

Université Montpellier II

ECOLE NATIONALE DU GENIE RURAL, DES EAUX ET DES FORÊTS

N° attribué par la bibliothèque
/ / / / / / / / / /

THESE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'ENGREF

Spécialité :

Sciences Forestières et du bois

présentée et soutenue publiquement par Farshid Faraji

le 8 juillet 2005

à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts

Centre de : Montpellier

TITRE :

ETUDE DE LA DURABILITE D'UN COMPOSITE MULTICOUCHE EN MELANGE
DE PLACAGES DE DURABILITES VARIABLES

devant le jury suivant :

M. Bernard THIBAUT	Directeur de thèse
M. Joris VAN ACKER	Rapporteur
M. Roberto ZANUTTINI	Rapporteur
M. René KELLER	Examineur
M. Davood PARSA PAJOUH	Examineur
Mme. Marie France THEVENON	Examineur

*A ma petite famille
Kelly et Faria*

Remerciements

Ma reconnaissance s'adresse aux personnes qui ont rendu la réalisation de cette thèse possible, et bien plus encore à ceux qui l'ont rendue agréable. Cette longue relation entre ma thèse et moi a connu ses hauts et ses bas, mais j'y ai pris en grande majorité un plaisir énorme. Je désire alors exprimer ma profonde gratitude accompagnée de l'expression de mon respect :

A Bernard THIBAUT mon directeur de thèse, ce travail n'aurait pu voir le jour sans sa confiance. Je lui suis reconnaissant pour son soutien constant, tout au bout de la période de l'apprentissage de la langue française à la phase finale de la rédaction de cette thèse. Il a mis à ma disposition les moyens nécessaires à cette étude. Je lui suis reconnaissant également pour ses conseils, sa disponibilité, ses multiples corrections et critiques qui ont permis à ce travail de prendre forme.

Je voudrais remercier chaleureusement chacun des membres du jury qui me font le grand honneur d'y participer.

Je remercie vivement Joris VAN AKER de l'université GENT en Belgique et Roberto ZANUTTINI de l'université TORIN en Italie pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse, je leur suis très reconnaissant du temps qu'ils y ont consacré.

Je voudrais aussi remercier très amicalement Professeur René KELLER de l'ENGREF, je suis très honoré d'avoir assisté à son cours de doctorat et également je remercie Professeur Davood PARSA PAJOUH de l'université de TEHERAN d'avoir accepté de juger ma thèse malgré la longue distance.

Ma profonde gratitude va à Marie-France THEVENON, j'ai eu le privilège d'avoir été encadré de façon exemplaire par quelqu'un de dynamique, doué et courageux. Sans doute mes contributions scientifiques au niveau international et européen doivent beaucoup à son aide et à ses encouragements.

J'exprime ma vive reconnaissance à Joseph GRIL pour son soutien, sa disponibilité et notamment les analyses mécaniques qui m'ont souvent été d'un précieux secours. Je remercie également l'ensemble de son équipe du LMGC pour m'avoir accueilli chaleureusement, je m'y suis toujours senti chez moi.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à Christian SALES pour m'avoir accepté dans son unité de recherche, pour son accueil chaleureux et sa générosité.

Je remercie vivement Jean GERARD pour son soutien et l'encouragement qu'il m'a apporté au cours de ces années de ma thèse.

Ma vive reconnaissance à Anne THIBAUT pour son aide, son soutien constant et son amitié.

J'exprime mes remerciements à Nadine AMUSANT pour son aide et sa disponibilité à répondre à mes nombreuses questions.

.....Remerciements.....

Mes remerciements s'adressent également à Christine BAUDASSE et Nicolas LEMENAGER pour leur aide, leurs conseils et leur bonne humeur.

J'exprime aussi mon amitié à Daniel GUIBAL pour avoir partagé chaleureusement pendant longtemps son bureau de travail et de m'avoir toujours proposé son aide.

Je voudrais remercier Rémy MARCHAL et son équipe, à l'origine de cette étude, pour m'avoir beaucoup aidé en déroulage des billons et séchage des placages à l'école ENSAM.

Je remercie très vivement Claude DAIGROMONT et Sylvain LOTTE, pour leur aide efficace à différentes étapes d'échantillonnage en bois massif et en contreplaqué.

Je remercie amicalement Loïc BRANCHERIAU pour son aide sur les analyses statistiques.

Un grand remerciement à Gille CAMP pour son accompagnement chaleureux en phase de déroulage et de séchage à Cluny et aussi la préparation du dispositif de l'essai d'indentation et de cisaillement.

Ma gratitude va aussi à Catherine MEJEAN et Isabelle CHALON pour leur aide efficace et leur gentillesse.

Je remercie vivement Gilles CALCHERA pour son aide de la mise au point de l'essai d'indentation et de cisaillement au CIRAD.

Je voudrais adresser aussi un remerciement à Iris BREMAUD pour son aide sur les bibliographies d'ultrasonore.

Je voudrais remercier Jean-marc RODA, Pierre DETIENNE et Luc MARTIN pour leur bonne humeur et leur gentillesse.

Je remercie vivement Claudine BARRE pour son aide dès mon arrivé en France et sa Gentillesse.

Je tiens à remercier tous les doctorants et stagiaires que j'ai rencontrés au cours de ces années de ma thèse, tous ceux qui à leur manière m'ont aidé à mener à bien cette thèse.

Un mot de reconnaissance au directeur scientifique de l'ENGREF, Claude MILLIER et Françoise MARY pour leur aide et leurs conseils.

Ma vive reconnaissance aux différents responsables scientifiques des étudiants Iraniens en France au cours de ces années de ma thèse, respectivement M. MANI, Mme. KHODAMI, M. PIRI et M. RAHMATI.

Mes remerciements s'adressent à tous mes amis grâce auxquels ces années resteront pour moi plus qu'une aventure scientifique.

TABLE DES MATIERES

1.PROBLEMATIQUE.....	11
1.1 Les produits de préservation et leurs impacts environnementaux.....	11
1.2 La durabilité naturelle du bois.....	12
1.2.1 Définitions de la durabilité naturelle.....	12
1.2.2 Duraminisation.....	12
1.2.3 Durée du bois en service.....	14
1.3 Les agents de biodégradation.....	16
1.3.1 Les Bactéries.....	16
1.3.2 Les champignons.....	17
1.3.2.1 Caractères généraux.....	17
1.3.2.2 Morphologie générale.....	17
1.3.2.3 Les fructifications.....	18
1.3.2.4 Le cycle de développement	18
1.3.2.5 Conditions générales de développement.....	19
1.3.2.5.1 Facteurs physiques.....	19
1.3.2.5.2 Facteurs chimiques.....	20
1.3.2.6 Les champignons lignicoles.....	20
1.3.2.6.1 Discolorations superficielles.....	20
1.3.2.6.2 Discolorations profondes.....	20
1.3.2.7 Les agents d'échauffure.....	21
1.3.2.8 Les champignons lignivores.....	22
1.3.2.8.1 La pourriture cubique brune.....	22
1.3.2.8.2 La pourriture fibreuse blanche.....	23
1.3.2.9 La pourriture molle.....	25
1.3.2.10 Spécificité des champignons.....	25
1.3.2.11 Conséquences sur les propriétés physiques et mécaniques du bois massif dégradé.....	25
1.3.3 Les Insectes Xylophages.....	27
1.3.3.1 Les insectes de bois frais.....	27
1.3.3.2 Les insectes de bois sec.....	27
1.3.3.2.1 Les termites.....	28
1.3.3.2.1.1 Les termites présents en France.....	29
1.3.3.2.1.2 Localisation des termites en France.....	29
1.3.3.2.1.3 Biologie des termites souterrains.....	30
1.3.4 Les térébrants marins.....	32
2. MATERIEL ET METHODES.....	33
2.1 MATERIEL VEGETAL.....	33

2.3.2.4	Les étapes constitutives de l'essai.....	55
2.3.2.5	Validité de l'essai.....	56
2.3.2.6	Evaluation des résultats.....	57
2.3.2.7	Classes de durabilité.....	57
2.3.3	Durabilité naturelle du bois massif vis-à-vis des termites	
2.3.3.1	Généralités.....	57
2.3.3.2	Eprouvettes de références.....	58
2.3.3.3	Les étapes constitutives de l'essai.....	58
2.3.3.4	Evaluation du degré d'attaque des termites.....	60
2.3.3.5	Validité de l'essai.....	61
2.3.4	Mesure de la densité.....	63
2.3.4.1	Mesure de la densité du bois massif.....	63
2.3.4.2	Mesure de la densité du contreplaqué.....	63
2.3.5	Mesure du Module d'élasticité.....	63
2.3.5.1	Mesure de module d'élasticité longitudinal de bois massif.....	63
2.3.5.2	Mesure de module d'élasticité des contreplaqués.....	65
2.3.6	Mesure Ultrasonore.....	65
2.3.6.1	Généralités.....	65
2.3.6.2	Méthode d'écho impulsionnelle	66
2.3.6.3	Méthode par transmission	66
2.3.6.3.1	Le principe de la méthode.....	66
2.3.6.3.2	Mesure sur le bois massif.....	68
2.3.6.3.3	Mesure des contreplaqués.....	68
2.3.7	Mesure d'Indentation.....	69
2.3.7.1	Les mesures de dureté sur bois massif.....	69
2.3.7.2	Evaluation de la dureté dans les multicouches.....	69
2.3.8	Mesure de la résistance au cisaillement.....	71
3.	Résultats	
3.1	Résultats des essais normalisés de durabilité vis-à-vis des termites.....	74
3.2	Résultats des essais normalisés de durabilité vis-à-vis des champignons.....	82
3.2.1	Résultats de durabilité naturelle du bois massif.....	82
3.2.2	Résultats de durabilité naturelle des contreplaqués.....	82
3.2.2.1	Les contreplaqués purs.....	85
3.2.2.2	Les contreplaqués en mélange d'essences durables et non durables.....	86
3.2.2.2.1	Les contreplaqués en mélange de Châtaignier et de Peuplier.....	91
3.2.2.2.2	Les contreplaqués en mélange de châtaignier et de hêtre.....	92
3.2.2.2.3	Les contreplaqués en mélange d'aubier et de duramen de cèdre.....	95
3.2.2.2.4	Les contreplaqués en mélange de cèdre duramen et de hêtre.....	97
3.2.2.2.5	Les contreplaqués en mélange de cèdre duramen et de peuplier....	100
3.2.2.2.6	Les contreplaqués en mélange d'aubier et de duramen de cyprès...	102
		107
		117
		117

3.2.2.3 Les analyses de variance confondue pour tous les mélanges réalisés....	
3.3 Résultats d'utilisation de la méthode ultrasonore pour détecter la présence et le niveau de la pourriture dans les contreplaqués.....	
3.3.1 Propagation des ondes dans le bois massif et le contreplaqué avant l'attaque fongique.....	
3.3.2 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores due aux attaques fongiques.....	
3.3.2.1 Cas du bois massif.....	
3.3.2.2 Diminution de la vitesse pour le contreplaqué.....	
3.3.2.2.1 Diminution de la vitesse des ondes ultrasonores pour des contreplaqués purs.....	
3.3.2.2.2 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de peuplier et de châtaignier.....	
3.3.2.2.3 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de hêtre et de châtaignier.....	
3.3.2.2.4 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de cèdre- duramen et de cèdre-aubier.....	
3.3.2.2.5 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de peuplier et de cèdre-duramen.....	
3.3.2.2.6 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de hêtre et de cèdre-duramen.....	
3.3.2.2.7 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de cyprès-aubier et de cyprès-duramen.....	
3.3.2.3 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores pour tous les contreplaqués réalisés purs ou mélangés.....	
3.4 Résultats de l'indentation des contreplaqués.....	
3.4.1 L'énergie d'indentation.....	
3.4.1.1 L'énergie d'indentation des contreplaqués purs.....	
3.4.1.2 L'énergie d'indentation des contreplaqués en mélange d'essences durable et non durable.....	
3.4.1.3 L'énergie d'indentation de l'ensemble des contreplaqués.....	
3.4.2 Les courbes de la force d'indentation.....	
3.4.2.1 Force d'indentation pour les contreplaqués purs, sains ou attaqués.....	
3.4.2.2 Force d'indentation pour les contreplaqués en mélange d'essences durables et non durables.....	
3.4.3 Les essais périodiques d'indentation.....	
3.4.4 Indentation par l'autre face.....	
3.4.5 Discussion.....	
3.5 Résultats de cisaillement des contreplaqués.....	
3.5.1 Perte de résistance au cisaillement de contreplaqués purs.....	
3.5.2 Perte de résistance au cisaillement des contreplaqués en mélange d'essences durables et non durables.....	
3.5.3 Perte de résistance au cisaillement de tous les contreplaqués confondus, en mélange.....	
3.6 Résultats de module d'élasticité des contreplaqués en mélange.....	158

3.7 Conclusion et perspectives.....	166
-------------------------------------	-----

Références Bibliographique.....	171
--	------------

Annexes.....	178
---------------------	------------

AnnexeA : Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs calculées pour les contreplaqués en mélanges d'essences durables et non durables.....	178
---	-----

Annexe B : Pertes de masse des contreplaqués purs et mélange d'essences durables et non durables.....	182
---	-----

Annexe C : Information sur la colle Mélamine-Urée-Formol.....	188
---	-----

Annexe D : Les valeurs de la résistance au cisaillement avant et après l'exposition au C. versicolor des contreplaqués purs et mélangés.....	190
--	-----

Annexe E : Les valeurs de la vitesse des ondes ultrasonores avant et après l'exposition au C. versicolor des contreplaqués purs et mélangés.....	194
--	-----

1

PROBLEMATIQUE

1.1 Les produits de préservation et leurs impacts environnementaux

1.2 La durabilité naturelle du bois

1.3 Les agents de biodégradation

1. PROBLEMATIQUE

1.1 *Les produits de préservation et leurs impacts environnementaux*

Le bois est un matériau dégradable, ce qui limite ses utilisations. La méthode la plus classique de protection du bois contre les dégradations biologiques est le traitement par les produits chimiques dont le mélange de trois sels à base de cuivre, de chrome et d'arsenic. Ceux-ci s'avèrent efficaces, mais bien trop souvent nocifs pour les écosystèmes. Le secteur de la préservation du bois souffre de cette image (Haluk et Roussel 2000).

Aujourd'hui l'utilisation des produits de préservation pour protéger le bois et ses dérivés devient de plus en plus limitée. Les inconvénients nombreux des produits de préservation pour protéger le bois et ses dérivés contre les agents de dégradation biologique (spécialement les fongicides et les insecticides) sont bien connus. Ils peuvent s'accumuler dans le sol, dans les tissus des végétaux, des animaux et de l'homme. En raison des dangers que représentent ces produits de préservation, leur utilisation a diminué dans les pays occidentaux où le nombre des produits interdits d'utilisation augmente régulièrement.

Un autre problème est l'augmentation de coût du produit final car il faut ajouter les produits de préservation et la procédure d'application.

Aujourd'hui de nombreux chercheurs dans le domaine de la préservation essaient de trouver des solutions afin d'éviter l'utilisation de produits de préservation pour protéger les bois contre les agents de biodégradation, par exemple, extraire les biocides naturels du bois à partir d'essences durables et d'en imprégner des essences peu durables ou des aubiers (Rudman, P. 1965.)-(Dirol, D. et Scalbert, A.1991)-(Scalbert A. et al.1998).

Les matériaux composites à base de bois sont aussi concernés par ce traitement chimique, surtout quand on les utilise en extérieur (à l'abri ou sans abri), par exemple les revêtements extérieurs qui se situent, en fonction du taux l'humidité (supérieur à 18%), dans les classes de risque 2 à 4.

Dans le domaine de la préservation des panneaux à base de bois, un autre problème se manifeste : il s'agit de la diminution des propriétés mécaniques du panneau traité due à l'incompatibilité entre le produit de préservation et la colle, avec en conséquence, une adhérence faible.

L'idée de mélanger les essences durables et non durables dans un produit fini comme les matériaux composites à base de bois (panneau de particule, panneau de contreplaqué, panneaux de fibre et autre produit reconstitué à base du bois) afin d'augmenter la durabilité ou la durée de service, provient des problèmes environnementaux, économiques et finalement qualitatifs cités ci-dessus.

Des recherches sur la durabilité de panneaux de particule en mélange d'essences durables et non durables ont été réalisées (Okino et al. 2003, Evans 1997 ,2000). Les résultats montrent une durabilité inférieure à la durabilité des panneaux traités mais bien supérieure à celle des panneaux d'essences non durables. Il ne faut pas attendre le même résultat chez un panneau contreplaqué car dans un panneau de particules il y a une couche de colle qui couvre chaque particule. Si elle possède un effet toxique ou protecteur, cette couche peut augmenter plus significativement la résistance contre des agents de dégradation biologique que pour un panneau contreplaqué.

Il y a peu de résultats sur les multicouches en mélanges d'essences durables et non durables. Boury 1998 a montré qu'un LVL de chêne en mélange de placages d'aubier et de duramen (en proportion égale) présente une durabilité supérieure à un panneau pur aubier. Il est important que le mélange des essences durables et non durables soit possible dans la ligne de

production du panneau (techniquement et économiquement). Ceci est particulièrement vrai pour les contreplaqués.

Avant d'intégrer des placages durables et non durables dans un panneau, il est important de répondre aux questions suivantes :

- Quelle est l'influence de l'épaisseur des plis durables et non durables composant le panneau sur sa durabilité vis-à-vis des agents de dégradation biologique notamment les champignons et les termites ?
- Quelle est l'influence de pourcentage des plis durables ou non durables sur cette durabilité ?
- Quelle est la meilleure manière d'intégrer des placages dans le panneau ?

