japonica*. Pourtant, la SPIR est particulièrement performante pour déterminer la teneur en eau dans plusieurs études (Cooper *et al.* (2011) sur *Pinus sp.* et *T. plicata* ; Hoffmeyer et Pedersen sur *Picea abies*). Cette différence de performance peut s'expliquer par plusieurs hypothèses : il est important de rappeler ici que le spectromètre permet de mesurer les caractéristiques du bois à sa surface, alors que l'humidimètre utilisé dans nos travaux mesure la teneur en eau à une profondeur de 3 mm. La surface du bois est beaucoup plus sensible aux variations d'humidité relative ambiante. Dans nos travaux, la mesure à l'humidimètre a été réalisée au laboratoire de l'ORLAT à St André et l'acquisition des données spectrales à l'UMR Qualisud de St Pierre, le lendemain, zones qui connaissent des microclimats différents. La réalisation des différentes manipulations sur un même site aurait peut-être donné des résultats plus intéressants. De plus l'appareil utilisé pour mesurer la teneur en eau (mini-BLD200, Protimeter), qui a été étalonné lors de sa fabrication pour des mesures réalisées sur du bois à 20°C, présente une erreur standard de 1% (selon la notice du fabricant). Dans nos travaux, les mesures ont été réalisées sur les éprouvettes conditionnées à température ambiante, souvent bien supérieure à 20°C à La Réunion ; ce qui peut également influencer sur les résultats. Plusieurs humidimètres ont été testés par Betak *et al.* (2023), dont un humidimètre à résistance semblable à celui utilisé dans nos travaux. Les résultats mettent en évidence des différences comprises entre 2 et 5% par rapport aux résultats acquis par rapport à la méthode gravimétrique de référence. Aussi, dans le cadre d'études future, il conviendrait d'utiliser la méthode gravimétrique pour mesurer la teneur en eau des éprouvettes, comme décrite dans la norme EN 113-2 (2020) pour améliorer la performance des modèles prédictifs.

Prédiction de la durabilité naturelle face aux champignons Basidiomycètes

Les résultats de nos travaux portant sur la prédiction de la classe de durabilité individuelle des éprouvettes de bois et sur la prédiction des pertes de masse provoquées par les champignons présentent des résultats comparables à ceux obtenus dans différentes études sur d'autres essences de bois (Flaete et Haartveit (2004), Sykacek *et al.* (2006), Chaix *et al.* (2008)). Cependant, les meilleures prédictions sont obtenues lorsque les résultats sont classés selon deux classes de

durabilité : 85% des échantillons bien classés en utilisant l'algorithme des k plus proches voisins pour les valeurs quantitatives et 82% des échantillons bien classés en validation après régression des moindres carrés partiels pour les valeurs quantitatives. De plus, les deux classes utilisées (la première regroupant les éprouvettes classées DC1 et DC2 et la seconde les éprouvettes DC3 à DC5) sont suffisantes pour déterminer la performance des essences de bois pour une utilisation en classes d'emploi 1 à 4 (selon EN 460, 2020). De plus, comme vu dans la première partie de ces travaux, la classification d'une essence de bois est réalisée en fonction de la moyenne des pertes de masse individuelles des éprouvettes et en fonction de la répartition des valeurs individuelles dans les classes de durabilité. Aussi, si le Cryptoméria est classé « DC1-DC2 », on « accepte » une erreur de l'ordre de 32%, correspondant aux éprouvettes dont les valeurs individuelles de perte de masses sont comprises dans les classes de durabilité DC3, DC4 et DC5. Cette erreur est alors supérieure à celle des prédictions mise en évidence par la SPIR. Ce qui encourage le développement de cette technique.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude permettent de mieux qualifier le bois de Cryptoméria, notamment pour d'une utilisation en zone tropicale, à La Réunion, où les conditions climatiques sont particulièrement favorables aux attaques de champignons Basidiomycètes et de termites. La force de cette étude réside dans l'échantillonnage très large de nombre d'éprouvettes.

Ainsi, la durabilité du duramen de Cryptoméria de La Réunion est particulièrement variable face aux attaques des deux champignons utilisés. La médiane du pourcentage de perte de masse face à *P. placenta*, champignon le plus discriminant, permet de classer cette essence dans la classe de durabilité DC2, soit « Durable ». Cependant, la répartition des valeurs individuelles de perte de masse des éprouvettes dans les différentes classes de durabilité ne permet pas de classer cette essence selon les préconisations de la norme EN 350 (2016). La variabilité observée a une influence significative dans la détermination de la performance de cette essence et son utilisabilité dans les différentes classes d'emploi. Les résultats démontrent tout de même que le bois provenant de La Réunion est plus durable face aux champignons que celui issu d'Asie ou d'Europe, avec l'hypothèse d'une origine génétique. Les résultats observés sur le Pin Sylvestre (Non Durable) et sur le Red Cedar (Très Durable) sont conformes à la littérature et les dispositions normatives de détermination de leur performance s'appliquent, du fait de leur faible variabilité.

L'épreuve de délavage en laboratoire et l'exposition des planches de duramen de Cryptoméria comme bardage (classe d'emploi 3.2) pendant 7 ans apporte des informations pertinentes sur la performance du Cryptoméria. Cette essence est classée DC4 (Faiblement Durable) après délavage et DC5 (Non Durable) après exposition naturelle. Le délavage des éprouvettes de Pin Sylvestre et de Red Cedar n'affecte pas leurs performances. Ces travaux démontrent également que le délavage des éprouvettes en laboratoire (selon EN 84, 1997) est moins agressif qu'une exposition naturelle des planches avant découpe des éprouvettes.

Au vu de ces résultats, il est peu recommandé d'utiliser le bois de Cryptoméria en classe d'emploi 3.2 sans traitement, comme indiqué dans la fiche Tropix (2013). Cette essence devrait être réservée, sans traitement, à une utilisation en classes d'emploi 1 et 2. Il convient ainsi de modifier les dispositions de cette fiche.

Nos travaux sur les champignons Basidiomycètes permettent de proposer des révisions aux normes européennes sur le sujet :

- Norme EN 350 (2016) : Révision du système de détermination de la classe de durabilité d'une essence en fonction la répartition des valeurs individuelles de perte de masse : prendre en compte toutes les classes de durabilité comprenant au moins 20% des valeurs individuelles et de définir la classe de

durabilité dans un intervalle «x-y», « x » étant la classe de durabilité la plus forte et « y » étant la plus faible.

- Norme EN 350 (2016) : Exiger un délavage ou une exposition naturelle des éprouvettes avant essais pour les essences de bois connaissant une durabilité variable.
- Norme EN 84 (2020) : augmenter le nombre de cycles de délavage et/ou la pression exercée afin que l'épreuve soit plus agressive et corresponde à une exposition naturelle des planches en situation d'emploi 3.2.
- Proposer un protocole d'exposition naturelle des éprouvettes avant essai qui correspondrait à une exposition des planches avant découpe pendant au moins 10 ans en situation d'emploi 3.2. Pour ce faire, il conviendrait de réaliser une revue des méthodes utilisées dans les travaux de recherche et de compléter ces travaux.

Le résultats des essais de durabilité face aux termites sont conformes à la littérature et aux normes européennes, sauf pour le Red Cedar. En effet, le Cryptomérida et le Pin Sylvestre sont classés « Sensibles » face aux deux termites utilisés. Le Red Cedar est classé « Sensible » dans la norme EN 360 (2016) et la fiche Tropix (2012) alors que dans notre étude, il est classé « Moyennement Durable », avec de surcroît des dégâts très faibles sur quelques éprouvettes seulement et une mortalité totale des termites qui intervient au plus tard deux semaines après le début de l'essai. Il conviendrait donc de mieux étudier la durabilité de cette essence avec un échantillonnage plus grand.

Les travaux sur les termites permettent de proposer des pistes de révisions normatives :

- Norme EN 117 (2013) : révision du système de cotation visuelle des dégâts et de détermination de la classe d'emploi. Il conviendrait, en complément de la cotation visuelle, de mesurer la perte de masse des éprouvettes en fin d'essai et de prendre en compte l'évolution de la mortalité des termites durant l'essai.
- Norme EN 117 (2013) : supprimer ou revoir la définition classe de durabilité « Moyennement Durable ». Il conviendrait à mon sens de supprimer cette classe de durabilité (qui n'a qu'une valeur informative selon la norme EN 350 (2016)) et d'introduire dans le système normatif européen des « essais de choix » afin de vérifier l'appétence d'une essence par rapport à des essences de référence. Aussi, une essence définie comme « Moyennement Durable » pourrait être testée dans des dispositifs similaires à ceux de l'EN 117 (2013) en doublant le nombre de termites : une série d'essai comprenant dans chaque récipient d'essai une éprouvette de l'essence à tester et une éprouvette d'une essence « Durable » et une série d'essai comprenant dans chaque récipient d'essai une éprouvette de l'essence à tester et une éprouvette d'une essence « Sensible ». En fonction des résultats de cotation, de perte de masse et de

mortalité des termites, l'essence en question serait définie comme « Durable » ou « Sensible ».

- Norme EN 350 (2016) : indiquer dans les tableaux de classification des essences, la durabilité par rapport à chaque espèce termites utilisées. En effet, cette mention permettrait de mieux évaluer l'utilisabilité d'une essence dans un secteur géographique, en fonction des espèces de termites présentes.

De manière générale, il serait intéressant de mieux intégrer les territoires ultramarins français dans le système normatif européen. En effet, la plupart des normes sont faites pour une utilisation en France continentale et en Corse. Faisant partie des commissions de normalisation Françaises et Européennes sur la durabilité du bois et les matériaux biosourcés depuis 2009, cette requête a été apportée à plusieurs reprises leur prise en compte. Il en résulte, dans chacun des documents normatifs portant sur les termites, l'ajout d'une phrase dans le domaine d'application : « Ce mode opératoire peut s'appliquer non seulement aux autres espèces de *Reticulitermes* mais aussi aux autres espèces de la famille des *Rhinotermitidae* en adaptant, si nécessaire, les conditions de température et d'humidité aux exigences spécifiques des espèces concernées », comme c'est le cas de la norme EN 117 (2013) dont le titre indique clairement que celle-ci est faite pour être utilisée avec des termites européens du genre *Reticulitermes*. Dans cet exemple, il conviendrait de créer une norme portant sur les termites souterrains : « Produit de préservation du bois - Détermination du seuil d'efficacité contre les termites souterrains (Méthode de laboratoire) » et de prévoir plusieurs dispositions en fonction du genre de termites utilisé.

Enfin, la Spectroscopie Proche Infrarouge permet d'évaluer les caractéristiques du bois de *Cryptoméria* et des deux autres essences utilisées dans nos travaux avec des taux d'erreurs faibles. Les résultats mettent en évidence la possibilité de développer des modèles permettant de mesurer la densité et la teneur en eau d'éprouvettes de bois mais aussi de distinguer les essences de bois, de distinguer l'aubier du duramen et même de prédire la durabilité face aux champignons, ceci sur des éprouvettes non délavées et délavées. Ce qui permet d'utiliser cet outil pour analyser le bois en situation d'emploi. Cependant, nos travaux mettent en évidence la nécessité de bien calibrer les modèles, avec des valeurs de référence fiables.

La performance de la spectroscopie proche infra-rouge comme outil de prédiction de la durabilité naturelle pourraient être améliorée en essayant de créer des modèles prédictifs pour chacun des champignons et pour chacune des essences de bois à l'essai et en couplant les techniques de spectroscopie à celles de « Deep Learning » comme suggéré par différents auteurs (Cornet *et al.*, 2019 ; Vasseur *et al.*, 2022).

Ainsi des outils industriels pourraient être développés à destination des acteurs de la filière bois dans le cadre du contrôle qualité, de la sélection des essences par les négocees et dans le cadre d'expertises.