1.2 La durabilité naturelle du bois

1.2.1 Définition de la durabilité naturelle

La durabilité naturelle des bois est définie par la norme NFX.40.002 (1983) : « *Durabilité que présente un bois dans des conditions données, en absence de tout traitement de préservation. Cette propriété rend compte de la résistance naturelle du bois aux attaques biologiques* » et la norme NF EN350-1(1994) : « *Résistance intrinsèque du bois aux attaques d'organismes destructeurs* ».

1.2.2 Duraminisation

Les couches successives qui se forment sous le cambium constituent l'aubier qui correspond au bois physiologiquement actif. Les cellules actives de l'aubier cessent d'alimenter l'arbre après quelques années. Les vaisseaux se bouchent et le tissu ligneux s'imprègne de différentes substances qui sont souvent des substances toxiques pour les agents biologiques. La transformation progressive de l'aubier en bois de coeur (bois parfait ou duramen) est appelée duraminisation. Ce phénomène n'est pas observable dans toutes les essences. En général, il se traduit macroscopiquement par une différenciation de couleur duramen/aubier.

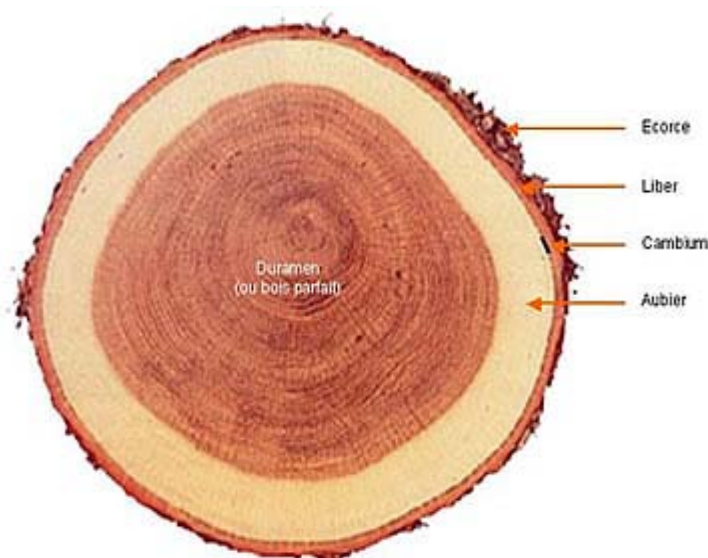


Figure1. Exemple d'une essence à bois parfait distinct (le Chêne).

Chez certaines essences (chêne, châtaignier, pins, douglas, mélèze...) à bois parfait distinct, l'aubier est en général plus clair que le duramen, on dit alors qu'il est différencié. Il est plus ou moins imprégnable et ne résiste quasiment jamais aux champignons lignivores ni aux larves xylophages. Le duramen, au contraire, possède une durabilité naturelle qui varie selon les essences ; il est, en général, peu ou pas imprégnable.

Pour d'autres essences (sapin, épicéa, peuplier, érable...), il n'y a pas de différence de coloration entre le centre et l'extérieur de la grume, et l'aubier ne se distingue pas visuellement du duramen. Sur ces essences à aubier non différencié, les différences de porosité, qui cependant se manifestent entre aubier et bois parfait, génèrent des facultés d'absorption distinctes. L'aubier, plus poreux, offre une capacité d'absorption plus élevée que celle du duramen.

Le tableau suivant expose la durabilité naturelle de certaines essences :

Contact du sol

**Hors contact du sol, exposé
aux intempéries**

Hors contact du sol, partiellement abrité

Très durables 20 ans

Robinier

Très durables au moins 20 ans

Chêne

Châtaignier

Red Cedar

Cèdre

Très durables 50 ans et plus

Chêne

Châtaignier

Red cedar

Cèdre

Durable : 12 ans

Chêne

Châtaignier

Durable : 12 ans

Douglas

Durables : 20 ans

Douglas

Peu durables

pins

Assez durables

pins

Non durables

*Toutes autres essences
et les aubiers*

Non durables
*Toutes autres essences
et les aubiers*

Non durables
*Toutes autres
essences
et les aubiers*

Tableau 1. Classement de la durabilité de quelques essences selon l'expérience. (Dirol, D. et Déglise, X. 2001).

Les substances actives dans le bois parfait sont souvent de nature phénolique, elles appartiennent à quatre grands groupes :

-les polyphénols

Ils comprennent les stilbènes et les flavonoïdes qui sont de loin les extraits les plus courants. Les stilbènes sont trouvés dans les duramens du pin et d'Eucalyptus et les flavonoïdes sont synthétisés dans le duramen de chêne et celui de Douglas.

-les terpénoïdes

Ils sont dérivés de la condensation des unités d' isoprénoïde en C5. Les monoterpènes comme les pinènes sont formés de deux unités d'isoprène. Ils sont synthétisés au niveau des canaux résinifères de certains conifères et feuillus. On les exploite comme parfums, produit résistant à l'eau, insecticide, fongicide et thérapeutique (Obest, J. 1978).

-les tropolones

Ce sont des dérivés des terpénoïdes, ils sont spécifiques de la famille des Cupressacées et comportent plusieurs isomères de la thujaplicine.

-les tannins

D'une manière générale, les tannins sont divisés en deux groupes principaux : les tannins hydrolysables et les tannins condensés. Les tannins hydrolysables sont trouvés principalement dans le duramen des feuillus de la famille des Fagacées et des Myrtacées comme le chêne, le châtaignier, et l'eucalyptus. Les tannins condensés sont des polymères polyphénoliques dont l'unité est un monomère flavonoïde. Les tannins condensés sont trouvés à la fois chez les feuillus et les résineux comme Quebracho, Merisier, Séquoia.

1.2.3 Durée du bois en service

Pendant des siècles, le bois de cœur des essences durables a été la matière première d'ouvrages placés dans des conditions à risques. Le premier principe de prévention des dégradations dans la construction est en fait l'utilisation de bois naturellement durable. Beaucoup de bois parfaits colorés présentent une bonne durabilité, et si un prescripteur veut

s'affranchir d'un traitement de préservation il a le choix de prendre une essence dont la durabilité correspond à la situation qu'il a prévu.

L'humidité du bois en service est un facteur conditionnant la colonisation par divers groupements d'organismes et influence donc sa dégradation (tableau 2). Alors que les insectes peuvent sans difficulté coloniser un bois sec, une humidité de 20% est généralement nécessaire au développement de champignons. Il existe une humidité critique propre à chaque type d'organisme. Par ailleurs, peu d'organismes sont capables de coloniser le bois lorsqu'il est saturé en eau. Quand l'humidité du bois est supérieure au point de saturation des fibres, l'eau remplace alors l'air dans le lumen des cellules et l'oxygène devient le facteur limitant pour les organismes aérobies.

En fonction de la situation du bois en service, les risques biologiques principaux sont évalués et le bois est assigné dans une classe de risques définie.

**Classe de
risque
Situation du bois en service
Humidité du bois
Organismes caractéristiques**

1

Bois sous abri, entièrement protégé des intempéries et non exposé à l'humidification.
Aménagement intérieurs, meubles, lambris, parquets, menuiseries intérieures.

H<20%
Insectes à larve xylophage
(termite en zone infestée)

2

Bois sous abri, entièrement protégé des intempéries, mais où une humidité ambiante élevée temporaire peut conduire à une humidification occasionnelle mais non persistante supérieure à 20%.
Charpente en chantier, ossatures, planchers.

Occasionnellement

H >20%
Insectes à larve
xylophage

Moisissures

Champignons de
discoloration

Termite en zone infestée.

3

Bois non abrité, hors contact du sol, qui peut être continuellement exposé aux intempéries ou bien être à l'abri, mais est soumis à une humidification fréquente supérieure à 20%.
Menuiseries extérieures

Souvent
H>20%

Insectes à larve
xylophage

Champignons de discoloration mais aussi lignivores

Termites en zone infestée.

4

Bois au contact du sol, non couvert, ou bois en contact avec l'eau douce.
Poteaux, pieux, piquets de clôture

H>20%
Dans tout ou une partie de son volume
Insectes à larve xylophage,
Champignons de discoloration mais aussi lignivores plus pourritures molles, termites en zone infestée.

5

Bois en permanence exposé à l'eau salée.
Installations portuaires, jetée

H>20%
Insectes à larve xylophage,
Champignons de discoloration mais aussi lignivores plus pourritures molles, termites en zone infestée.
Térébrants marins

Tableau 2. Les classes de risque conformément à la norme NF EN 335.

1.3 Les agents de biodégradation

Dans le bois, beaucoup de cellules (fibres, éléments de vaisseaux) meurent quelques semaines après leur formation pour assumer leur fonction mécanique ou de transport de liquide, elles perdent leur contenu cytoplasmique. Elles ne sont plus alors qu'un complexe formé de cellulose, hémicelluloses et lignine. Elles sont donc attaquables par des organismes capables de dégrader ce complexe. A l'inverse, les cellules de stockage restent vivantes pendant plusieurs années et ne perdent leur contenu cytoplasmique que lorsque l'aubier est transformé en duramen. Les sucres, acides aminés, protéines et amidon encore présents dans ces cellules,

les rendent facilement attaquables par un grand nombre de bactéries et champignons qui peuvent se nourrir de ces ressources sans pour autant être capables de dégrader le complexe ligno-cellulosique des parois. Une bonne connaissance de la biologie, du mode de colonisation et de destruction est nécessaire pour former une stratégie de lutte contre les agents destructeurs des bois.

1.3.1 Les bactéries

Les bactéries sont bien moins destructrices que les champignons et se développent dans des conditions très particulières. Elles peuvent provoquer des déchirures localisées ou des cavités dans la paroi cellulaire. Les altérations se manifestent surtout quand le bois est immergé ou conservé dans un lieu très humide ; elles détruisent alors la paroi des ponctuations, provoquant d'importantes augmentations de la perméabilité du bois.

Les bactéries anaérobies se trouvent souvent dans les bois saturés en eau. C'est le cas pour la partie enterrée des bois en contact avec le sol. Les bactéries sont en général les premiers organismes colonisateurs du bois. L'invasion initiale se fait par les rayons du parenchyme où elles utilisent les réserves directement assimilables de la plante. Leur propagation dans le bois est tributaire des flux d'eau uniquement. Elles sont aussi capables de dégrader les tori des ponctuations aréolées aspirées grâce à des activités pectinolytiques, augmentant ainsi la perméabilité du bois. Ce processus est plus rapide dans les bois flottés que dans les bois en contact avec le sol. Chez ces derniers, l'ouverture des ponctuations aspirées génère de meilleurs échanges gazeux dans le bois, les conditions deviennent moins anaérobies et plus propices au développement des champignons.

Cellulomonas sp. et *Cellovibrio vulgaris* peuvent être à l'origine d'une dégradation des polysaccharides de la paroi cellulaire, après un temps extrêmement long de colonisation en conditions anaérobies. Cette dégradation, très lente comparée à celle des champignons, commence par le lumen de la cellule. Après une lyse limitée de la paroi S3, les bactéries creusent de véritables tunnels dans la paroi S2 d'où leur nom de « tunnelling bacteria ».

De plus, dans quelques cas particuliers, des bactéries filamenteuses, dont *Streptomyces sp.* peuvent dégrader le bois de manière importante, entraînant des pertes de masse et de propriété mécanique significatives (Molnar S. 1997).

Dans le bois en contact avec le sol, certaines bactéries présentent des activités nitrogénases et sont fixatrices d'azote atmosphérique. La teneur en azote (0,03% à 0.1% habituellement) augmente alors graduellement de l'extérieur (surface exposée) vers l'intérieur du bois. De facteur limitant, l'azote devient alors un facteur attractif pour les organismes lignivores.

1.3.2 Les champignons

1.3.2.1 Caractères généraux

Les champignons, ne possédant pas de chlorophylle, ne peuvent pas, comme les plantes vertes fabriquer à partir du gaz carbonique de l'air les produits carbonés nécessaires à leur nutrition ; en conséquence ils ne peuvent vivre qu'aux dépens de produits carbonés élaborés par d'autres plantes vivantes ou mortes.

Les champignons dits *lignicoles* tirent du bois les substances carbonées dont ils ont besoin. Ce sont des substances nutritives ou de réserve, comme l'amidon, contenues dans le tissu parenchymateux. Ils attaquent les arbres sur pied ou les bois fraîchement abattus, ils sont alors qualifiés de *parasites*.

Les champignons dits *lignivores* sont capables de fabriquer des enzymes spécifiques (exoenzymes hydrolysantes) qui catalysent des réactions dont le résultat est de transformer en composés assimilables par le champignon, les principaux constituants insolubles du bois, qui ne pourraient être eux-mêmes digérés sans l'action d'endoenzymes oxydantes. Lorsqu'ils assurent leur nutrition aux dépens de tissus morts (bois abattus mais pas frais ou mis en œuvre) ils sont dits *saprophytes* ; c'est le cas des champignons rencontrés dans la construction.

1.3.2.2 Morphologie générale

Ils se reproduisent par des corpuscules communément appelés spores, analogues aux graines des plantes supérieures, mais beaucoup plus petites et habituellement beaucoup plus nombreuses.

Les spores qui tombent dans un milieu humide favorable germent un peu à la manière des graines. La paroi de la spore éclate, donnant naissance à un filament minuscule (0,5 à 0,7 μm de diamètre), l'hyphe. L'hyphe se ramifie et les filaments ténus s'infiltrant dans le bois sur lequel les hyphes croissent. L'ensemble des hyphes constitue le mycélium. Les hyphes sont constituées de cellules incolores, cylindriques, placées les unes à la suite des autres. Chez les Basidiomycètes, au niveau des cloisons transversales qui séparent les cellules entre elles, le filament présente souvent une protubérance appelée boucle ou anse d'anastomose. Leur croissance se fait par formation de nouvelles cellules à leur extrémité, et en même temps des branches latérales apparaissent ; leur multiplication aboutit à la constitution d'un vaste réseau de cellules toutes semblables.

Les hyphes se développent dans les lumens des cellules ligneuses : trachéides, fibres, vaisseaux, et se ramifient dans tout le plan ligneux. Au début de l'envahissement, le passage d'une cellule à l'autre se fait grâce aux ponctuations de la membrane. Par la suite, l'hyphe peut passer à travers la paroi cellulaire en émettant des enzymes spécifiques pouvant dissoudre la lignine, la cellulose, les hémicelluloses ou l'ensemble des constituants de la paroi cellulaire.

Ces enzymes, comparables aux diastases du tube digestif des animaux, ont la propriété de réduire les composés insolubles comme la cellulose en produits solubles, que les cellules du champignon peuvent assimiler pour sa nutrition. Ainsi, la mérule décompose la cellulose par émission de cellulases et de glucanases, et les hémicelluloses par émission de xylanases et xylosidases qui coupent les chaînes des polymères en unités élémentaires de glucose.

Chez la plupart des champignons lignivores, lorsque l'invasion du bois est assez avancée, le mycélium se présente sous forme d'éléments de dimensions variées résultant de l'agrégation des hyphes qui forment des plaques de consistance variable, plus ou moins épaisses, recouvrant la surface du bois ou se développant à l'intérieur même du bois ; ces éléments sont appelés *xylostromes*. Les formations végétatives sont parfois plus épaisses et prennent la forme de coussinets plus ou moins renflés. L'agrégation des hyphes peut donner lieu chez certaines espèces à la formation de cordonnets dont le diamètre peut atteindre plusieurs millimètres ; ces éléments végétatifs sont appelés rhizomorphes ; ils sont capables de transporter les substances nutritives et l'eau vers les zones de croissance active du mycélium. Ces éléments sont en général colorés, alors que les hyphes du mycélium sont hyalines.

1.3.2.3 Les fructifications

Quand les conditions sont favorables, à un stade déjà avancé de l'attaque, le champignon se manifeste à l'extérieur du bois par les sporanges reproducteurs ; ce sont les carpophores qui portent l'hyménium, tissu capable de donner naissance aux cellules reproductrices appelées spores. La forme (croûte, assiette, console, etc.), la couleur, et la nature des carpophores sont les indices les plus utiles au diagnostic.

Les spores sont unicellulaires, riches en matières nutritives, de forme ovoïde ou sphérique, elles mesurent quelques microns (9 à 10 μm de long par 5 à 6 μm de large pour la spore de mûre). Quand les spores sont mûres, elles sont libérées dans l'atmosphère, emportées par les mouvements de l'air, par l'eau et par les insectes. La reproduction de l'espèce est ainsi assurée, un carpophore pouvant émettre des milliards de spores. Les spores sont en général colorées et donnent ainsi au carpophore une coloration spécifique à l'espèce. En germant, la spore engendre un nouveau mycélium ; le pouvoir germinatif dure longtemps et ne souffre guère de conditions extrêmes.

Le champignon se propage aussi par le mycélium : le repiquage peut se produire, une pièce de bois attaquée peut en contaminer une autre quand les conditions ambiantes sont favorables.

1.3.2.4 Le cycle de développement

Les spores émises par l'hyménium de la fructification sont disséminées par le vent, l'eau, les insectes (spores des agents de bleuissement emportées par des Scolytides de l'écorce comme les Bostryches), etc. Si elles tombent sur du bois dont l'humidité est supérieure en moyenne à 30%, elles germent en émettant des filaments qui vont dans un premier temps pénétrer dans le bois par toutes les voies d'accès permises par l'anatomie de la cellule ligneuse : ponctuations, perforations, sections transversales des éléments de fibres ou de vaisseaux, etc.