Références Bibliographiques

- Adedipe, O.E., Dawson-Andoh B. (2008) Predicting moisture content of yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera*) veneer using near infrared spectroscopy. For Prod J 58: 28-33.
- Amusant, N., Flora, C., Beauchêne, J., Houël, E., Duplais, C. (2017) A review on prediction methods of wood natural durability. IRG/WP Annual Meeting, 48,17 p.
- Anshari, B., Guan, Z.W., Kitamori, A., Jung, K., Hassel, I., Komatsu, K. (2011) Mechanical and moisture-dependent swelling properties of compressed Japanese cedar. Construction and Building Materials, 25(4), 1718-1725.
- Arihara, S., Umeyama, A., Bando, S., Kobuke, S., Imoto, S., Ono, M., Yoshikawa, K., Amita, K., Hashimoto, S. (2004) Termiticidal constituents of the black-heart of *Cryptomeria japonica* (in Japanese). Mokuzaï Gakkaishi, 50, 413-421.
- AWPA (2009) Standard method for laboratory evaluation to determine resistance to subterranean termites. E-1-09. American Wood Protection Association, Birmingham, AL.
- Barker, M.L., Rayens, W. (2003) Partial Least Squares For Discrimination, Journal of Chemometrics. Journal of Chemometrics. 17. 166 - 173.
- Barnes, R.J., Dhanoa, M.S., Lister, S.J. (1989) Standard normal variate transformation and de-Trending of near-infrared reflectance spectra. Appl. Spectrosc., 43(5) :772-777.
- Barnes, R.J., Dhanoa, M.S., Lister, S.J. (1993) Correction to the description of standard normal variate (SNV) and detrend (Dt) transformations in practical spectroscopy with applications in food and beverage analysis, 2nd edition. J. Near Infrared Spectrosc., 1 :185-186.
- Barton, G.M., MacDonald, B.F. (1971) The chemistry and utilization of western red cedar. Department of Fisheries and Forestry, Canadian Forestry Service. Publication no. 1023, pp 31.
- Beauchene, J. (2012) Durabilité naturelle des bois de Guyane. Rapport du projet « Degrad ». Cirad.
- Betak, A., Zach, J., Misak, P., Vanerek, J. (2023) Comparison of Wood Moisture Meters Operating on Different Principles of Measurement. Buildings 13, 531.
- Birkett, MD, Gambino, M.J.T. (1989) Estimation of pulp kappa number with near-infrared spectroscopy. Tappi Journal, 72:193–197.
- Blanchette, R.A. (1984) Delignification by wood-decay fungi. Annual Review of Phytopathology, 22(1): 303-325.
- Blanchette, R.A. (1995). Degradation of the lignocellulose complex in wood. Canadian Journal of Botany, 73(S1), S999-S1010.
- Bokobza, L. (1998) Near infrared spectroscopy. J Near Infrared Spectrosc 6: 3-17.

- Borderes, M. (1991) Les bois de l'île de la Réunion. Bois et Forêts des Tropiques, N°229 : 85-94.
- Boudier, E. (1885) Les Hyménomycètes d'Europe : étude sur la classification, la structure et le développement des champignons supérieurs. Imprimerie de C. Clauset.
- Bordereau, C., Peppuy, A. (1996) Les termites de l'île de la Réunion et leurs dégâts. Rapport Chambre de Métiers de la Réunion. 12 p.
- Bordereau, C. & Peppuy, A. (1997) Les termites de l'île de la Réunion. Rapport Chambre de Métiers de La Réunion. 20 p.
- Brown, J., Williams, G.R. (1992) A natural exposure weathering test for the evaluation of preservative performance. IRG/WP Annual Meeting 24.
- Brischke, C., Rapp, A.O. (2008) Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field: observations in different micro-climates. Wood science and technology, 42(8), 663-677.
- Brischke, C., Welzbacher, C.R., Gellerich, A., Bollmus, S., Humar, M., Plaschkies, K., Scheiding, W., Alfredsen, G., Van Acker, J., De Windt, I. (2013) Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi - a European round-robin test. IRG/WP Annual Meeting 13.
- Brischke, C., Alfredsen, G. (2020) Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay. Applied microbiology and biotechnology, 104, 3781-3795.
- Bush D., Mc Carthy, K., Meder, R. (2011) Genetic variation of natural durability traits in *Eucalyptus cladocalyx* (sugar gum). Ann of Forest Science, 68:105-106.
- Carlisle, A., Brown, A.H.F. (1968) *Pinus Sylvestris* L. Journal of Ecology, 56(1), 269–307.
- Carter, F.L., Smythe, R.V. (1974) Feeding and survival responses of *Reticulitermes flavipes* (Kollar) to extractive softwood from 11 coniferous genera. Holzforschung 28(2): 41–45.
- Cartwright, K.S.G. (1941) The variability in resistance to decay of the heartwood of homegrown western red cedar (*Thuja plicata* D. Don.) and its relation to position in the log. Forestry. 15: 65-75.
- Chaix, G., Monteuis, O., Goh Dorenn K.S., Kokutse A.D., Derkyi, N.S.A., Kadio, A.A., Boutahar, N., Baillères, H. (2008) Rapid prediction of teak wood natural durability using near-infrared spectroscopy. Proceedings of the Regional Workshop held during 2007, Peechi-Karala, India.
- Chaix, G. (2019) La spectroscopie proche infrarouge appliquée au bois à travers les âges. Livret des résumés des 20èmes Rencontres HélioSPIR. HélioSPIR. Montpellier, France.
- Chang, S.T., Cheng, S.S. (2001) Effects of environmental factors on the color of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) yellowish heartwood. Holzforschung, 55, 459-463.

- Cheng, S.S., Lin, H.Y., Chang, S.T. (2005) Chemical Composition and Antifungal Activity of Essential Oils from Different Tissues of Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 614-619.
- Clément, J.L., Bagnères, A.G., Uva, P., Wilfert, L., Quintana, A., Reinhard, J., Dronnet S. (2001) Biosystematics of *Reticulitermes* termites in Europe : morphological, chemical and molecular data. *Insectes Sociaux*, 48:202-215.
- CMAR, ONF, Sciages de Bourbon, FCBA, Ravate (2013) étude de caractérisation physico-mécanique du *Cryptoméria* de La Réunion. Fiches techniques, 16pp.
- Cooper, P.A., Jeremic, D., Radivojevic, S., Ung, Y.T., Leblon, B. (2011) Potential of near-infrared spectroscopy to characterize wood products. *Can J For Res* 41: 2150- 2157.
- Cornet, D., Desfontaines, L., Cormier, F., Marie-Magdeleine, C., Arnau, G. (2019) Assembler la diversité des modèles classiques et « deep learning » pour développer un pipeline de calibration SPIR performant et générique. *Rencontres HélioSPIR Session 5, Association HelioSPIR, Oct 2019, Montpellier, France.*
- DeBell, J.D., Morrell, J.J., Gartner, B.L. (1999) Within-stem variation in tropolone content and decay resistance of second-growth western redcedar. *For. Sci.* 45(1), 101-107.
- Don, D. (1838) *Ann. Nat. Hist.* 1: 233.
- Easty, D.B., Berben, S.A., DeThomas, F.A., Brimmer, P.J. (1990) Near-infrared spectroscopy for the analysis of wood pulp: quantifying hardwood-softwood mixtures and estimating lignin content. *Tappi Journal* 73: 257-261.
- Englerth, G.H., Scheffer, T.C. (1954) Tests of decay resistance of four western pole species.
- EN 73 (2020) Durability of wood and wood-based products - Accelerated ageing of treated wood prior to biological testing - Evaporative ageing procedure. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 84 (2020) Durability of wood and wood-based products - Accelerated ageing of treated wood prior to biological testing - Leaching procedure. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 113-2 (2020) Durability of wood and wood-based products - Test method against wood destroying basidiomycetes - Part 2 : assessment of inherent or enhanced durability. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 117 (2013) Wood preservatives - Determination of toxic values against *Reticulitermes* species (European termites) (Laboratory method). European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 118 (2014) Wood preservatives - Determination of preventive action against *Reticulitermes* species (European termites) (Laboratory method). European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 252 (2014) Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact. European Committee for Standardization. Brussels.