Les hyphes des champignons lignivores installées dans le bois vont alors produire des enzymes pouvant dissoudre les constituants cellulaires ; la matière bois est digérée et peu à peu détruite ; le matériau perd ses propriétés mécaniques. C'est la pourriture du bois, qui peut prendre différents aspects en fonction de l'élément ligneux consommé. Quand les conditions ambiantes sont favorables, une nouvelle fructification est alors formée à partir du bois dégradé ; de nouvelles spores en seront issues qui infesteront de nouveaux bois humides ; le cycle est bouclé.

1.3.2.5 Conditions générales de développement

Outre les aliments nécessaires à sa nutrition, le champignon ne peut se développer que s'il rencontre des conditions physiques, chimiques et biologiques qui lui conviennent.

1.3.2.5.1 Facteurs physiques

L'humidité

C'est le facteur primordial. L'humidité du bois est liée à celle de l'air car le bois se met en équilibre hygroscopique avec l'atmosphère qui l'entoure.

Cependant, si l'humidité de l'air favorise l'apparition des champignons, le bois n'atteint jamais le taux d'humidité optimal correspondant au point de saturation des fibres (30%

environ) nécessaire pour que le développement fongique puisse avoir lieu ; il faut donc en fait un apport d'eau liquide : fuite d'eau, infiltration, et même condensation.

Chaque espèce de champignon a ses exigences hydriques, mais en moyenne l'optimum se situe entre 35 et 50%, légèrement au-dessus du point de saturation des fibres. Certains champignons exigent des taux d'humidité élevés ; ainsi le *Coniophore* des caves a besoin de 40 à 60% d'humidité. En revanche, la Mérule peut commencer son action destructrice à 22%, sachant que l'optimum pour ce champignon se situe entre 25 et 40 %.

En fait l'humidification la plus favorable est obtenue à ce point où les parois cellulaires du bois sont imbibées d'eau, et où cette eau tapisse l'intérieur des parois cellulaires de manière à dissoudre les enzymes sans pour autant remplir totalement le vide (car cela priverait le champignon de l'oxygène dont il a besoin).

Compte tenu de ces exigences hydriques, on peut donc avec certitude empêcher toute attaque fongique si l'on maintient les bois en atmosphère ventilée à un taux d'humidité inférieur à 20%.

La température

Pour ce facteur également, chaque espèce a des exigences bien définies. Certains champignons résistent aux températures élevées ; ainsi, le Lenzite des clôtures, qui se développe à l'extérieur, est capable de subir sans dommage des alternances de chaleur et d'humidité. En revanche, la Mérule est très sensible à la chaleur, la croissance active du mycélium est optimale entre 20 et 23°C mais s'arrête vers 26°C.

D'une manière générale, la température optimale pour les champignons lignivores se situe entre 25 et 35 °C. La température ordinaire de 20°C trouvée dans les habitations correspond pour la majorité des espèces à une possibilité de croissance active du mycélium. Les spores sont plus résistantes à la chaleur et peuvent rester longtemps viables.

La lumière

Les champignons, n'utilisant pas l'énergie lumineuse pour le développement de leurs tissus mais les matières organiques formées par d'autres plantes, peuvent croître activement à l'obscurité. De plus, les rayons UV auraient un effet létal sur les formations végétatives. En revanche, les fructifications ne peuvent se produire normalement qu'à la lumière et très peu d'espèces forment des carpophores normaux à l'obscurité (formes abortives).

Les radiations diverses

Le mycélium des champignons lignivores est tué par exposition prolongée aux UV (action stérilisante) ; en revanche, chez certains Ascomycètes, ils stimulent l'apparition des fructifications. Les rayons X peuvent induire des mutations au niveau des spores. Les rayons γ sont létaux pour tous les champignons (dose de 2,5 mégarads).

1.3.2.5.2 Facteurs chimiques

L'oxygène

Les champignons sont des organismes aérobies, qui ne peuvent vivre sans oxygène gazeux. Leur énergie est obtenue à partir des phénomènes respiratoires. L'oxydation des substances organiques se fait avec l'oxygène atmosphérique. Des quantités d'eau souvent importantes

sont émises par le champignon en même temps que du gaz carbonique. Ce gaz peut d'ailleurs être mesuré pour déterminer la capacité de destruction du champignon (respirométrie).

Une conséquence pratique de ce phénomène est la bonne conservation des bois totalement immergés, l'absence d'oxygène dans les cellules ligneuses rend le matériau inattaquable par ces champignons.

L'acidité du milieu

Ils s'accommodent bien des milieux légèrement acides (pH 4,5 à 5,5) ; leur activité acidifie d'ailleurs le milieu où ils vivent. Le développement en milieu alcalin est très difficile.

1.3.2.6 Les champignons lignicoles

Ces champignons appartiennent à la classe des *Ascomycètes*. Ils peuvent apparaître dans les bois fraîchement abattus (grumes et sciages) ou bien mis en œuvre après réhumidification.

Les désordres sont d'ordre esthétique, car ils assurent leur nutrition seulement aux dépens des substances de réserve comme l'amidon, contenues dans les cellules parenchymateuses des aubiers principalement. Il n'y a pas de dégradation des constituants cellulaires, donc pas de perte des caractéristiques mécaniques du bois. La discoloration ou teinte anormale donnée au bois infesté peut être grave car elle est définitive et ne peut pas être atténuée. La coloration anormale n'est pas imputable à une transformation du bois sous l'influence du champignon, mais seulement à la coloration des filaments mycéliens eux-mêmes dans les cellules ligneuses ; c'est la réfraction de la lumière sur la coloration des hyphes brunes qui donne la teinte au bois, bleuâtre à grisâtre dans le cas des agents de bleuissement.

Il y a deux formes de discoloration : *superficielle* et *profonde*

1.3.2.6.1 Discoloration superficielle

Elles sont désignées sous le terme de *Moisissures*. Elles se développent en formation duveteuses superficielles de différentes couleurs : blanches, roses, vertes, noires. Quand elles apparaissent sur le bois, il n'est pas rare de les observer également sur d'autres matériaux comme le plâtre ou les papiers peints. Leurs principaux représentants appartiennent aux genres *Aspergillus* sp, *Penicillium* sp, et *Trichoderma virid*. Le préjudice qu'ils causent au bois attaqué est en général peu important.

1.3.2.6.2 Discoloration profonde

Ces champignons sont très courants sur les bois récemment abattus en scierie quand ils sèchent trop lentement ; ils sont aussi capables de se développer sur le bois d'œuvre réhumidifié ou insuffisamment sec (menuiseries extérieures par exemple). Leurs représentants principaux sont *Ceratocystis* sp. sur grumes et sciages, et *Pullularia pullulans* de Bary Eerh. sur bois en œuvre .

Les essences dégradées sont principalement résineuses : tous les aubiers sont vulnérables (pins) ainsi que la totalité des essences à bois parfait non différencié (Sapin ou Epicéa). Certains feuillus clairs sont dégradables ; parmi les tempérés il faut citer le Hêtre et le Peuplier, et parmi les tropicaux, le Limba et le Samba (Ayous).

Le bois altéré par des agents de bleuissement garde l'intégralité de ses propriétés mécaniques, à l'exception de la résistance au choc (flexion dynamique) des bois fortement touchés. Les filaments créant de petites perforations mécaniques (et bien évidemment non enzymatiques)

dans la paroi cellulaire, le pouvoir d'absorption des bois bleuis est augmenté ; c'est un inconvénient vis-à-vis de l'eau, mais cela permet une meilleure imprégnation par les produits antiseptiques. Les bois bleuis peuvent être employés partout où la coloration n'a pas d'importance et où la flexion dynamique n'est pas d'un intérêt primordial.



Figure 2. Bleuissement dans l'aubier

1.3.2.7 Les agents d'échauffure

Une échauffure n'est pas une simple discoloration, et doit être considérée comme une pourriture en phase initiale. Ces organismes fongiques constituent la charnière entre les agents de discoloration et les agents de pourriture. Si l'altération qu'ils occasionnent n'est qu'esthétique à ses débuts, dans des conditions favorables, ces champignons deviennent lignivores, et les propriétés mécaniques du bois sont alors altérées de manière plus ou moins importante.

Ils ne se développent en aucun cas dans la construction ; ils attaquent les arbres sur pied ou les grumes laissées sur le parterre des coupes. On croit à tort qu'ils ne causent que des désordres esthétiques ; leur utilisation est souvent préjudiciable pour la construction, puisqu'ils entraînent un affaiblissement structurel dû à une pourriture fibreuse blanche. Les échauffures se développent dans les arbres feuillus et résineux ; elles sont provoquées par un champignon basidiomycète du genre *Stereum*. Par exemple *Stereum purpureum* (pers.) est un des plus importants agents d'échauffures qui abîme le Hêtre, le Frêne et certains arbres fruitiers.

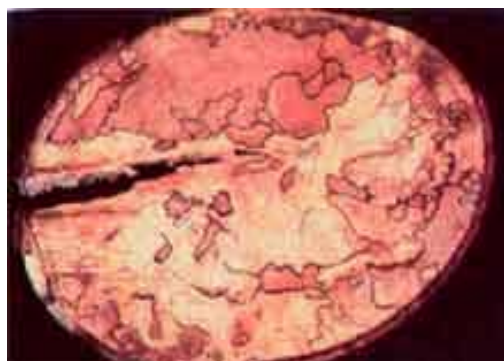


Figure 3. Échauffure dans le hêtre

1.3.2.8 Les champignons lignivores

Ils engendrent la pourriture dans le bois, c'est-à-dire un changement considérable au niveau des propriétés physiques et mécaniques causé par les activités chimiques (enzymatique) des micro-organismes (Hale M.D. 1997).

Ils sécrètent les enzymes qui cassent les composants du bois en matériaux plus simples, c'est à dire de simples sucres (glucose) que les champignons arrivent à consommer pour se développer et survivre.

Ils atteignent l'intégrité du bois en agissant au niveau structurel. La mise à profit par le champignon des éléments constitutifs de la paroi cellulaire entraîne un affaiblissement, voire la destruction complète des propriétés mécaniques du matériau. Il sera fait particulièrement mention des agents destructeurs sévissant sur le bois en œuvre sous les climats tempérés européens. Cependant il ne faut pas perdre de vue que d'autres genres sont également rencontrés sous des climats tropicaux ; ils se manifestent de la même manière, mais le phénomène est accentué du fait de l'humidité ambiante plus importante et de la température plus élevée.

1.3.3.8.1 Les champignons de pourriture cubique brune

Ils appartiennent à la classe des Basidiomycètes.

Ils attaquent particulièrement les bois résineux, mais également les bois feuillus. Le bois dégradé est cassant, anormalement foncé et découpé en cubes selon les trois sens d'orientation du plan ligneux, rappelant l'aspect du bois calciné (photo 4).

C'est la cellulose qui disparaît et il ne subsiste que la trame de lignine ; la phase ultime de dégradation aboutit à la perte complète des propriétés mécaniques du bois.

Dans le cas d'une pourriture brune, non discernable extérieurement pendant les premiers stades de l'attaque, le phénomène se traduit par une coloration foncée du bois et l'apparition de fentes longitudinales puis transversales délimitant des structures plus ou moins cubiques.

Un bois très altéré deviendra extrêmement friable et se réduira en une poudre très fine sous la pression du doigt.



Figure 4. Pourriture brune

***Coniophora puteana* (Schum. Fr.) Karst.**

Syn. : *Coniophora cerebella* (pers.) Duby.

Ce champignon nécessite des taux d'humidité assez élevés et persistants, on le rencontre dans les caves et les locaux très humides. Il attaque le bois mis en œuvre à l'intérieur des bâtiments, dans les lieux obscurs. Son taux d'humidité optimum se situe entre 40 et 60 %. Ce champignon se développe de manière optimale entre 23 et 25°C, le maximum étant 35°C.

Son développement prend la forme d'un mycélium blanc cotonneux, qui avec une forte humidité se développe sur le bois et d'autres matériaux. La couleur devient brun olive et ivoire au centre; des rizomorphes très fins apparaissent, bruns puis noirâtres. Au stade ultime de l'attaque, le mycélium aérien se résorbe et il ne subsiste en surface que les ramifications brun-noirâtre des cordonnets. Le bois dégradé est découpé en cubes; les fentes longitudinales sont plus profondes que les fentes transversales. Le bois infesté est clair au début de l'attaque mais la teinte vire au noir ensuite.

1.3.2.8.2 Les champignons de pourriture fibreuse blanche

Ils appartiennent à la classe des Basidiomycètes. Les agents de pourriture fibreuse blanche attaquent plus particulièrement les bois feuillus; la lignine et la cellulose sont dégradées simultanément. Le bois attaqué est ramolli, blanchâtre et se décompose en fibrilles qui se détachent facilement à l'ongle; il perd ainsi toute sa structure. On rencontre exceptionnellement ces champignons sur les résineux à la faveur d'une très forte humidité persistante.

Les agents de pourriture fibreuse sont bien plus exigeants en eau que les champignons de pourriture cubique. Habituellement non discernable macroscopiquement pendant les premiers stades de l'attaque, une pourriture de type fibreuse occasionne une décoloration progressive du bois qui devient marbré puis blanchi. Quelques espèces de champignon ne dégradent pas d'une manière homogène tout le substrat, formant, par endroit, des poches blanches. Les cellules gardent leur forme et leur taille au moins à l'état humide. Après une dégradation forte, le bois devient mou sans être vraiment friable, excepté quand il devient très sec.

En séchant le retrait du bois dégradé est semblable à celui du bois sains et la surface du bois reste sans fissures Levi, M.P. (1965). On peut distinguer deux groupes de pourriture fibreuse, les premières qui sont capables de dégrader simultanément les polymères structuraux c'est-à-dire, lignine, hémicelluloses et cellulose dans une proportion similaire (*simultaneous white rot*) tandis que les secondes ont une préférence pour dégrader la lignine et les hémicelluloses avant d'attaquer la cellulose (*preferential white rot*) (Eaton et Hale 1993). Les dernières ont un grand intérêt dans l'industrie papetière pour leur potentiel de délignification (bio-pulping) et de blanchissement (bio-bleaching) des pâtes (Blanchette *et al.* 1988).

Parmi les agents de pourriture blanche connus pour la dégradation *Coriolus versicolor* (L.) a été le plus étudié.



Figure 5. Mycélium de la pourriture blanche sur du bois de sciage

***Coriolus versicolor* (L.) Quélet**

Syn. : *Trametes versicolor* (L.Fr.)

Il dégrade le bois en œuvre à l'extérieur : clôtures, meubles de jardin. Il est très virulent sur les bois feuillus comme le Hêtre ; il dégrade aussi le Chêne, sans détruire le duramen si celui-ci a une teneur en tannins suffisante. Il est capable d'attaquer également les résineux mais de façon moins intense.

La pourriture est fibreuse et blanche. Quand l'humidité est grande la pourriture devient gommeuse. Il forme un mycélium blanc peu abondant, cotonneux, qui apparaît parfois à la surface du bois avec quelques taches brunes dispersées.



Figure 6. Les carpophores de *coriolus versicolor*.

L'humidité optimale pour son développement se situe autour de 40 % et la température adéquate varie entre 25 et 28 °C. Le blanc est la couleur la plus courante mais dès que les conditions changent, elle peut varier et présenter des teintes allant du gris au bleuté en passant par le brun, ce qui vaut à ce champignon le surnom de « versicolor ».

1.3.2.9 Les champignons de pourriture molle

Ces champignons lignivores appartiennent à la classe des Ascomycètes et Deutéromycètes capables de dégrader la cellulose, les hémicelluloses et parfois partiellement la lignine.



Figure 7. La pourriture molle, (ressemblance avec la pourriture brune).

Ils sont capables de dégrader les résineux et les feuillus surtout en contact avec le sol ou en présence d'une humidité importante, mais les résineux sont moins susceptibles à la dégradation grâce à une plus grande quantité du monomère guaiacyle de la lignine, qui joue le rôle d'un protecteur des celluloses et hémicelluloses (Singh, A. 2004). Ils causent des cavités plutôt dans la paroi secondaire. La lamelle mitoyenne, grâce à sa concentration en lignine est non dégradée par cet agent.

1.3.2.10 Spécificité des champignons

On attribue généralement aux champignons une spécificité envers un type d'arbre donné: angiosperme ou gymnosperme. Ainsi, les champignons de pourriture blanche seraient plus spécifiques des feuillus, ceux de pourriture brune, des résineux. En fait, *C. versicolor* peut être trouvé sur des résineux et *Coniophora puteana* sur des feuillus.

La préférence de *C. versicolor* pour les feuillus s'expliquerait par le fait que la lignine des angiospermes est caractérisée par une cohabitation d'unités guaiacyle et syringyle, alors que la lignine des résineux est presque exclusivement composée d'unités guaiacyle.

La capacité à être oxydées de ces unités est plus grande pour les syringyles que pour les guaiacyles. Les lignines-oxydases ainsi que les laccases produites par *C. versicolor* ont une affinité particulière pour les unités syringyles.

La présence des unités guaiacyles dans les lignines de feuillus ne semble pas perturber le développement des agents de pourriture brune.

1.3.2.11 Conséquences sur les propriétés physiques et mécaniques du bois massif dégradé

La caractérisation de l'étendue d'une attaque peut être réalisée à travers l'évaluation de la perte de masse des échantillons et la réduction des propriétés mécaniques du matériau. Si la perte de masse renseigne assez bien sur le degré de progression du champignon, elle ne traduit pas forcément bien l'étendue des dégâts occasionnés. En effet, pour une très faible perte de masse (1 ou 3 %), les propriétés mécaniques du matériau peuvent déjà être fortement altérées. Par exemple, il a été montré que du bouleau attaqué par *G. trabeum* a perdu 18,7% de son module de rupture en flexion statique alors que la perte de masse estimée n'était que de 1,05%. Au-delà de 10% de perte de masse, les propriétés mécaniques sont déjà tellement altérées que leur mesure ne peut plus réellement renseigner sur les mécanismes de

dégradations propres à chaque champignon (surtout dans le cas d'une pourriture brune où la chute des propriétés mécaniques est extrêmement rapide).