- EN 335 (2013) Durability of wood and wood-based products - Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 350 (2016) Durability of wood and wood-based products - Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 460 (2023) Durability of wood and wood-based products - Guidance on performance. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 1912 (2012) Structural Timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 927-6 (2018) Paints and varnishes - Coating materials and coating systems for exterior wood - Part 6: Exposure of wood coatings to artificial weathering using fluorescent UV lamps and water. European Committee for Standardization. Brussels.
- FCBA (2015) Evaluation du gisement de déchets bois et son positionnement dans la filière bois/bois énergie ». Rapport d'étude. ADEME.
- FD P20-651 (2011) Durabilité des éléments et ouvrages en bois. Association Française de Normalisation, Paris.
- Ferraz, A., Mendonça, R., Guerra, A., Ruiz, J., Rodríguez, J., Baeza, J., Freer, J., (2007) Near-Infrared Spectra and Chemical Characteristics of *Pinus taeda* (Loblolly Pine) Wood Chips Biotreated by the White-Rot Fungus *Ceriporiopsis subvermispora*. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 24. 99-113.
- Flæte, P.O., Haartveit, E.Y. (2003) Differentiation of Scots pine heartwood and sapwood by near infrared spectroscopy. The International Research Group on Wood Preservation. Doc. No. IRG/WP 03-10459. IRG Secretariat, Stockholm, Sweden. 12 pp.
- Flæte, P.O., Haartveit, E.Y. (2004) Non-destructive prediction of decay resistance of *Pinus sylvestris* heartwood by near infrared spectroscopy. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 19. 55-63.
- Fries, E.M. (1849) *Summa vegetabilium Scandinaviae*. Typographia Academica.
- Fu, L., Li, N., Mill, R. (1999) Sections on Cephalotaxaceae, Ginkgoaceae and Pinaceae. In Wu Zheng-yi and Peter H. Raven (eds.). *Flora of China*, Volume 4. Beijing: Science Press; St. Louis: Missouri Botanical Garden.
- Fujimoto, T., Numa, T., Kobori, H., Tsuchikawa, S. (2015) Visualization of spatial distribution of moisture content and basic density using near-infrared hyperspectral imaging method in sugi (*Cryptomeria japonica*). *International Wood Products Journal*, 6. 46-48.
- Ghesini, S., Messenger, M.T., Pilon, N., Marini, M. (2010) First report of *Reticulitermes flavipes* (Isoptera: Rhinotermitidae) in Italy. *Florida Entomologist*, 93, 327–328.
- Glass, S.V., Zelinka, S.L. (2010) Moisture relations and physical properties of wood. In: *Wood handbook - Wood as an engineering material*, Chapter 4. Centennial

- ed, general technical report FPL-GTR-190. Pp: 1-19 USDA Forest Service Forest Products Laboratory, Madison.
- Grace, J.K., Ewart, D.M., Tome, C.H.M. (1996) Termite resistance of wood species grown in Hawaii. *Forest Products Journal*, 46, 57-60.
- Grace, J. (1996) Absence of overt agonistic behavior in a northern population of *Reticulitermes flavipes* (Isoptera: Rhinotermitidae). *Sociobiology*, 28, 103–110.
- Harris, W. (1962) Termites in Europe. *New Scientist*, 13, 614–617.
- Heilmann-Clausen, J. (2018). The fungal genus *Poria*: tradition and transition. *Mycological Progress*, 17(5), 1183-1204.
- Hoffmeyer, P., Pedersen, J.G. (1995) Evaluation of density and strength of Norway spruce wood by near-infrared reflectance spectroscopy. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 53:165-170.
- Hon, D.N.S., Minemura, N. (1991) Color and discoloration. In *Wood and Cellulosic Chemistry*; Hon, D. N. S., Shiraish, N., Eds.; Dekker: New York, pp 395-454.
- Indrayani, Y., Yoshimura, T., Yanase, Y., Imamura, Y. (2007) Feeding responses of the western dry-wood termite *Incisitermes minor* (Hagen)(Isoptera: Kalotermitidae) against ten commercial timbers. *Journal of Wood Science*, 53(3), 239-248.
- ISO 17025 (2017) General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. AFNOR
- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. (2014) *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- Karlsson, O., Yang, Q., Sehlstedt-Persson, M., Morén, T. (2012) Heat treatments of high temperature dried norway spruce boards: Saccharides and furfurals in sapwood surfaces. *Bioresources*. 7. 2284-2299.
- Kennard, R.W., Stone, L.A., (1969) Computer aided design of experiments. *Technometrics* 11, 137-148.
- Kijidani, Y., Toyoumi, A., Kitahara, R., Fujimoto, H. (2011) Termite Resistance and Extractives Distribution of Sapwood and Heartwood of Obi-Sugi Cultivars (*Cryptomeria japonica*) *Mokuzai Gakkaishi*, 57, 195-202.
- Kim, Y.S. (2017) Current Researches on The Weathering of Wood. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 45(5):483-494
- Kirker, G.T., Blodgett, A.B., Arango, R.A., Lebow, P.K., Clausen, C.A. (2013) The role of extractives in naturally durable wood species. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 82:53–58.
- Kirton, L.G., Brown, V.K. (2000) The taxonomic status of pest species of *Coptotermes* in southeast Asia: resolving the paradox in the pest status of the termites *Coptotermes gestroi*, *C. havilandi* and *C. travians* (Isoptera: Rhinotermitidae). *Sociobiology*, 42, 43-63.
- Kollar, V. (1837) *Naturgeschichte des schädlichen Insekten*. Verb. Landwirtsch. Ges. Wien, 411–413.