La perte de masse est souvent utilisée comme base de comparaison pour l'évaluation de la perte des caractéristiques mécaniques dans les premières stades de l'attaque (perte de masse <10%). Mais les résultats des essais mécaniques sont les seuls à être assez parlant pour différencier deux attaques entraînant la même perte de masse. Une estimation par observation microscopique du développement du champignon ou de la structure du matériau dégradé n'est fiable que quand la perte de masse dépasse 5 à 10%. Les études réalisées donnant une idée des dégâts causés par une pourriture brune ou fibreuse sont en général basées sur les mesures effectuées dans les premiers stades de dégradation (perte de masse < 10%).

Les caractéristiques mécaniques altérées pendant le processus peuvent être de plusieurs ordres : résilience (résistance au choc), contrainte maximale à la rupture en flexion ou en compression, module d'élasticité, énergie de rupture. Il semblerait que la première propriété affectée soit la résilience, et viendraient ensuite, classées par ordre décroissant, la résistance en flexion, la résistance en compression, la dureté et le module d'élasticité.

La dureté

La pourriture brune a causé beaucoup plus de dégâts puisque pour une perte de masse de seulement 2% la perte de dureté de l'échantillon était de 50% à 60% pour la pourriture brune alors qu'elle n'était que de 26% dans le cas d'une pourriture blanche. Pour une perte de masse de 6%, l'attaque par pourriture brune a altéré la dureté à 80% alors que pour une perte de masse de 10%, la pourriture blanche n'en a altéré que 60% (Wilcox W.W. 1978).

Les propriétés en flexion

En flexion statique, les résultats peuvent être exprimés à travers la réduction du module d'élasticité (MOE) ou du module de rupture (MOR). Les résultats trouvés dans la littérature ne nous permettent pas de comparer d'une manière correcte les attaques par agents de pourriture brune et fibreuse, les essais de pourriture blanche n'ayant porté que sur les feuillus, ceux de pourriture brune, sur résineux. Cependant, il semble que dans le cas d'une pourriture blanche, le module d'élasticité soit moins affecté que le module de rupture : pour une perte de masse de 2%, la réduction de MOE était de 4%, alors que celle de MOR était de 14%. Pour une perte de masse de 10%, l'échantillon avait perdu 24% de MOR et 14% de MOE. Dans le cas d'une pourriture brune sur résineux, il semble que MOE soit légèrement plus affecté que MOR (Wilcox W.W. 1978). Liu et al. (1992) qui ont effectué des essais de micro flexion statique sur plusieurs essences dégradées par *Coriolus versicolor* ont montré que sur du bouleau, une perte de masse de 22% a entraîné une diminution de MOR de 31% alors que sur du douglas, une réduction de 25% de MOR était enregistrée pour une perte de masse de seulement 10,5%.

Sur le Douglas, *G. trabeum*, pour une perte de masse de 14%, a provoqué une perte de MOR de 33%. L'attaque de *G. trabeum* est plus dévastatrice pour les propriétés mécaniques que l'attaque de *C. versicolor*, à perte de masse égales.

Les propriétés en compression

Deux types de compression ont été testés : la compression perpendiculaire et la compression parallèle aux fibres. Les résultats sont peu nombreux mais il semble qu'une pourriture brune engendre plus de dégâts qu'une pourriture blanche, surtout en compression longitudinale :

pour une perte de masse de 10%, un feuillu dégradé par un agent de pourriture blanche a perdu 20% de sa résistance en compression (critère non précisé) alors qu'un résineux attaqué par un agent de pourriture brune en a déjà perdu entre 40 et 50% (Wilcox W.W. 1978).

1.3.3 Les insectes xylophages

Les insectes sont des animaux invertébrés appartenant à l'embranchement des arthropodes qui se caractérisent par leur squelette externe. Les insectes sont de proches parents des crustacés, arachnides et myriapodes. Ils s'en distinguent cependant par plusieurs caractères morphologiques qui sont principalement les suivants : trois paires de pattes, corps constitué de trois parties distinctes qui sont la tête, le thorax et l'abdomen.

Les insectes ont colonisé au cours de l'ère primaire la presque totalité des milieux terrestres. A elle seule, la classe des insectes recèle autant d'espèces que tout le reste du monde vivant réunis. On compte actuellement environ 2,5 millions d'espèces décrites et vraisemblablement autant à décrire.

1.3.3.1 Les insectes de bois frais

La plupart de ces insectes xylophages ne peuvent vivre que dans du bois dont l'humidité est élevée (frais de coupe). Ils se trouvent sur les arbres en train de mourir ou sur les grumes fraîchement abattues. On peut citer les bostryches, le platype ou les sirex.

Le bostryche liseré provoque ce que l'on appelle la vermoulure noire, pratiquant des couloirs en échelons. Il cause de très importants dégâts dans les bois abattus.

Le platype est un très petit coléoptère (5mm) dont les larves s'attaquent au chêne. En général l'aubier seul est atteint, mais en cas d'été sec, l'insecte cherche l'humidité plus profondément dans la grume. Le platype s'attaque aussi au hêtre et au frêne, parfois au châtaignier.

Les sirex rappellent un peu les guêpes par leur forme et les rayures de leur abdomen. La femelle pond à l'intérieur des écorces, grâce à une tarière droite. On connaît principalement le sirex commun ou des sapins et le sirex géant ou sirex des pins. Il y a en général deux générations par an. La larve met au moins un an (parfois 2 ou 3) à évoluer. Ainsi on peut voir éclore des sirex dans une maison habitée depuis 2 ou 3 ans. Ces insectes aux mandibules puissantes, causent de très importants dégâts. Toutefois ils ne pondent pas à nouveau sur les pièces de bois qui les enfermaient.

1.3.3.2 Les insectes de bois sec

Ils existent aussi des insectes qui peuvent se développer dans le bois sec (humidité inférieure à 18%) et s'y reproduire. Ces derniers sont beaucoup plus dangereux pour le bois mis en œuvre dans la construction, vu que plusieurs générations d'insectes peuvent y poursuivre leur travail destructeur dans une même pièce de bois.

Ce sont principalement le capricorne des maisons ou *Hylotrupes bajulus*, le criocéphale, l'hespérophone, les lyctus et les vrillettes.

Le capricorne des maisons vit parfois dans les résineux secs sur pied, mais attaque surtout les poutres et charpentes de tous les résineux bien secs et plus rarement l'aubier du chêne et le peuplier. L'insecte adulte ne sortant pas du bois et son évolution étant très lente on peut voir se succéder des générations de ces insectes pendant 10 à 20 ans dans une même pièce, jusqu'à destruction totale du bois. Les dégâts causés par cette espèce s'étendent de plus en plus. Plus le bois est sec, plus l'atmosphère ambiante est chaude, plus l'insecte se développe. Les années sèches (de 1943 à 1949) sont marquées par une extension importante de ses attaques. Mais les pays froids ne sont pas à l'abri, car les maisons de bois bien chauffées des

pays scandinaves lui conviennent parfaitement. On commence à signaler des attaques un peu dans toutes les régions de France.

L'Hesperophane cinereus vit aussi dans les bois très secs, mais exclusivement les essences feuillues, notamment le chêne.

Le criocéphale attaque les charpentes de résineux dans les mêmes conditions que l'hylotrupes.

Les lyctus sont de petits coléoptères (3 à 5 mm) attaquant l'aubier de la plupart des bois feuillus: chêne, châtaignier, noyer, cerisier, frêne, érable. C'est par excellence l'espèce ennemie des parquets de deuxième choix non parfaitement purgés d'aubier. Il faut des vaisseaux assez gros, un pourcentage d'amidon suffisant pour que les larves puissent se développer. La vermoulure des lyctus est d'une extrême finesse.

Les vrillettes (ou Anobium) sont de petits coléoptères à antennes dentées en scie, de fort petite taille (2 à 6 mm) suivant les espèces. De nombreuses espèces attaquent durant 3 ou 4 ans d'évolution les bois bien secs des vieux meubles, des boiseries, des poutres. On entend très bien leur travail, dans le silence et l'on trouve leurs évacuations: vermoulure granuleuse. Les bois attaqués de préférence sont le merisier, le noyer, le charme, l'aulne, le peuplier. Les duramen des feuillus et des résineux sont rarement attaqués. Certaines espèces attaquent aussi le papier. La ponte a lieu de mai à septembre. Rien ne révèle extérieurement les galeries. Les insectes parfaits sortent par des trous arrondis de 1 à 4 millimètres de diamètre. Ces trous de sortie sont aussi des lieux de ponte pour cette première génération.

1.3.3.2.1 Les termites

En 1997, on distinguait 5 grandes familles, 285 genres et environ 2753 espèces de termites dans le monde. Ils possèdent une morphologie simple, mais ont un comportement très complexe, car il s'agit d'un insecte social, qui vit en colonies. Une colonie de termites est peuplée de 100 à quelques millions d'individus.

Ils appartiennent à l'ordre des Isoptères et on peut les classer systématiquement en trois catégories :

-*Les termites souterrains*, regroupant les Rinotermitidae, les Mastotermitidae, les Termitidae, qui fondent leurs termitières dans le sol où ils trouvent l'humidité dont ils ont besoin pour vivre; ils se nourrissent de bois ou d'autres matériaux à base de cellulose qu'ils vont chercher dans des endroits éloignés de la termitière.

- *Les termites de bois sec*, comprenant les Kalotermitidae, qui réalisent leur termitière dans le bois sec à l'air et s'en nourrissent; ils se contentent de l'humidité du bois et n'ont pas besoin d'aller chercher de l'eau à l'extérieur des pièces de bois dans lesquelles ils sont installés.

-*Les termites humivores*, regroupant les Hodotermitidae et les Termopsidae, qui se rencontrent dans les bois en décomposition.

1.3.3.2.1.1 Les termites présentes en France

En France métropolitaine, sont rencontrées trois espèces dont deux espèces sont souterraines et une de bois sec. Les termites souterrains appartiennent à

La famille : *Rhinotermitidae*

Sous-famille : *Heterotermitidae*

Genre : *Reticulitermes*

Espèces : *Reticulitermes santonensis* de Feytaud ou termite de Saintonge

Reticulitermes lucifugus Rossi ou termite lucifuge des Landes.

Toutes ces espèces sont susceptibles de s'attaquer aux bâtiments et sont largement sorties de leurs aires de répartition naturelle, probablement par le fait des activités humaines. Elles ont tendance à entrer en contact les unes avec les autres dans les zones urbaines.

Les termites du bois sec appartiennent à

La famille : *Kalotermitidae*

Genre : *Kalotermites*

Espèce : *kalotermites falavicolis* ou termite flavicolle

Les termites de bois secs nichent directement dans le bois qu'ils consomment ; leur activité a de faibles conséquences économiques. :

1.3.3.2.1.2 Localisation des termites en France

Les termites sont principalement des insectes des régions tropicales et équatoriales. C'est, par accident que certaines espèces ont été introduites dans quelques zones tempérées telles que la France et ont, malheureusement, réussi à s'adapter à des conditions climatiques assez éloignées de celles des régions d'origine.

reproducteurs primaires (ou sexués primaires) et les reproducteurs secondaires (ou sexués secondaires).

En principe, il existe un seul couple de reproducteurs primaires par colonie, la reine et le roi. La reine vit à côté du roi et son abdomen se dilate, elle pond chaque année des milliers d'œufs. Les œufs éclosent après 3 à 4 semaines. Les premières larves sont nourries de salive, elles se développent, et après quelques mues elles se différencient en ouvriers (représentant environ 80 % de la population de la colonie), soldats (représentant 2 à 5 % de la population de la colonie) et nymphes (15 à 18 % de la population de la colonie). Ce sont les nymphes qui évoluent en reproducteurs. Au fur et à mesure des nouvelles pontes de la reine, la termitière s'accroît. L'essaimage se produit par essaimants (les sexués primaires male ou femelle ailés) en avril pour *R.santonensis*, cependant, en milieu urbain, des essaimages de *R. santonensis* ont été constatés dès la fin du mois de janvier.

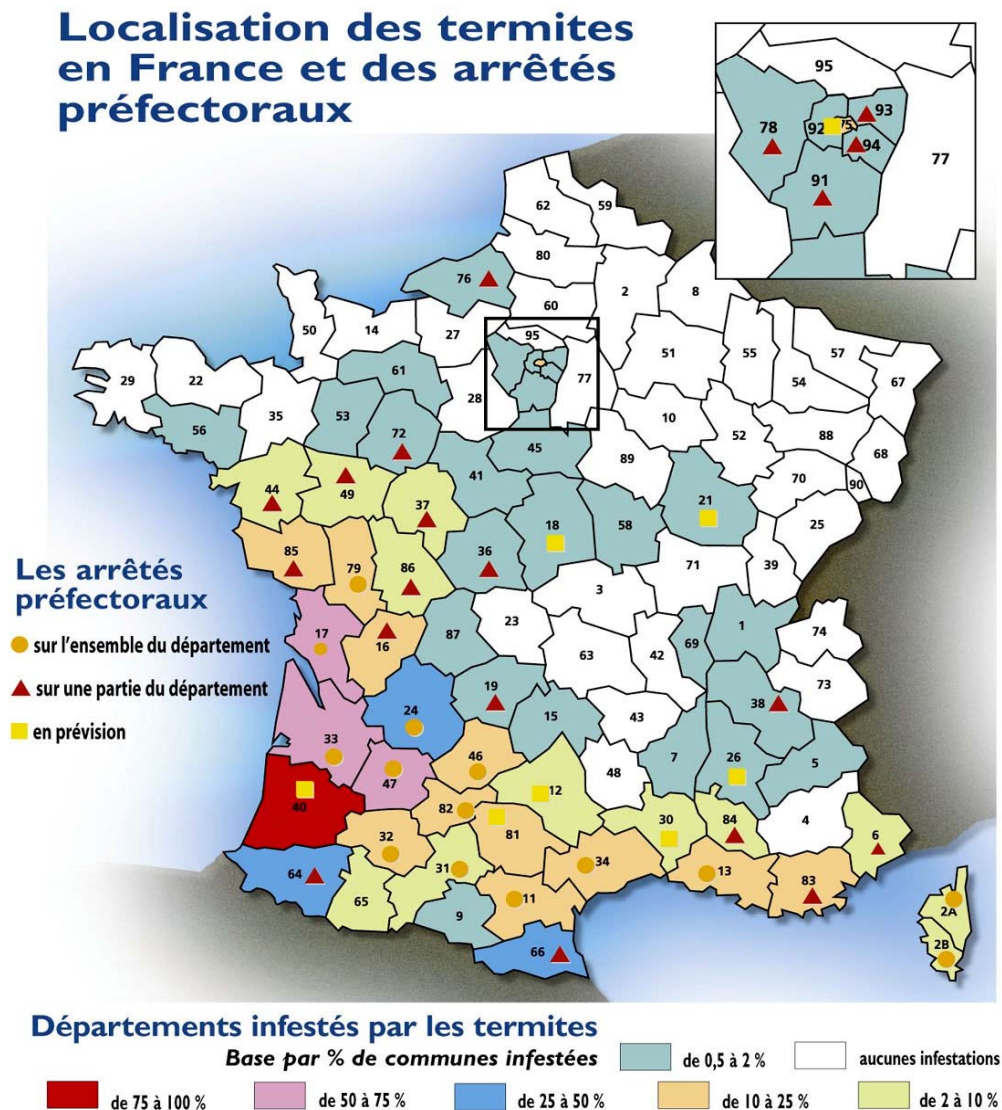


Figure 8. Localisation des termites en France(CTBA).

En dehors de la France, les termites de genre *Reticulitermes* ont été collectés en Italie, Espagne, Grèce, et Turquie (Uva, P. et al. 2004).

D'après Vieau, F. (1993) il est vraisemblable que le termite de Saintonge ait été introduit en France par l'importation de bois provenant d'Amérique du Nord, comme dans le cas du port de Hambourg, et il serait en compétition avec le termite lucifuge qui, lui est indigène.

1.3.3.2.1.3 Biologie des termites souterrains

Les termites vivent en société, des individus de formes différentes sont aperçus dans les colonies, il s'agit de polymorphisme et de caste. Chaque caste remplit une fonction précise. La caste des ouvriers est responsable de la récolte des aliments et de l'entretien de la termitière, la caste des soldats défend la termitière contre les agresseurs extérieurs et la caste des reproducteurs assume la pérennité de la colonie. La dernière caste comprend les La

dernière caste comprend : les reproducteurs primaires (ou sexués primaires) et les reproducteurs secondaires (ou sexués secondaires).

En principe, il existe un seul couple de reproducteurs primaires par colonie, la reine et le roi. La reine vit à côté du roi et son abdomen se dilate, elle pond chaque année des milliers d'œufs. Les œufs éclosent après 3 à 4 semaines. Les premières larves sont nourries de salive, elles se développent, et après quelques mues elles se différencient en ouvriers (représentant environ 80 % de la population de la colonie), soldats (représentant 2 à 5 % de la population de la colonie) et nymphes (15 à 18 % de la population de la colonie). Ce sont les nymphes qui évoluent en reproducteurs. Au fur et à mesure des nouvelles pontes de la reine, la termitière s'accroît. L'essaimage se produit par essaimants (les sexués primaires male ou femelle ailés) en avril pour *R.santonensis*, cependant, en milieu urbain, des essaimages de *R. santonensis* ont été constatés dès la fin du mois de janvier.

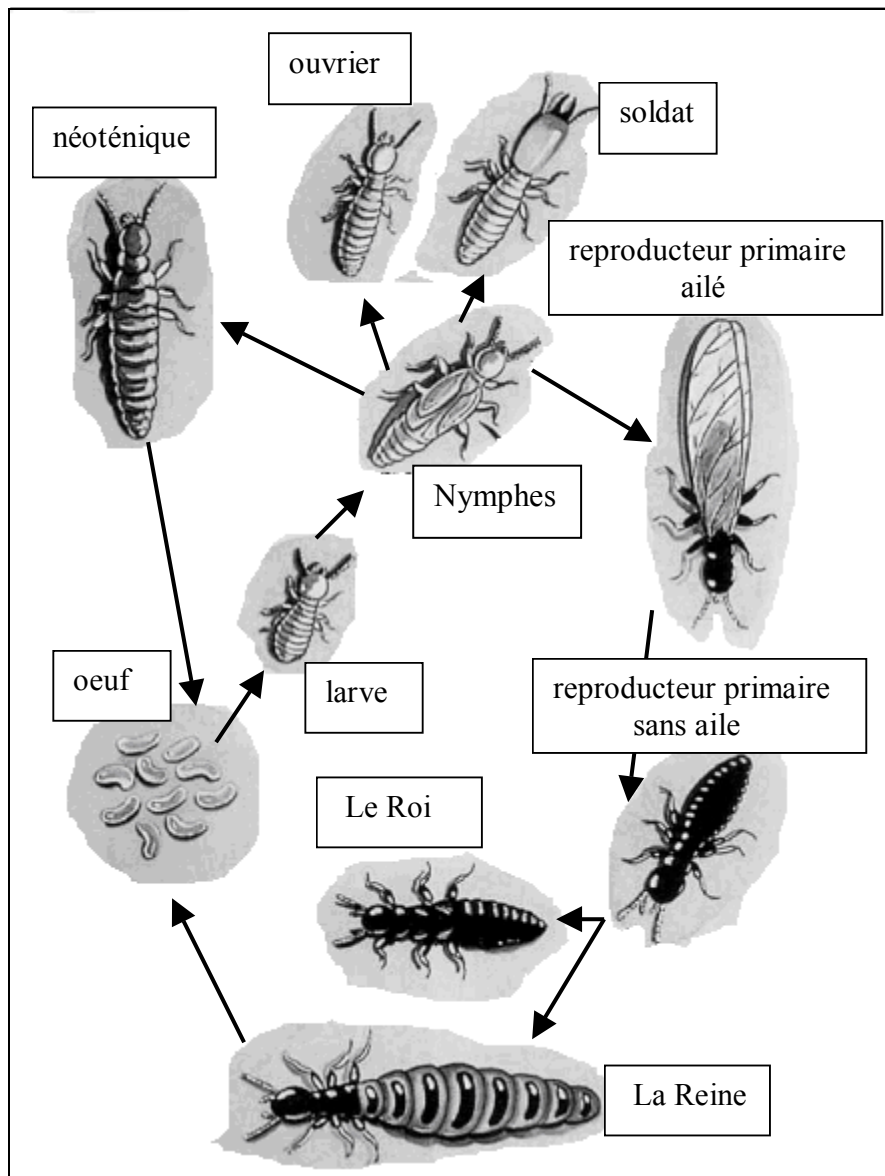


Figure 9. Cycle de développement des termites souterrains.

Ils sortent un par un d'un orifice préparé par les ouvriers. Après un vol de quelques dizaines de mètres, ils tombent sur le sol, se débarrassent de leurs ailes et recherchent un partenaire.

Finalement un mâle suit une femelle et ils creusent une loge pour y installer leur nid. Les sexués utilisent leurs réserves alimentaires pour assurer la survie du couple et des premières pontes. Les reproducteurs secondaires sont des individus capables de se reproduire tout en ayant gardé leurs caractères morphologiques larvaires, c'est à dire sans jamais devenir des imagos.

Ce phénomène est courant chez les espèces souterraines et ce sont surtout des nymphes qui se transforment en néoténiques. Ils sont capables de reprendre la reproduction à leur compte en cas de disparition des imagos, d'où leur nom de reproducteurs secondaires.

Les termites souterrains du genre *Reticulitermes* forment des colonies diffuses dans le sol. Leur aliment de prédilection est le bois mort, mais ils sont à la recherche de toute matière contenant de la cellulose. Ils creusent des galeries dans leur nourriture, les reproducteurs s'y installent ainsi que leur couvain. Plusieurs sites de nourrissage peuvent être exploités, bûchers, souches, clôtures, maisons, avec tout un réseau de galeries tunnels entre eux.

1.3.4 Les térébrants marins

Les crustacés

Les limnoria et chélura se logent dans des galeries creusées dans les appointements. Ces galeries sont de petit diamètre mais peuvent atteindre une dizaine de centimètres de profondeur et un animal peut sortir d'une galerie pour en creuser une autre.

Les tarets

Le mollusque à l'état de larve nageant librement dans l'eau de mer, peut se fixer sur une pièce de bois, alors qu'il est presque imperceptible. Avec sa minuscule coquille bivalve, il perce un trou dans le bois. Il continue sa galerie dont les parois s'incrudent de calcaire. Il vit environ un an et peut atteindre à ce moment une dizaine de centimètres de long et 5 mm de diamètre.

La protection contre ces animaux marins est difficile. Certaines essences comme l'azobé, l'angélique, le teck ont une bonne résistance naturelle.

2

MATERIEL ET METHODES

2.1 Matériel végétal

2.2 Matériel utilisé pour la mesure des différentes propriétés

2.3 Méthodes

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Matériel végétal

2.1.1 Les résineux

2.1.1.1 *Cedrus atlantica* Manetti.

Le Cèdre est membre du genre *Cedrus*, désignant trois ou quatre espèces de grands arbres originaires des régions montagneuses d'Afrique du Nord et d'Asie. Les cèdres appartiennent à la famille des pinacées, dont les membres possèdent des feuilles en forme d'aiguilles et, comme tous les conifères, portent leurs graines enfermées dans des cônes. Les cèdres diffèrent de leurs parents par leurs aiguilles rassemblées en petits bouquets sur de courtes branches. Le cèdre produit un bois odorant, rougeâtre et incorruptible, utilisé dans la construction et la fabrication de meubles et de crayons. Bien que les cèdres ne soient originaires que des régions précitées, ils sont couramment plantés comme arbres d'ornement, et il en existe de nombreuses variétés horticoles, axées sur les formes et la couleur des feuilles.

Le cèdre le plus connu est le cèdre du Liban (*Cedrus libani* A. Rich), souvent cité dans l'Ancien Testament. Le premier Temple de Salomon fut construit dans son bois. Originaire d'Asie Mineure, cette espèce doit à sa croissance lente son peu d'intérêt commercial. Les arbres peuvent atteindre 30 m de haut et présentent des branches étalées et un port majestueux inhabituel chez les autres conifères. Les aiguilles vert sombre brillant mesurent environ 2,5 cm et les cônes dressés environ 10 cm. Le cèdre de Chypre (*C. brevifolia* Henry) est généralement considéré comme une variété de cèdre du Liban. Le cèdre de l'Atlas (*C. atlantica* Endl.) en est un proche parent. Le cèdre de l'Himalaya (*C. deodara* G. Don) est très utilisé comme bois de construction en Inde. Contrairement aux autres espèces qui possèdent des branches horizontales et des cônes plats ou creux à leur sommet, le cèdre de l'Himalaya présente des branches à rameaux tombants et des cônes ronds.

De nombreux autres arbres sont appelés cèdres, ce sont soit des conifères de différentes familles:

Cèdre rouge occidental (*Thuja plicata*), le thuya géant.

Cèdre rouge oriental (*Juniperus virginiana*).

Cèdre rouge japonais (*Cryptomeria japonica*), le sugi.

Cèdre chinois (*Toona sinensis*).

Cèdre à encens ou calocèdre (*Calocedrus decurrens*).

Cèdre de l'Alaska (*Cupressus nootkatensis*), le faux cyprès de Nootka.

Cèdre blanc (*Thuja occidentalis*): c'est un conifère du Canada appelé aussi thuya d'Occident.

Cèdre de Goa ou cèdre de Bussaco (*Cupressus lusitanica*), c'est une espèce de cyprès du Mexique.

Cèdre de Virginie (*Juniperus virginiana*) ;

Soit des feuillus, généralement tropicaux et odorants, de la famille des méliacées (cedrella) ou des lauracées (cèdre canelle) par exemple.

L'huile essentielle aromatique du cèdre a des propriétés antiseptiques (ne pas confondre cette huile avec l'« huile de cèdre » utilisée pour l'observation microscopique, qui est tirée du genévrier de Virginie, appelé parfois cèdre de Virginie). Elle est utilisée dans la parfumerie et les produits insectifuges. Chez les Égyptiens anciens, l'essence de cèdre entrainait dans les préparations servant à embaumer les momies

Le bois de cèdre est odorant et utilisé en menuiserie, placages ou dans la construction (Bown, D. 1995). On peut qualifier le duramen de durable à très durable, l'aubier au contraire est non durable (Brunetti et al. 2001). Le bois reste assez dense même en plantation à croissance rapide, mais le retrait volumétrique est limité et le rapport entre le retrait tangentiel et le retrait radial est inférieur à 1,5.



Figure 10. Aspect du bois de cèdre

2.1.1.2 *Cupressus sempervirens* L.

Le Cyprès est un conifère de la famille des cupressacées. Les cyprès sont répartis en plusieurs genres. Le cyprès présente habituellement une forme symétrique. Le cyprès d'Italie (*Cupressus sempervirens*), originaire de la région méditerranéenne, à feuilles persistantes, peut atteindre 30 m de haut et vivre deux mille ans. Son bois rougeâtre ou jaune à grain serré résiste au pourrissement, même après un séjour prolongé dans l'eau. Le cyprès du Mexique (*Cupressus lusitanica*) est souvent planté pour l'effet décoratif de ses branches étalées. Le cyprès de Monterey (*Cupressus macrocarpa*) est un arbre encore plus grand que l'on trouve sur la côte pacifique en Californie. Il peut atteindre 50 m de haut, avec un tronc dont la circonférence à la base est de 3 m.

Il existe dans l'ouest des États-Unis deux arbres appelés cyprès, appartenant à un autre genre : le cyprès de Lawson (*Chamaecyparis lawsoniana*) et le cyprès de Nootka (*Chamaecyparis nootkatensis*). Le cyprès chauve appartient à une autre famille. Il pousse dans les zones marécageuses au Mexique et dans le sud des États-Unis et ses racines aux formes courbes sont émergées. Il porte des feuilles caduques et peut mesurer 50 m de haut. Il fournit un excellent bois de construction et ses racines sont utilisées dans la fabrication de bateaux.

Classification : le cyprès appartient à la famille des Cupressacées.

Le cyprès d'Italie a pour nom latin *Cupressus sempervirens*, le cyprès de Monterey *Cupressus macrocarpa*, le cyprès du Mexique *Cupressus lusitanica*, le cyprès de Lawson *Chamaecyparis lawsoniana*, le cyprès de Nootka *Chamaecyparis nootkatensis*. Le cyprès chauve appartient à la famille des Taxodiacees et se nomme *Taxodium distichum*

Cupressus sempervirens est le représentant le plus connu des cupressées. Il est souvent désigné sous le vocable de cyprès des « cimetières ». On a pu observer une excellente résistance du duramen des essences de cette famille face aux attaques microbienne, des insectes et des termites. Les molécules responsables de la durabilité naturelle des Cupressacées font partie de la famille des trépanones (Haluk et al. 2000).



Figure 11. Aspect du bois de Cyprès

2.1.2 Les feuillus

2.1.2.1 *Fagus sylvatica* L.

Le hêtre, ou fayard, *Fagus sylvatica*, appartient à la famille des Fagacées de l'ordre des Fagales. Le hêtre d'Asie mineure a pour nom latin *Fagus orientalis*, le hêtre américain à grandes feuilles, *Fagus grandifolia*. La famille du hêtre austral est celle des Nothofagacées et son unique genre est Nothofagus.

Le hêtre a un tronc puissant et élevé, une écorce lisse très fine, de petites feuilles ovales et des bourgeons bruns, fusiformes. Ses fruits comestibles ou faines, petits et pyramidaux, se conservent mal. Ils contiennent près de 50% de lipides et ont longtemps été utilisés pour nourrir les cochons. Le hêtre est présent dans presque toute la France. Il exige beaucoup d'humidité, un sol bien drainé et préfère les terrains calcaires. Il croît plutôt en climat océanique et en moyenne montagne humide. Exploité entre 100 et 180 ans, le hêtre est facile à travailler et constitue un excellent bois de sciage et de menuiserie, utilisé dans la confection de meubles et de parquets. Les pinces à linge à l'ancienne sont en général également en hêtre. Certaines variétés de hêtre, à feuillage rouge, doré, ou panaché de blanc, sont utilisées comme essences d'ornement ainsi que des variétés à port pleureur.

Caractéristiques du bois de hêtre.

Aspect

Blanc jaunâtre à brun rougeâtre clair, uniforme, fil droit à peu ondulé, grain fin

Stabilité

Adaptation à l'humidité ambiante = moyenne à rapide

Retrait radial = 0.25 en % pour 1% d'humidité

Retrait tangentiel = 0.42 en % pour 1% d'humidité

Aptitude au séchage : délicat, tendance à gauchir, tendance à se fissurer

Caractéristiques mécaniques

Densité minimum à 12% = 0,69 g/cm³

Densité moyenne à 12% = 0,71 g/cm³

Densité maximum à 12% = 0,75 g/cm³

Module d'élasticité en flexion = 14300 N/mm²

Contrainte de rupture à la compression = 58 N/mm²

Contrainte de rupture à la traction = 117 N/mm²

Contrainte de rupture à la flexion = 107 N/mm²

Résistance au choc = 10.0 Nm/cm²

Dureté Brinell perpendiculaire aux fibres = 28 N/mm²

Dureté Brinell parallèle aux fibres = 71 N/mm²

Utilisation

Menuiserie intérieure, Meuble, Parquet, Contreplaqué, Traverses, Emballage, Tournage.



Figure 12. Aspect du bois de hêtre

2.1.2.2 Castanea sativa Mill.

Classification : Les châtaigniers appartiennent à la famille des Fagacées. Le châtaignier européen a été dénommé *Castanea sativa*, le châtaignier japonais *C. crenata* et le châtaignier chinois *C. mollissima*. Le châtaignier ne possède qu'une très faible épaisseur d'aubier (3 à 5 cernes) en raison d'un phénomène de duraminisation très rapide (3 à 5 ans). En terme d'épaisseur, celle-ci est de l'ordre de 6 mm, en tous cas toujours inférieure au centimètre.

Les fruits de châtaignier s'appellent des châtaignes. Il existe une douzaine d'espèces de châtaigniers originaires des régions tempérées de l'hémisphère Nord. Le châtaignier commun (*C. sativa*) est très répandu en France, surtout dans les régions méditerranéennes (Cévennes, Périgord, Corse) où il a été cultivé pendant des siècles pour son fruit comestible et son bois.

Le châtaignier est considéré, tout au moins pour le duramen, comme une des essences feuillues européennes durables. Face à une attaque biologique, son aubier présente cependant une grande fragilité. Dans la majorité des cas, l'aubier est purgé de manière à ne pas perturber la bonne tenue au temps du produit fabriqué.

Caractéristiques du bois

Aspect

Brun jaunâtre, légèrement veiné, fil droit, grain grossier

Stabilité

Adaptation à l'humidité ambiante = lente

Retrait radial = 0.14 en % pour 1% d'humidité

Retrait tangentiel = 0.24 en % pour 1% d'humidité

Aptitude au séchage : lent, délicat

Caractéristiques mécaniques

Densité minimum à 12% = 0,54 g/cm³

Densité moyenne à 12% = 0,59 g/cm³

Densité maximum à 12% = 0,65 g/cm³

Module d'élasticité en flexion = 10500 N/mm²

Contrainte de rupture à la compression = 46 N/mm²

Contrainte de rupture à la traction = 128 N/mm²

Contrainte de rupture à la flexion = 71 N/mm²

Résistance au choc = 5.7 Nm/cm²

Dureté Brinell perpendiculaire aux fibres = 19 N/mm²

Dureté Brinell parallèle aux fibres = 34 N/mm²

Utilisations

Menuiserie extérieure, Menuiserie intérieure, Meuble, Parquet, Bardage, Lambris.



Figure 13.Aspect du bois de Châtaignier

2.1.2.3 Populus x euramericana Clone I-214.

Classification : Les peupliers appartiennent au genre *Populus* de la famille des salicacées.