- Kutnik, M., Vuillemin, J., Paulmier, I., Le Bayon, I., Legay, S., Raphalen, E., Jequel, M., Farnier, N., Glandut, T. (2012) Laboratory evaluation of the natural durability and treatability of *Cryptomeria japonica* grown in La Reunion Island. IRG/WP Annual Meeting 24.
- Kutnik, M., Bagnères, A.G. (2005) Les termites : outils de détermination des espèces (cas des Reticulitermes en Europe). *Bois et Forêts des Tropiques*, n°283(1):81-90.
- Leblon, B., Adedipe, O., Hans, G., Haddadi, A., Tsuchikawa, A., Burger, J., Stirling, R., Pirouz, Z., Groves, K., Nader, J., La Rocque, A. (2013) A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood. *The Forestry Chronicle* 89: 595-606.
- Lehnebach, R., Bossu, J., Va, S., Morel, H., Amusant, N., Nicolini, E., and Beauchene, J. (2019) Wood density variations of legume trees in French Guiana along the shade tolerance continuum: heartwood effects on radial patterns and gradients. *Forests* 10: 80.
- Linnaeus, C. (1753), *Sp. Pl.* ed. 1, 2: 1000
- Mancini, M., Rinnan, A. (2023) Classification of waste wood categories according to the best reuse using FT-NIR spectroscopy and chemometrics. *Anal Chim Acta*. 1275:341564.
- Mannesmann, R. (1973). Comparison of twenty-one commercial wood species from north American in relation to feeding rates of the Formosan termite, *Coptotermes formosanus* Shiraki. *Mater.Org.* 8(2):107–120.
- Martens, H. Naes, T. (1989) *Multivariate Calibration*. John Wiley and Sons, Chichester and New York (1989), 419 + xvii pp.
- Martínez, A.T., Ruiz-Dueñas, F.J., Martínez, M.J., Del Río, J.C., Gutiérrez, A. (2009) Enzymatic delignification of plant cell wall: from nature to mill. *Current Opinion in Biotechnology*, 20(3), 348-357.
- Matsuoka, S., Amemiya, S., Shoji, Y., Inoue, M., Abe, H., Naito, K. (1970). Stake test at Asakawa Experiment Forest, The natural durability of some woods. *Bulletin of Forestry and Forest Products Research Institute* 232: 109-135.
- Meder, R., Brawner, J.T., Downes, G.M., Ebdon, N. (2011) Towards the in-forest assessment of Kraft pulp yield: comparing the performance of laboratory and hand-held instruments and their value in screening breeding trials. *J Near Infrared Spectrosc* 19: 421-429.
- Minore, D. (1990) *Thuja plicata* Donn ex D. Don—western redcedar. *Silvics of North America*, 1, 590-600.
- Morales-Ramos, J.A., Rojas, M.G. (2001) Nutritional ecology of the Formosan subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae): feeding response to commercial wood species. *J Econ Entomol* 94:516–523
- Morris, P.I., Grace, J.K., Tsunoda, K. (2009). Field testing of wood preservatives. XVIII. Performance of borate-treated wood against subterranean termites. *Proc. Can. Wood Preserv. Assoc.* 30:272–295.

- Næs, T., Isaksson, T., Fearn, T., Davies, T. (2002) A user-friendly guide to multivariate calibration and classification. NIR Publications, Chichester, UK. 344 pp.
- Nexa, CIRBAT (2018) Le livre vert du Bâti Tropical à La Réunion « revue des savoir-faire réunionnais face aux défis à relever ». 87pp.
- NF B50-105-3 (2014) Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Bois et matériaux à base de bois traités avec un produit de préservation préventif - Partie 3 : spécifications de préservation des bois et matériaux à base de bois et attestation de traitement - Adaptation à la France Métropolitaine et aux DOM. AFNOR, France
- NF B52-001-1 (2018) Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés résineux et feuillus - Partie 1 : bois massif. AFNOR, France
- Nomadéis (2018) Matériaux locaux pour le bâti tropical à La Réunion : diagnostic et ressources mobilisables. BioRev'Tropics – Rapport final. DIECCTE Réunion. 53pp.
- Nunes, L., Cruz, H. (2003). Fungal degradation of wood in buildings. In RILEM Int. Conf. on Microbial Impact on Building Materials. pp. 84-93.
- Ohtani, Y., Hazama, M., Sameshima, K. (1996) Crucial chemical factors for termiticidal activity of Hinoki wood (*Chamaecyparis obtusa*) II. Variations in termiticidal activities among five individual samples of Hinoki wood. *Mokuzai Gakkaishi* 42:1228–1233.
- Ohmura, W., Momohara, I., Kiguchi, M., Yoshimura, T., Takematsu, Y., Gensai, H., Nomura, T., Kaneda, T., Saegusa, M., Maeda, S., Tanikawa M. (2011) Anti-termite performance of Japanese and foreign timber species under different degradation environments. *Mokuzai Gakkaishi* 57(1):26–33.
- Owoyemi, J., Olaniran, S. (2014) Natural Resistance of ten selected Nigerian wood species to subterranean termites' attack. *International Journal of Biological Sciences and Applications*. 1. 35-39.
- Ozanne, G. (1996) International standards: can we make them simple ? The International Research Group on Wood Protection. Document IRG/WP 96-20092. 10 p.
- Ozanne, G. (2001) Work Program of CEN/TC 38 (April 2001) and European Publications. The International Research Group on Wood Protection. Document IRG/WP 01-20234. 24 p.
- Pasquini, C. (2003) Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. *J Braz Chem Soc* 14: 198-219.
- Peattie, D. (1950) A natural history of western trees. New York: Bonanza
- Peng, Z., Zhen-Yu, L., Cheng-Kun, W. (2021) Wood Species Recognition Based on Visible and Near-Infrared Spectral Analysis Using Fuzzy Reasoning and Decision-Level Fusion. *Journal of Spectroscopy*, vol. 2021.
- Peppuy, A. (2002) Les termites de La Réunion. Clé de détermination, dégâts et biologie sommaire. Rapport ORLAT-Chambre des métiers, 14 p.