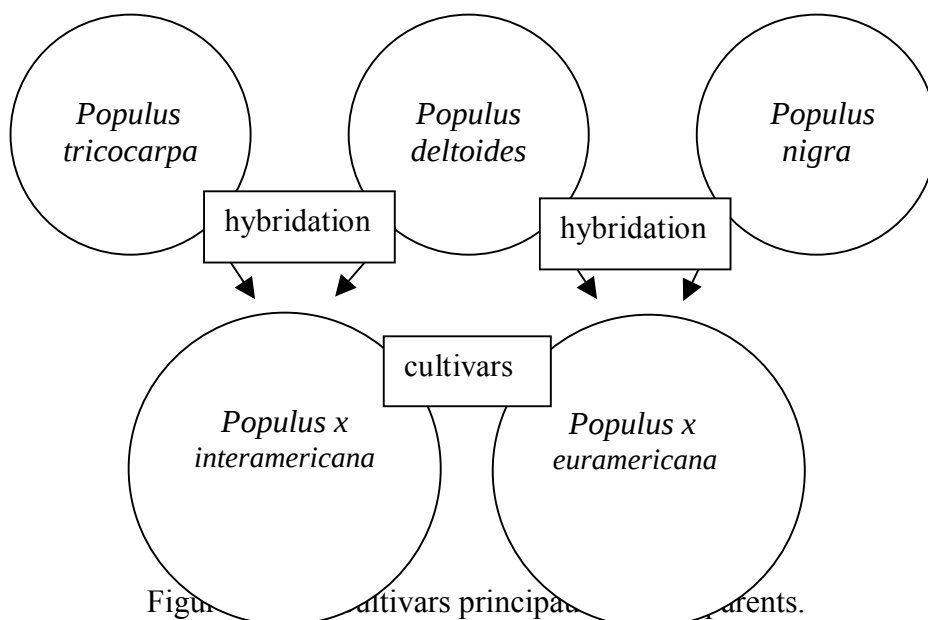
Les peupliers utilisés actuellement sont issus de trois espèces et de leurs hybridations :

-Les peupliers noirs (*Populus nigra*) originaires d'Europe à croissance moyenne.

-Les peupliers deltoïdes (*Populus deltoides*) originaires de l'est de l'Amérique du Nord: à croissance très rapide mais très exigeants. Ils nécessitent des sols fertiles et travaillés. Bois de bonne qualité.

-Les peupliers baumiers (*Populus trichocarpa*) originaires de l'ouest de l'Amérique du Nord, croissance moyenne, bois de qualité moyenne.

L'hybridation de ces espèces entre elles permet de créer de nouvelles variétés (cultivars) qui conservent les caractéristiques intéressantes de leurs parents tout en éliminant les caractères indésirables. Les cultivars utilisés sont classés en deux grandes familles :



Euraméricains (noir + deltoide)	Interaméricains (deltoide + tricocarpa)
Blanc du Poitou	Boelare
Cima	Donk
Dorskamp	Hunnegen
Flévo	Unal
Ghoy	
I 214	
I 45/51	
Luiza Avanzo	
Robusta	
Triplo	
Gaver	

Tableau3. Les clones de deux cultivars principaux des peupliers.

Clone I-214 :

Hybride spontané découvert en Italie par Piccarolo, Institut de Cassale Monferrato en 1929. Les premières plantations de I 214 ont débuté dans les Pays de Loire vers 1950 et se sont développées rapidement compte tenu de la forte croissance de ce clone comparativement au Robusta et au Blanc du Poitou.



Figure 15. Tronc d'un clone I 214.

Lorsque les premiers I 214 ont été exploités vers 1970 les utilisateurs locaux et d'autres régions l'ont dénigré lui reprochant ses 'médiocres qualités' technologiques. 15 ans plus tard les Ets Morineau en liaison avec le CTBA mettent au point la technique d'utilisation de ce clone pour la fabrication de contreplaqué, les autres dérouleurs suivent, la qualité du bois du I 214 devient la référence. Les problèmes rencontrés dans l'Aisne, l'Oise et la Somme du fait des arrêts de croissance suite aux défeuillaisons dues au *Marssonina Brunnea*, les erreurs d'implantation de ce clone en milieu hors vallée font que I 214 n'a pratiquement plus été planté à partir de 1979/1980. En Pays de Loire, la plus faible production de plants de I 214 en pépinières a été constatée pour la saison de plantation 1984/1985, elle représentait seulement 1,2 % du total des plants commercialisés. La forte demande de l'industrie, des cours soutenus voisins ou supérieurs à 300 F le m³ font que le clone I 214 a retrouvé un nouvel attrait auprès des planteurs de peupliers. Il est planté beaucoup en vallée de la Garonne et en Provence, en 1992/1993, ce clone représente 18,2 % des plants vendus en Pays de Loire.

I 214 est très sensible à *Marssonina Brunnea*, cette maladie du feuillage qui se développe les années humides n'a jamais causé de très gros problèmes dans la région des Pays de Loire, elle peut cependant réduire ou arrêter la croissance des I 214 durant un ou deux ans. En cas d'attaque un élagage soigné des branches basses infectées et un enfouissement par un travail superficiel du sol, des feuilles tombées à terre permettent de limiter les infections printanières. La maladie des taches brunes en colorant le bois peut dévaloriser des grumes lors des étés très secs, mais dans tous les cas rencontrés I 214 avait été planté en stations sèches.

Le bois de I 214 convient très bien au déroulage pour la fabrication du contreplaqué et des emballages légers. Un volume important est exporté vers l'Italie et l'Espagne pour ces mêmes utilisations. A noter le problème de la fente, éclatement des grumes à l'abattage ou des billons durant le transport. Ce défaut dévalorise un pourcentage non négligeable de certaines coupes. I 214 ne convient pas pour une utilisation en sciage.

Aspect

Blanc grisâtre à brun très pâle, uniforme, fil droit à peu ondulé, grain fin

Stabilité

Adaptation à l'humidité ambiante = rapide

Retrait radial = 0.15 en % pour 1% d'humidité

Retrait tangentiel = 0.28 en % pour 1% d'humidité

Aptitude au séchage : Sans difficulté

Caractéristiques mécaniques

Densité minimum à 12% = 0,42 g/cm³

Densité moyenne à 12% = 0,44 g/cm³

Densité maximum à 12% = 0,48 g/cm³

Module d'élasticité en flexion = 8800 N/mm²

Contrainte de rupture à la compression = 33 N/mm²

Contrainte de rupture à la traction = 72 N/mm²

Contrainte de rupture à la flexion = 65 N/mm²

Résistance au choc = 4.3 Nm/cm²

Dureté Brinell perpendiculaire aux fibres = 12 N/mm²

Dureté Brinell parallèle aux fibres = 29 N/mm²

Utilisations

Menuiserie intérieure, Moulure, Contreplaqué, Charpente-structure, Emballage



Figure 16. Aspect du bois de peuplier

2.2 Matériel utilisé pour la mesure des différentes propriétés

Nom Commun	Nom Botanique	Partie utilisée	Nombre d'arbre
Cèdre	<i>Cedrus atlantica</i>	Aubier et Duramen	3
Cyprès	<i>Cupressus sempervirens</i>	Aubier et Duramen	2
Châtaignier	<i>Castanea sativa</i>	Duramen	2
Peuplier	<i>Populus sp. I</i>	Bois normal et	2

	214	Bois gris	
Hêtre	<i>Fagus sylvatica</i>	Bois normal et Coeur rouge	1

Tableau 4. Les essences utilisés

Avant de détailler le type de matériel utilisé pour la mesure de chaque propriété et les effectifs d'échantillons correspondants, nous présentons les différentes étapes de transformation entre l'arbre et les éprouvettes finales de bois massif destinées aux différentes mesures ainsi que le plan d'échantillonnage dans les panneaux de contreplaqué. Les essences utilisées dans cette étude sont présentées au tableau 4.

Les arbres sont tronçonnés en 3 billons. Un billon de 120 cm (à la base), puis un autre billon de 150 cm et finalement un troisième billon de 120 cm (vers le sommet).

Les billons de 150 cm ont été destinés au sciage (préparation des échantillons de bois massif), et les deux billons de 120 cm pour faire le déroulage (figure 17.)

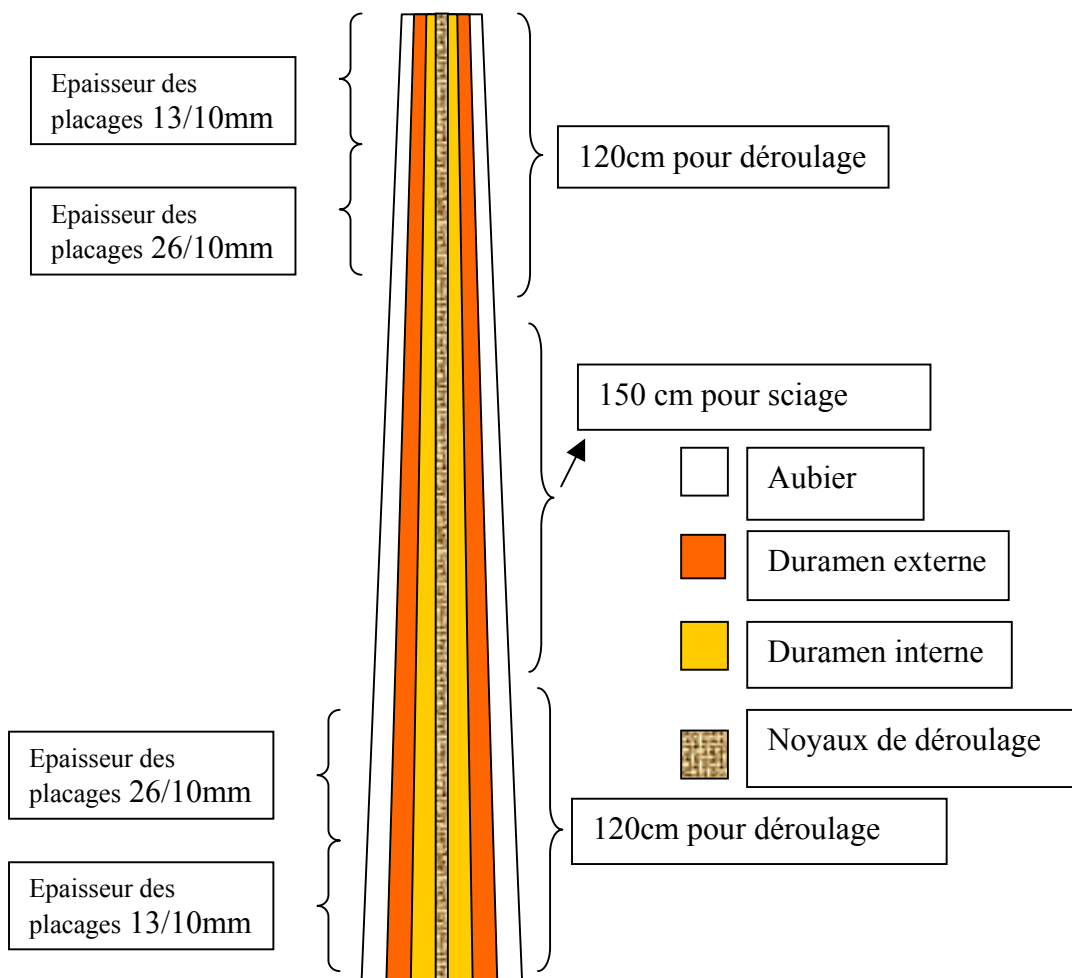


Figure 17 : Différentes parties de l'arbre utilisées pour le sciage et le déroulage

2.2.1 Bois massif

2.2.1.1 Préparation des échantillons de bois massif

Chaque billon de 150 cm longueur a été scié à l'aide d'une scie à ruban à la menuiserie du Cirad Forêt à l'état vert. Le débit a été choisi de manière à avoir la planche centrale tout à fait radiale.

Les planches ont été stockées dans un hangar jusqu'à diminution de l'humidité existante dans le bois à moins de 18% (mesuré à l'aide d'un hygromètre électrique).

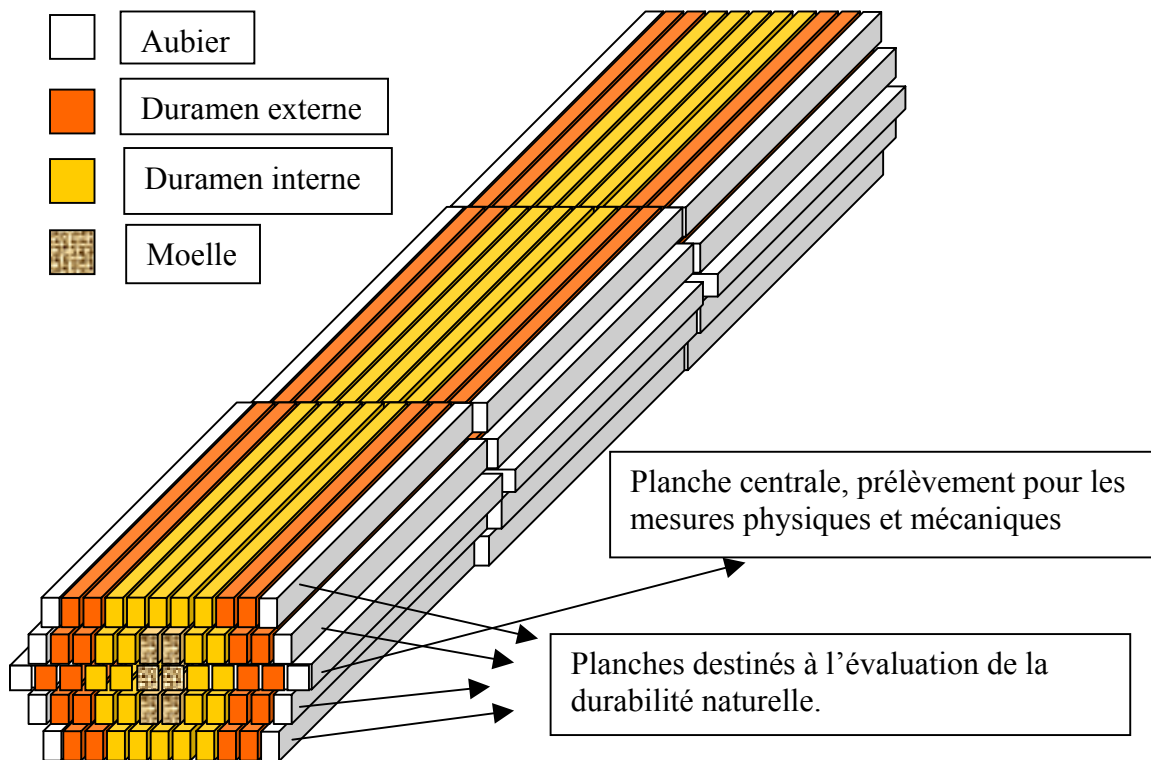


Figure 18. Distribution des planches d'un billon de 150 cm pour les essais sur bois massif.

2.2.1.2 Échantillonnage pour les mesures de module d'élasticité et de densité

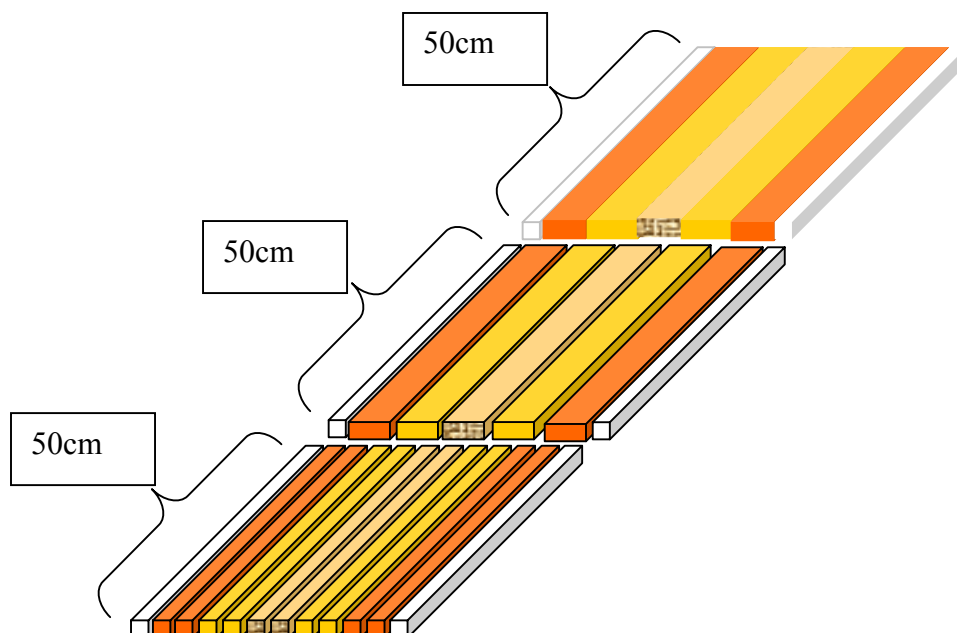


Figure 19. Débit de la planche centrale de longueur 150 cm.

La planche centrale de chaque billon a d'abord été découpée en 3 blocs de 50 cm (figure 19). Le prélèvement d'échantillons dans chaque planche est fait en respectant les orientations radiales et tangentielles comme côtés des éprouvettes. Il n'y a pas eu de prélèvement d'échantillon de bois massif près de la moelle car cette partie du bois n'est pas utilisée dans la fabrication du contreplaqué (noyau de déroulage).

Deux éprouvettes de 2x2x2 cm ont été découpées de chaque extrémité de l'éprouvette de module d'élasticité (36cm) (figure 20).