- Perrot, T., Salzet, G., Amusant, N., Beauchene, J., Gérardin, P., Dumarçay, S., Sormani, R., Morel-Rouhier, M., Gelhaye, E. (2020) Brief report A reverse chemical ecology approach to explore wood natural durability.
- Pokorny, J. (1995) Arbres. 32pp. Gründ.
- Perdereau, E., Bagnères, A.G., Dupont, S., Dedeine, F. (2010) High occurrence of colony fusion in a European population of the American termite *Reticulitermes flavipes*. *Insectes Sociaux*, 57, 393–402.
- Perdereau, E., Bagnères, A.G., Bankhead-Dronnet, S., Dupont, S., Zimmerman, M., Vargo, E.L., Dedeine, F. (2013) Global genetic analysis reveals the putative native source of the invasive termite, *Reticulitermes flavipes*, in France. *Molecular ecology*, 22, 1105–19
- Radkau, J. (2012). Wood: a history. Polity.
- Rashmi R.S., Sundararaj, R. (2013) Physical and chemical properties of some imported woods and their degradation by termites, *Journal of Insect Science*, Volume 13, Issue 1, 63pp.
- Ripa, R., Castro, L. (2000) Presencia de la termita subterránea *Reticulitermes santonenis* de Feytaud (Isoptera: Rhinotermitidae) en la comuna de Quillota. In: XXII Chilean Congress of Entomology, La Sociedad Chilena de Entomología edn, Valdivia
- Russell, B.M., Honkala, B.H. (1990) Silvics of North America: 1. Conifers; 2. Hardwoods. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. vol.2, 877 p.
- Rust, M.K., Reiersen, D.A. (1977) Using wood extracts to determine the feeding preferences of the western dry wood termite *Incisitermes minor* (Hagan). *J. Chem. Ecol.* 3(4):391–399.
- Ruter, S., Werner, F., Forsell, N., Prins, C., Vial, E., Levet, A.L. (2016) ClimWood2030, Climate Benefits of Material Substitution by Forest Biomass and Harvested Wood Products: Perspective 2030. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- Santos, A.J.A., Alves, A.M.M., Simões, R.M.S., Pereira, H., Rodrigues, J., Schwanninger, M. (2012) Estimation of wood basic density of *Acacia melanoxylon* (R Br) by near infrared spectroscopy. *J Near Infrared Spectrosc* 20: 267- 274.
- Scheffer, T.C., Morrel, J.J. (1998) Natural durability of wood: a worldwide checklist of species. Forest Research Laboratory, Oregon State University. Research Contribution 22, pp 58
- Schimleck, L.R., Michell, A.J., Raymond, C.A., Muneri, A. (2011) Estimation of basic density of *Eucalyptus globulus* using near-infrared spectroscopy. *Can. J. For. Res.* 29: 194–201.
- Schwarze, F. (2000) Wood decay under the microscope. *Fungal Genetics and Biology*, 29(3), 261-272.

- Se Golpayegani, A., Thévenon, M.F., Gril, J., Pourtahmasi, K. (2010) Natural durability of Mulberry wood from Iran. IRG/WP 10-10737.
- Silba, J. (1986) An international census of the Coniferae. Phytologia memoir no. 8. Corvallis, OR: H.N. Moldenke and A.L. Moldenke.
- Smith, K.T., Reynolds, J.M. (2006). The potential of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a commercial species for the United Kingdom. *Forestry*, 79(1), 51-65.
- So, C.L., Lebow, S.T., Groom, L.H., & Rials, T.G. (2004) The application of near infrared (NIR) spectroscopy to inorganic preservative-treated wood. *Wood and Fiber Science*, 329-336.
- Sogabe, A., Kinjo, K., Abe, F., Yamauchi, T., Yaga, S. (2000) Termiticidal substances from the heartwood of *Cryptomeria japonica* D. Don. *Mokuzai Gakkaishi*, 46, 124-131.
- Stavisky, A., Golay, M. (1964) Smoothing and differentiation of data by simplified least square procedures. *Analytical Chemistry*, 36 :1627-1639.
- Stirling, R., Grace, J., Morris, P. (2015) Prediction of Decay and Termite Resistance in Western Red Cedar. *Forest Products Journal*, 65, 84-92.
- Shibutani, S., Obataya, E., Hanata, K., Doi, S. (2005) Termite durability of sugi (*Cryptomeria japonica*) heartwood kiln-dried under a high-temperature process in relation to wood extractives. IRG Annual Meeting 05.
- Silba, J. (1986) An international census of the Coniferae. Phytologia memoir no. 8. Corvallis, OR: H.N. Moldenke and A.L. Moldenke.
- Su, N.Y., Tamashiro, M. (1986) Wood-consumption rate and survival of the Formosan subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae) when fed one of six woods used commercially in Hawaii. *Proceedings of the Hawaiian Entomological Society* 26:109–113.
- Su, N.Y., Ye W.M., Ripa, R., Scheffrahn R.H., Giblin-Davis R.M. (2006) Identification of Chilean *Reticulitermes* (Isoptera: Rhinotermitidae) inferred from three mitochondrial gene DNA sequences and soldier morphology. *Annals of the Entomological Society of America*, 99, 352–363.
- Sundararaj, R., Shanbhag, R.R., Nagaveni, H.C., Vijayalakshmi, G. (2015) Natural durability of timbers under Indian environmental conditions – An overview. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103, 196-214.
- Sykacek, E. Gierlinger, N., Wimmer, R., Schwanninger, M. (2006) Prediction of natural durability of commercial available European and Siberian larch by near-infrared spectroscopy. *Holzforschung*. 60. 643-647.
- Takahara, H., Ikeda, S., Sasaki, N., Hayashi, R. (2023) Vegetation history of *Cryptomeria japonica* in Japan since the last interglacial period. *Ecological Research*, 38(1), 49-63.
- Taylor, A.M., Gartner, B.L., Morrell, J.J. (2002) Heartwood formation and natural durability – A review. *Wood and Fiber Science*, 34 (4), pp 587-611

- Taylor, A.M., Gartner, B.L., Morrell, J.J., Tsunoda, K. (2006) Effects of heartwood extractive fractions of *Thuja plicata* and *Chamaecyparis nootkatensis* on wood degradation by termites or fungi. *J. Wood Sci.* 52:147–153.
- Tewari, M.C. (1978) Data on natural durability of timber species (installed in the test yard at New Forest, Dehra Dun) according to 1976 inspection, their treatability and seasoning characteristics. IRG Annual Meeting 1978.
- Thygesen, L., (1994) Determination of dry matter content and basic density of Norway spruce by near-infrared reflectance and transmittance spectroscopy. *J Near Infrared Spectrosc* 2: 127-135.
- Tropix (2012) Fiche sur l'essence *Thuja plicata*. <https://tropix.cirad.fr>. Cirad – BioWooEB.
- Tropix (2013) Fiche sur l'essence *Cryptomeria japonica*. <https://tropix.cirad.fr>. Cirad – BioWooEB.
- Tropix (2022) Fiche sur l'essence *Pinus sylvestris*. <https://tropix.cirad.fr>. Cirad – BioWooEB.
- Tsuchikawa, S., Inoue, K., Noma, J., Hayashi, K. (2003a). Application of near-infrared spectroscopy to wood discrimination. *J. Wood Sci.* 49: 29–35.
- Tsuchikawa, S., Yamato, K., Inoue, K. (2003b) Discriminant analysis of wood-based materials using near-infrared spectroscopy. *J Wood Sci* 49, 275–280.
- Tsuchikawa, S., Inoue, K., Mitsui, K. (2004) Spectroscopic monitoring of wood characteristics variation by light-irradiation. *For. Prod. J.* 54(11): 71–76.
- Tsuchikawa, S., Kobori, H. (2015) A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *Journal of Wood Science*, 61(3), 213-220.
- Van Acker, J., MILITZ, H., Stevens, M. (1999) The significance of accelerated laboratory testing methods determining the natural durability of wood. *HOLZFORSCHUNG*, 53(5), 449–458.
- Van Acker, J., Stevens, M., Carey, J., Sierra- Alvarez, R., Militz, H., Lebayon, I., Kleist, G., Peek, R.D. (2003) Biological durability of wood in relation to end-use. Part 1. Towards a European standard for laboratory testing of the biological durability of wood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61, 35-45
- Vasseur, F., Cornet, D., Beurier, G., Messier, J., Rouan, L., Bresson, J., Ecartot, M., Stahl, M., Heumos, S., Gérard, M., Reijnen, H., Tillard, P., Lacombe, B., Emanuel, A., Floret, J., Estarague, A., Przybylska, S., Sartori, K., Gillespie, L.M., Baron, E., Kazakou, E., Vile, D., Violle, C. (2022) A Perspective on Plant Phenomics: Coupling Deep Learning and Near-Infrared Spectroscopy. *Front Plant Sci.* 2022.
- Vivian, M.A., Nunes, G.C., Dobner Jr, M., Modes, K.S., Grosskopf, E.J., Belini, U.L. (2020) Natural durability of *Cupressus lusitanica*, *Cryptomeria japonica* and *Pinus taeda* woods in field trial. *Floresta*, 50(3), 1603-1612.
- Wallbäcks, L., Edlund, U., Norden, B., Berglund, I. (1991) Multivariate characterization of pulp using ¹³C NMR FTIR and NIR. *Tappi Journal* 74: 201-206.

- Watanabe, K., Kobayashi, I., Kuroda, N. (2012) Predicting oven-dry density of Sugi (*Cryptomeria japonica*) using near infrared (NIR) spectroscopy and its effect on performance of wood moisture meter. *J Wood Sci* 58, 383–390.
- Wright, J.A., Birkett, M.D., Gambino, M.J.T. (1990) Prediction of pulp yield and cellulose content from wood samples using near infrared reflectance spectroscopy. *Tappi J* 73: 164-166.
- XP X CEN/TS 15083-1 (2006) Durability of wood and wood-based products - Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi - Test methods - Part 1: Basidiomycetes. CEN.
- Yamamoto, K., Tamura, A., Nakada, R. (2004) Variation of natural durability of sugi (*Cryptomeria japonica*) wood in 15 clones examined by decay test (Preliminary report). IRG/WP Annual Meeting 2004.
- Yatagai, M., Miyazaki, Y., Ohira, T. (1991) Extractives from yakusugi bogwood and their termicidal activity and growth regulation effects on plant seeds. *Mokuzai Gakkaishi*, 37, 352-357.
- Zabel, R.A., Morrell, J.J. (2020) *Wood Microbiology (Second Edition)*, Academic Press, 556pp.

ANNEXE A. Résultats de l'étude de caractérisation du *Cryptomeria japonica* Durabilité face aux champignons et aux termites souterrains (Kutnik et al., 2012)

Tableau A1. Résultats des essais de durabilité naturelle du duramen de *C. japonica* sur quatre champignons xylophages (CP = *Coniophora puteana* – PP = *Poria placenta* – GT = *Gloeophyllum trabeum* – LL = *Lentinus lepideus*)

decay fungus	plank number	mean moisture content (% m/m)	mean density (kg/m ³)	min mass loss (% m/m)	max mass loss (% m/m)	median mass loss (% m/m) per plank	overall median mass loss (% m/m)
CP	56	41	365	0,8	18,1	7,3	4,7
	332	48	400	1,0	27,8	1,4	
	533	48	276	1,0	11,6	1,9	
	557	39	400	0,9	26,3	5,6	
	572	39	363	0,0	27,0	7,2	
PP	56	40	363	1,0	11,8	3,5	8,1
	332	54	403	0,5	18,2	7,6	
	533	45	287	0,5	26,2	0,9	
	557	54	395	5,5	20,3	10,8	
	572	40	362	5,5	23,4	18,0	
GT	56	33	362	0,6	1,0	0,6	0,7
	332	35	410	0,6	1,1	0,8	
	533	37	283	0,7	0,9	0,8	
	557	32	400	0,6	0,8	0,8	
	572	29	375	0,4	0,7	0,5	
LL	56	35	355	0,9	1,1	1,1	1,0
	332	34	422	1,0	1,3	1,1	
	533	36	283	0,9	1,1	0,9	
	557	30	402	1,0	1,1	1,0	
	572	27	364	0,6	1,3	0,8	

Tableau A2. Résultats des essais de durabilité naturelle du duramen de *C. japonica* sur deux espèces de termites souterrains réalisés selon EN 118 (2014)

samples (for <i>C. japonica</i> : origin and plank n°)	<i>Reticulitermes flavipes</i>			<i>Coptotermes gestroi</i>			
	number of samples rated 3		mean mortality (%)	number of samples rated 3		mean mortality (%)	
	3	4		3	4		
control (Scots pine)	0	3	48,8	0	3	60,6	
Bois de Nefles	21	0	6	100	0	4	100
	445	1	5	100	0	4	100
	325	1	5	100	0	4	100
Makes	9	6	0	100	0	4	100
	576	6	0	100	0	4	100

ANNEXE B. Etude préalable à l'acquisition de données NIRS afin d'évaluer le nombre de répétitions et la nécessité de réaliser des mesures sur les deux faces opposées d'une éprouvette

Avant l'acquisition des données NIRS des éprouvettes, une pré-étude a été réalisée sur 85 éprouvettes sélectionnées au hasard afin de déterminer la pertinence de réaliser 3 mesures sur chacune des deux faces du plan RT (Radial/transversal) des éprouvettes de bois et la pertinence de réaliser une mesure sur chacune des deux faces du plan RT des éprouvettes de bois.