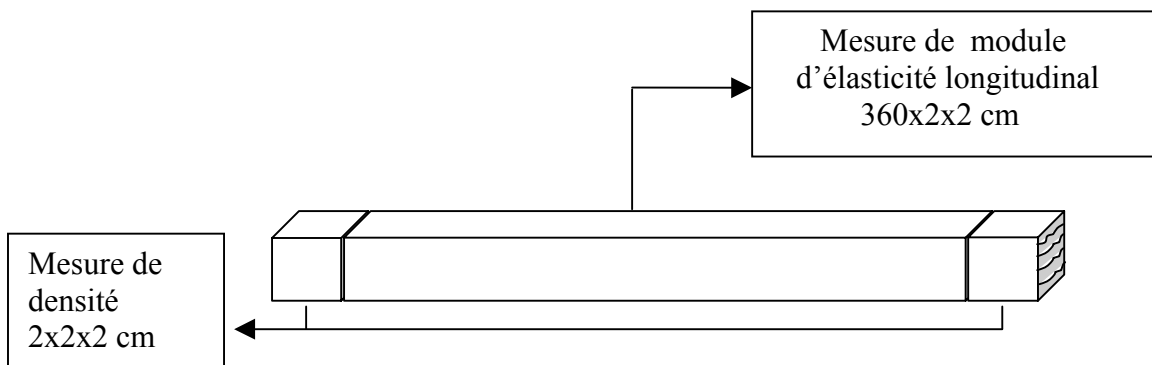


Figure 20. Débit final pour la préparation d'une éprouvette de module d'élasticité et de deux éprouvettes de densité.

2.2.1.3 Echantillonnage pour l'évaluation de la durabilité naturelle

Les 4 planches des deux côtés de la planche centrale de chaque arbre ont été découpées en 3 blocs de 50 cm pour la préparation des éprouvettes d'essais de durabilité naturelle. Les échantillons de longueur 5 cm, ont été numérotés par rapport à la positions radiale (moelle, duramen interne, duramen externe, et aubier).

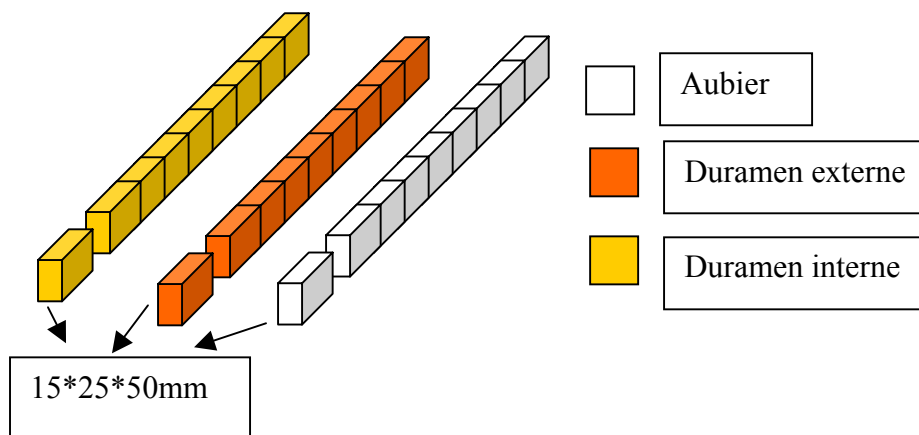


Figure 21. Préparation des éprouvettes pour évaluation de la durabilité naturelle

2.2.1.3.1 L'orientation des cernes pour l'essai d'évaluation de durabilité du bois massif

L'orientation des cernes des éprouvettes d'essais et témoin de virulence vis-à-vis des champignons et des termites est présentée dans la figure 20.

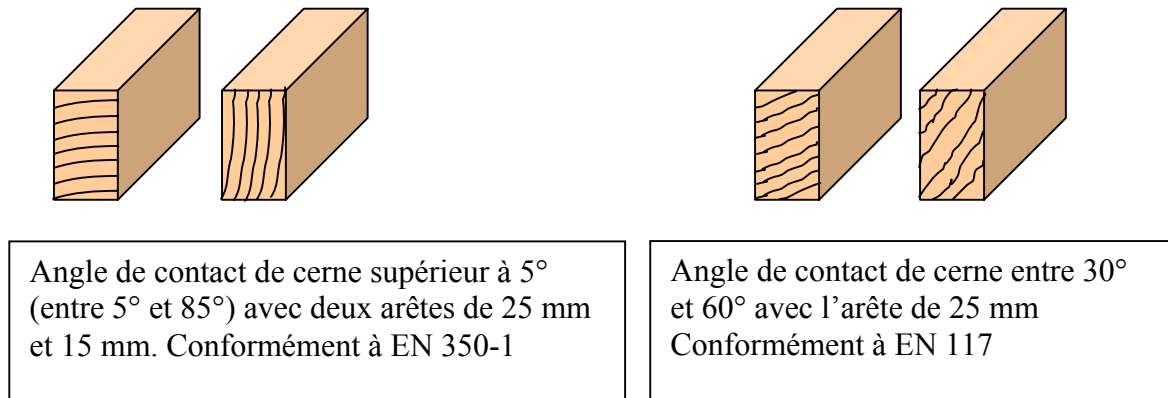


Figure 22.L'orientation des cernes

2.2.1.3.2 L'orientation des cernes pour l'évaluation de durabilité des contreplaqués

L'orientation des cernes des éprouvettes témoins de virulence et des témoins de dimension afin d'évaluer la durabilité des contreplaqués est présentée dans la figure 21. Toutes les éprouvettes de 36x2x2 cm, 2x2x2 cm, et 15x25x50 cm ont été maintenues dans une salle conditionnée réglée pour une humidité d'équilibre du bois égale à 12 %.

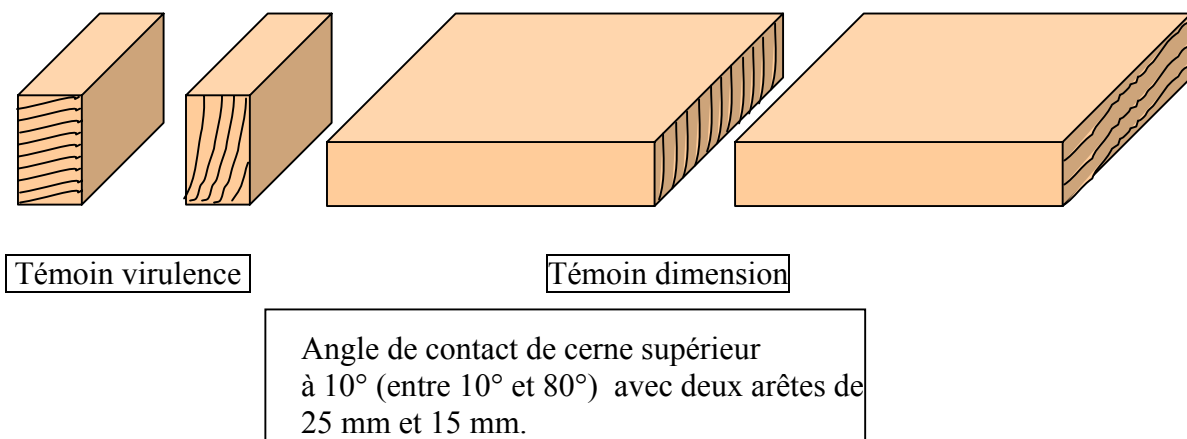


Figure 23. L'orientation des cernes d'éprouvettes témoins conformément à ENV 12038.

2.2.2 Les contreplaqués

2.2.2.1 Définition

"Panneaux obtenus par collage de plis superposés à fils croisés ; en général, les plis extérieurs et intérieurs sont placés systématiquement de chaque côté d'un pli central ou d'une âme. Si l'âme est constituée d'un matériau autre que du bois massif et de placages, il doit exister au moins deux placages de part et d'autre de cette âme". Les couches externes sont, la plupart du

temps, orientées selon le sens longitudinal du panneau, et le nombre de couches est toujours impair pour obtenir une structure symétrique par rapport au plan médian. (NF B 50-004).

2.2.2.2 Normes concernées

NF B 50-004 : Contreplaqué, vocabulaire

NF EN 314 (NF B 51-338) : Contreplaqué - Qualité du collage - Méthode d'essai et exigences

NF EN 315 : Contreplaqué - Tolérances sur dimensions

NF EN 635 (NF B 54-170) : Contreplaqué - Classification selon l'aspect des faces

NF EN 636 (NF B 51-161) : Contreplaqué – Exigences

NF P 21-400 : Bois de structure et produits à base de bois - Classe de résistance

NF P 21-701 : CB 71 - Règles de calcul et de conception des charpentes en bois

NF ENV 1995 (NF P 21-711) : EC 5 - Eurocode 5 : Calcul des structures en bois



Figure 23. Panneau de contreplaqué

2.2.2.3 Fabrication des contreplaqués au laboratoire

2.2.2.3.1 Déroulage

Les billons destinés au déroulage ont été écorcés juste avant le déroulage. Le déroulage a été effectué sans aucun traitement thermique, à l'état frais des billons, à CLUNY (ENSAM) à l'aide d'une dérouleuse qui accepte une longueur maximum de 90 cm et un diamètre maximum de 80 cm (figure 24). Le diamètre des noyaux de déroulage a été de 7 ± 1 cm.

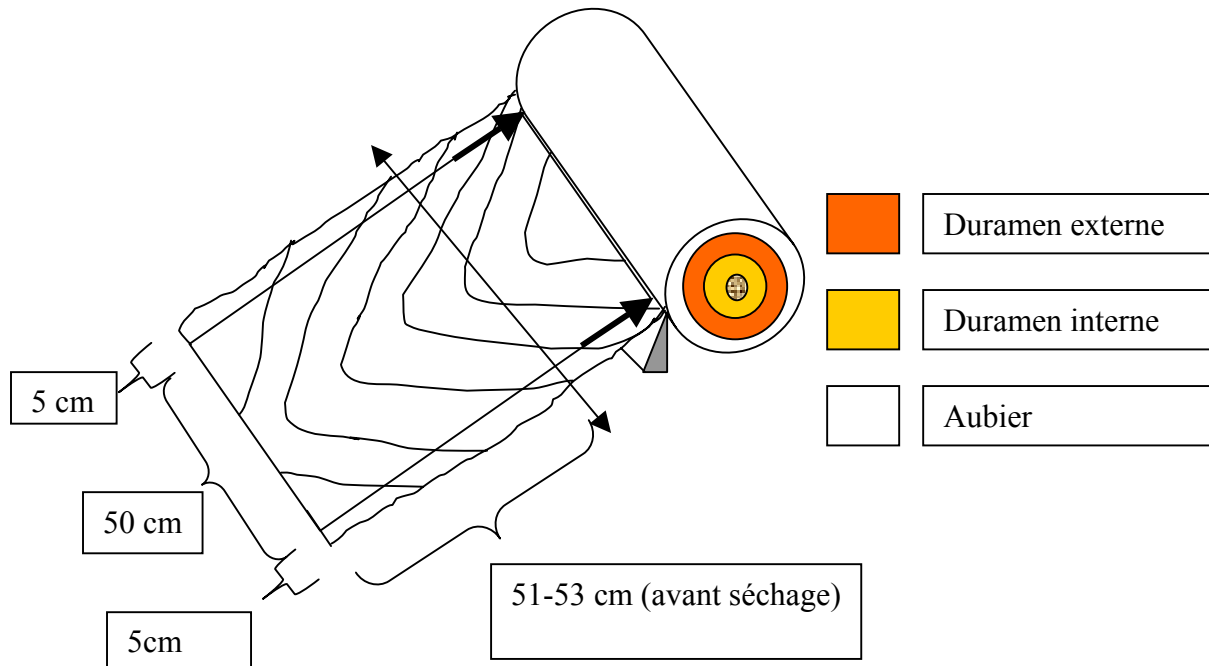


Figure 24. Massicotage des placages déroulés.

2.2.2.3.2 Massicotage

Les placages obtenus ont été massicotés entre 51 cm et 53 cm selon leur taux de retrait tangentiel (pour avoir 50 cm après séchage). La longueur dans la direction du fil a été fixée à 50 cm grâce à deux lancettes réglables de la machine.

2.2.2.3.3 Séchage

Les placages de différentes épaisseurs ont été séchés à l'aide d'un séchoir tunnel. Le passage des placages avec différentes vitesses dans le tunnel de séchoir nous a permis d'avoir des conditions semblables pour les deux groupes de placages minces et épais.

2.2.2.3.4 Climatisation

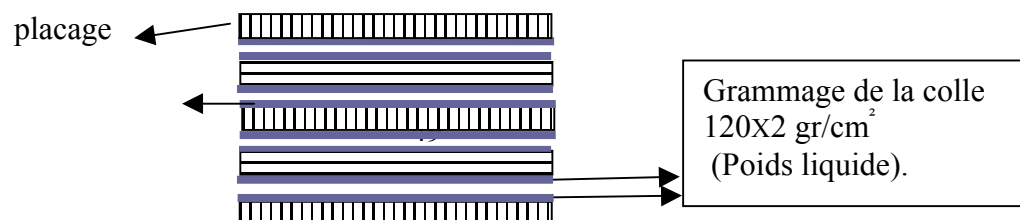
Selon la fiche technique de la colle la meilleure teneur en humidité des placages au moment du collage est entre 10-12%.

Les placages ont été maintenus dans une salle conditionnée à $65\% \pm 5\%$ d'humidité relative de l'air et $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de température.

2.2.2.3.5 Encollage

Les placages ont été triés de manière à garder la meilleure qualité et à supprimer ceux présentant trop de défauts (sauf les nœuds).

La résine est une résine Méla mine Urée Formol en combinaison avec un durcisseur liquide, elle est employée pour les applications en extérieur (les caractéristiques techniques sont disponibles dans la fiche technique de la colle en annexe). Les placages ont été encollés à l'aide d'une encolleuse à cylindres et rouleaux doseurs. L'encollage s'est fait sur les deux faces des placages, à l'exception des plis de surface. Le grammage de colle a été réglé à $240\text{gr}/\text{cm}^2$



plane de colle

Figure 25. Les plans de colle dans un contreplaqué de 5 plis

2.2.2.3.6 Composition

Les placages étant encollés selon le modèle, le pourcentage des plis durables par rapport aux plis non durables, et l'épaisseur des placages (mince ou épais) déterminant le nombre de placages composant le panneau, ont été superposés sur la table de montage en orientant le fil alternativement dans un sens et dans l'autre. La symétrie de composition a été toujours respectée, c'est-à-dire que les plis de chaque couple symétrique par rapport au pli central ont été des mêmes essences, épaisseur et orientation de fil.

2.2.2.3.7 Pressage

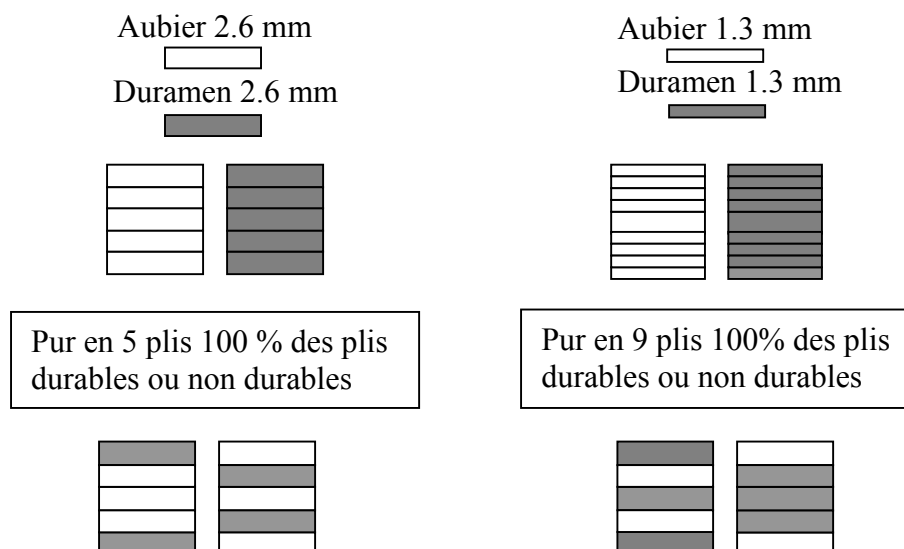
La dimension des plateaux de la presse nous a permis de faire le pressage de deux contreplaqués de 50cm X 50cm simultanément. Le taux de pression selon la densité de l'essence composant le contreplaqué a été réglé à 14kg/cm² pour le hêtre et à 12kg/cm² pour les autres essences moins denses, à l'état pur ou en mélanges (peuplier, châtaignier, cyprès, cèdre).

Selon la fiche technique de la colle, une température de 30 ° C pendant 2h a été appliquée au moment du pressage. L'épaisseur nominale des panneaux a été fixée à 13mm. Par ailleurs en fonction de l'épaisseur des placages constituant le contreplaqué, deux types de panneaux ont été réalisés :

-panneaux en 5 plis - 4 plans de colle - épaisseur des plis 26/10mm

-panneaux en 9 plis - 8 plans de colle - épaisseur des plis 13/10mm- (âme en 26/10mm)

La composition des contreplaqués en fonction de taux d'intégration des plis durables aux plis non durables est présentée dans la figure 26.