1. Evaluation de la pertinence de réaliser 3 mesures sur chacune des deux faces du plan RT des éprouvettes de bois :

Pour les 85 éprouvettes à l'étude, 3 mesures NIRS ont été réalisées sur chacune des deux faces du plan. Une comparaison des 3 spectres d'une même face a été réalisée (Figure ci-dessous).

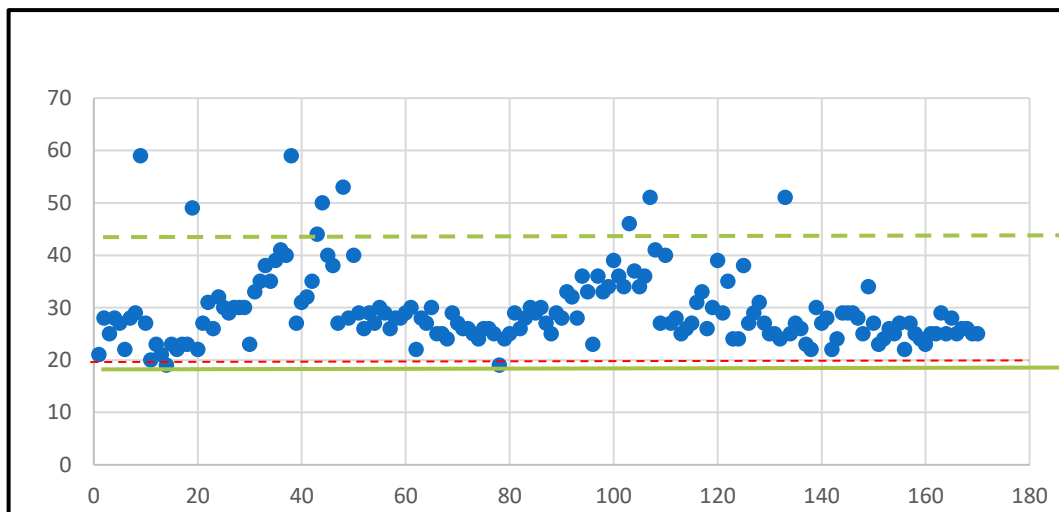


Figure B1. Moyenne des absorbances (μAbs) mesurées selon 3 répétitions sur les deux faces RT de 85 éprouvettes

Résultats

RMS (2,2,5) = Absorbance Moyenne = 30 μAbs (ligne verte pleine sur le graphe)

LCs = Moyenne + (3 x Ecart-type) = 50.71 μAbs (ligne verte pointillée sur le graphe)

Abs moyenne de l'étalon en céramique = 20 μAbs (ligne rouge pointillée sur le graphe)

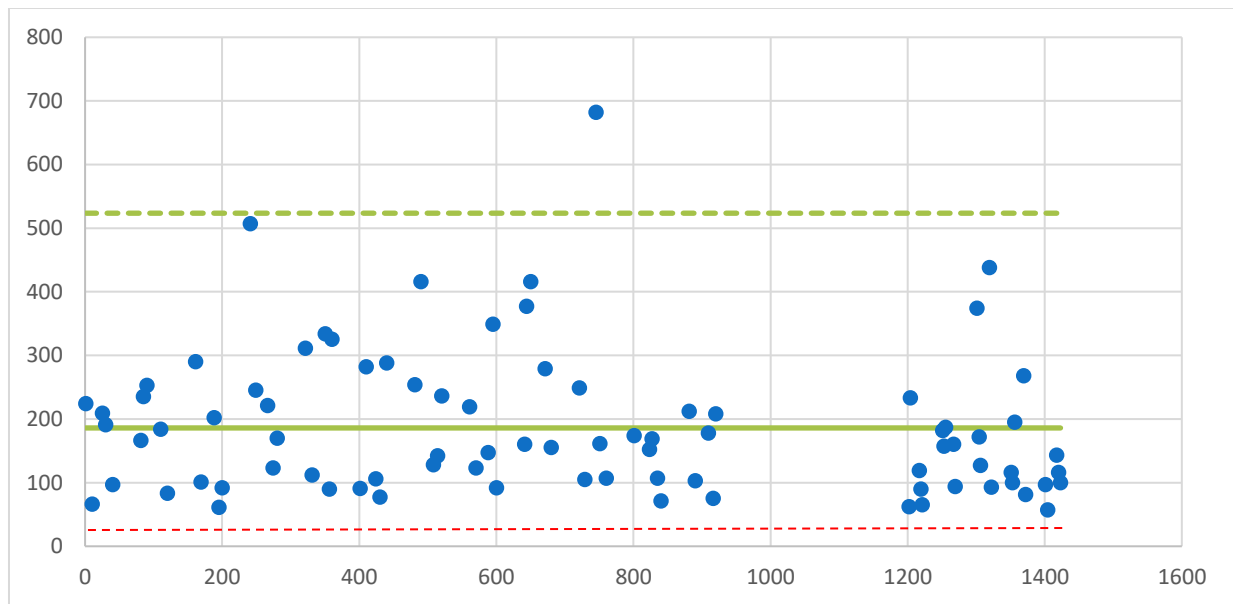
Conclusion

L'absorbance moyenne des 170 mesures est proche de l'absorbance moyenne de l'étalon en céramique et bien inférieure à la LCs.

Il n'est donc pas très utile de réaliser 3 mesures par face.

2. Evaluation de la pertinence de réaliser 1 mesure sur chacune des deux faces du plan RT des éprouvettes de bois

Pour les 85 éprouvettes à l'étude, une mesure NIRS a été réalisée sur chacune des deux faces du plan. Une comparaison des spectres d'une même face a été réalisée (Figure ci-dessous).



Résultats :

RMS (2,5,5) = Absorbance moyenne = 183 μ Abs (ligne verte pleine sur le graphe)

LCS = (Moyenne +3 x Ecart type) = 523 μ Abs (ligne verte pointillée sur le graphe)

Abs moyenne de l'étalon en céramique = 20 μ Abs (ligne rouge pointillée sur le graphe)

Conclusion :

L'absorbance moyenne mesurée est bien supérieure à l'absorbance moyenne de l'étalon en céramique.

Il convient donc de réaliser des mesures sur les deux faces RT de chaque éprouvette.

ANNEXE C. Illustration des dégâts réalisés sur les éprouvettes par *Coptotermes gestroi*