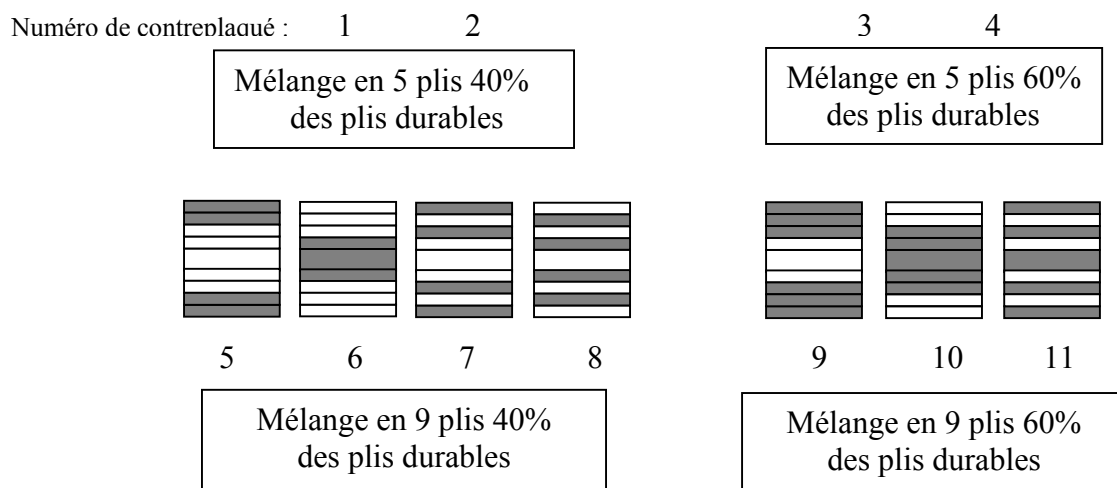


Figure 26. Différents taux d'intégration des plis durables aux plis non durables

Les 20 contreplaqués purs réalisés sont les suivants :

Cypès aubier 5 plis	Cèdre aubier 5 plis
Cypès aubier 9 plis	Cèdre aubier 9 plis
Cypès duramen 5 plis arbre 1	Cèdre duramen 5 plis
Cypès duramen 5 plis arbre 2	Cèdre duramen 9 plis
Cypès duramen 9 plis arbre 1	Cypès duramen 9 plis arbre 2

Peuplier bois normal 5 plis	Hêtre bois normal 5 plis	Châtaignier duramen 5 plis
Peuplier bois normal 9 plis	Hêtre bois normal 9 plis	Châtaignier duramen 9 plis
Peuplier bois gris 5 plis	Hêtre cœur rouge 5 plis	
Peuplier bois gris 9 plis	Hêtre cœur rouge 9 plis	

*Les contreplaqués mélangés réalisés sont les suivants :
Chaque mélange ayant 11 types de contreplaqués (fig 26).*

Mélange de deux feuillus :

Mélange de châtaignier et de peuplier
Mélange de châtaignier et de hêtre

Mélange d'un feuillus et d'un résineux :

Mélange de cèdre duramen et de peuplier
Mélange de cèdre duramen et de hêtre

Mélange de deux résineux :

Mélange de cèdre duramen et de cèdre aubier
Mélange de cypès duramen et de cypès aubier

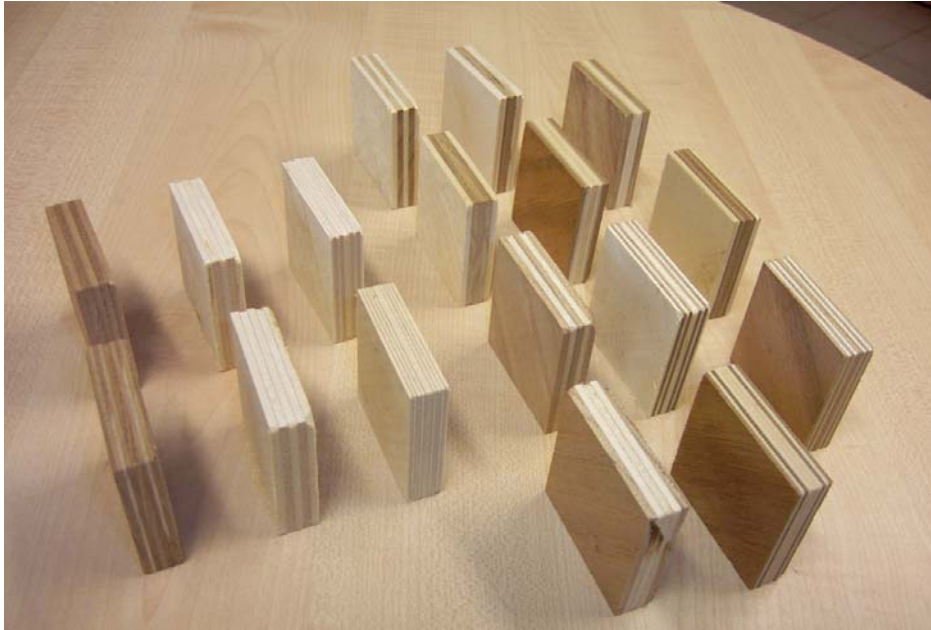


Figure 27. L'exemple de 17 contreplaqués purs et mélangés de châtaignier et de peuplier
 2.2.2.3.8 *stabilisation*

Les panneaux réalisés ont été maintenus dans une salle conditionnée de $65\% \pm 5\%$ humidité relative et $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ température pendant deux semaines au minimum afin de les stabiliser.

2.2.2.3.9 *Plan de prélèvement d'échantillons dans les panneaux*

Les panneaux de 50x50 cm ont été d'abord équarris, puis l'échantillonnage a été réalisé à l'aide d'une scie circulaire. Afin d'avoir une moyenne des propriétés, représentative d'un panneau, pour chaque essai, en fonction du nombre d'éprouvettes, nous avons choisi les échantillons en différents endroits dans le panneau (proche de centre, haut, bas, gauche ou droit) Les échantillons de chaque panneau ont été numérotés et maintenus dans une salle conditionnée pour une période de 12 semaines afin d'éliminer un effet protecteur du dégagement de formaldéhyde en début de stockage.

2.2.2.3.10 *Direction du fil des échantillons de durabilité*

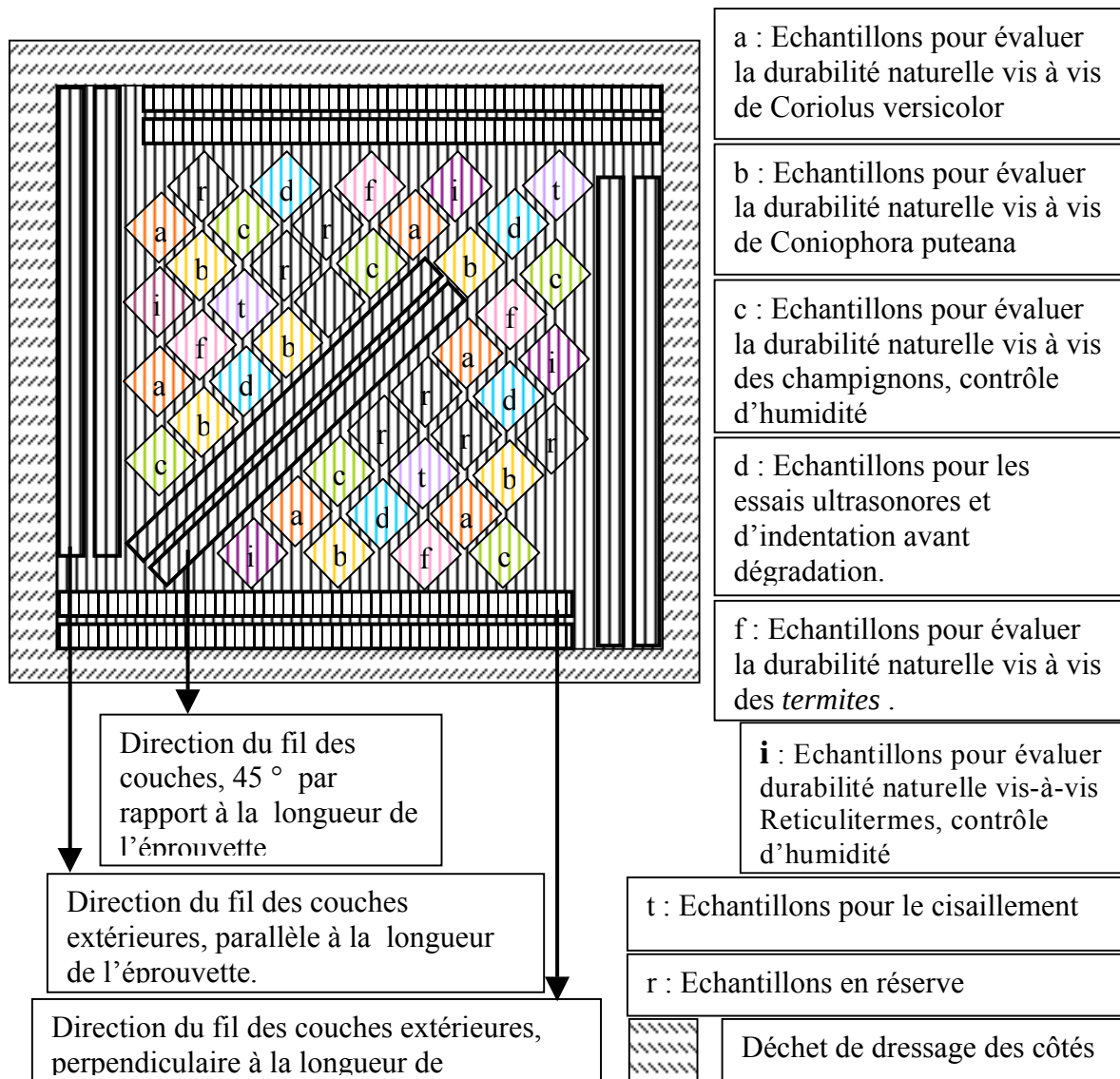


Figure 28. Prélèvement des échantillons de contreplaqué pour différents essais. La préparation des échantillons s'est faite afin que lors des essais mécaniques de cisaillement, la direction du fil du bois n'influe pas sur les résultats obtenus. Pour cela, ils ont été découpés de façon à ce que la direction du fil du bois soit toujours de 45°, quel que soit le pli, par rapport aux efforts exercés au cours de l'essai (figure 29). Cette coupe d'échantillons n'a, a priori pas d'influence sur la durabilité naturelle des échantillons. Les dimensions des échantillons sont de 50mm × 50mm x épaisseur du panneau.

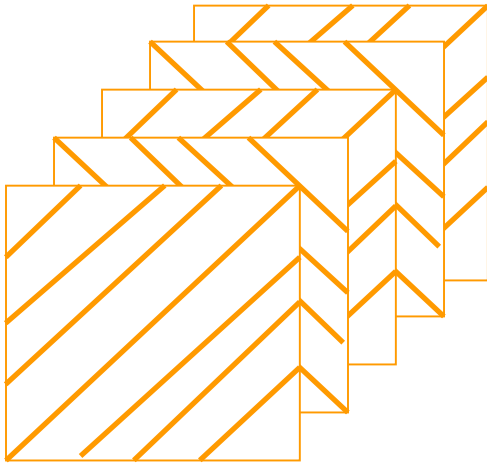


Figure 29. Positionnement à 45° du fil de bois pour tous les placages successifs de l'échantillon

2.2.2.1.11 Climatisation

Les échantillons de 50 x 50mm ont été maintenus dans la salle conditionnée de 65%, 20°C pendant 4 semaines afin d'éliminer encore un éventuel effet temporaire de dégagement de formaldéhyde lors de la coupe.

2.3 MÉTHODES

2.3.1 Durabilité naturelle du bois massif vis-à-vis des champignons lignivores

Ces essais ont été exécutés selon les protocoles décrits dans les normes :

Norme NF-EN 350-1: Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois. Durabilité naturelle du bois massif ; partie 1 : Guide des principes d'essais et de classification de la durabilité naturelle du bois.

Document CEN/TC38/WG 23 N34: Durability of wood-based products – Test methods for determining the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi - Part 1- Basidiomycetes.

2.3.1.1 Généralités

Cette norme (NF-EN 350-1) est utilisée pour tester la durabilité naturelle de bois massif non traité. Elle décrit une méthode qui permet de vérifier leur résistance vis-à-vis des champignons basidiomycètes lignivores pendant 16 semaines de mise en présence. Les éprouvettes de bois sont exposées à l'attaque de champignons basidiomycètes mis en culture pure sur un milieu gélosé. La dégradation des échantillons est évaluée par le pourcentage de perte de masse de l'éprouvette testée.

2.3.1.2 Champignons d'essai

Les essais ont été réalisés au laboratoire de préservation du CIRAD à Montpellier. Nous avons utilisé deux souches de champignon préconisées par la norme.

Coniophora puteana (Schumacher ex Fries) Karsten, Synonyme : *Coniophora cerebella* (persoon Duby), Souche : BAM Ebw.15 ; Activité : Champignon provoquant une pourriture cubique sur bois feuillus et résineux (voir 1.3.3.2.1).

Coriolus versicolor (Linnaeus) Quélet, Synonyme : *Polyporus versicolor* Linnaeus ex Fries ou *Trametes versicolor* (Linnaeus ex Fries), Souche: CTB 863A ; Activité : Il est responsable de la pourriture fibreuse chez les feuillus. Il est universellement utilisé comme espèce de référence en raison de son activité lignivore et de l'importance de son aire géographique (voir 1.3.3.2.2).

2.3.1.3 Les étapes constitutives de l'essai

Stabiliser les éprouvettes numérotées à 12% d'humidité dans une pièce conditionnée (20°C et 65% d'humidité relative) jusqu'à masse constante.

Peser les éprouvettes stabilisées afin d'obtenir la masse initiale avant essai (M_{12}).

Mettre en sachets hermétiques les éprouvettes et faire effectuer une irradiation ionisante des éprouvettes par une société spécialisée de façon à éliminer tout germe éventuellement présent.

Préparer le milieu de culture : peser 20 ± 0.5 g d'agar-agar + 40 ± 0.5 g de malt en poudre pour 1 litre d'eau distillée, agiter le mélange avec une baguette, placer le ballon contenant le mélange eau-agar-malt dans un autoclave (P=2,5 bars, T=139°C, V=65 l) pendant 20 minutes (temps nécessaire à une dissolution complète), mettre 60 ml de milieu de culture dans chaque flacon d'essai à l'aide d'une pompe péristaltique, fermer le flacon avec un bouchon muni d'un tampon en coton permettant les échanges gazeux, placer les flacons pendant 20 minutes dans l'autoclave puis les laisser refroidir couchés à plat.

Inoculer le milieu obtenu par des fragments de culture de champignon. Le délai entre cette étape et la préparation du milieu de culture ne doit pas dépasser 7 jours. Dans un souci de toujours opérer en milieu stérile et ainsi éviter toute contamination, toute cette étape s'effectue sous une hotte à flux laminaire horizontal ; les manipulations s'effectuant à l'aide d'une tige à anse de platine sans cesse passée sous la flamme d'un bec Bunsen à sa sortie de l'alcool.

Entreposer les flacons dans une pièce conditionnée (23°C et 85% d'humidité relative) jusqu'à ce que le mycélium inoculé recouvre entièrement la surface du milieu de culture (environ 15 jours).

Exposer les éprouvettes de bois aux champignons cultivés, dans un délai ne dépassant pas 4 semaines après l'inoculation du milieu : toujours sous la hotte, placer 2 éprouvettes par bocal en les déposant à l'aide de pinces saines sur des supports métalliques préalablement stérilisés à l'autoclave.

Stocker les flacons contenant les éprouvettes dans la pièce conditionnée au terme de 16 semaines d'exposition.

Retirer les éprouvettes des flacons et les débarrasser soigneusement du mycélium adhérent à l'aide d'une brosse à dents.

Peser les éprouvettes ; il s'agit de la masse humide en fin d'essai (M_f).

Sécher les éprouvettes dans une étuve ($103 \pm 2^\circ\text{C}$, 48 h) jusqu'à masse constante.

Peser les éprouvettes anhydres il s'agit de la masse finale anhydre en fin d'essai (M_a).

Calculer l'humidité des éprouvettes en % en fin d'essai selon la formule suivante :

$$H_f = \frac{(M_f - M_a)}{M_a} \times 100$$

Calculer la perte de masse **X** en %, selon la formule suivante :

$$X = \frac{(M_i - M_a)}{M_i} \times 100$$

M_a est la masse anhydre réellement mesurée sur l'échantillon après attaque de champignon.

M_i est la masse anhydre supposée de cet échantillon avant attaque, elle est estimée par la formule suivante : $M_i = KM_{12}$

où : M_{12} est la masse de l'éprouvette réellement mesurée dans l'état d'équilibre (supposé correspondre à une humidité du bois de 12%) où elle était au moment où elle a été conditionnée.

K est le coefficient calculé à partir des éprouvettes de contrôle humidité pesées successivement dans le même état d'équilibre (M_{12}) puis à l'état anhydre après passage en étuve à 103°C (M_i).

Il peut arriver que la masse finale anhydre après essai (M_a) soit supérieure à la masse anhydre initiale M_i estimée par KM_{12} (humidité réelle de l'éprouvette différente de l'humidité moyenne des éprouvettes servant au calcul de K). Cela ne se produit que pour des pertes de masse X très faibles, inférieures à l'incertitude sur l'humidité. Dans ce cas, la perte de masse est considérée comme nulle. La norme admet une telle reprise de poids jusqu'à 1%, valeur correspondant à l'incertitude de mesure (selon la norme), au-delà de laquelle on rejette l'éprouvette.

2.3.1.4 Validité des essais

Pour que l'essai soit validé pour *Coriolus versicolor*, ce champignon doit engendrer une perte de masse minimum de 20 % sur les éprouvettes témoins de virulence de Hêtre, après 16 semaines d'incubation.

Et pour que l'essai soit validé pour *Coniophora puteana*, ce champignon doit engendrer une perte de masse minimum de 20 % sur les éprouvettes témoins de virulence d'aubier de pin sylvestre après 16 semaines d'incubation.

2.3.1.5 Evaluation des résultats

La perte de masse des échantillons d'essais est exprimée en perte de masse dite *absolue* en % (X) ou en perte de masse *relative* (Xr) rapportée à la perte de masse des témoins de virulence.

X = pertes de masse absolues des échantillons d'essai

$$X_r = \frac{\text{Pertes de masse absolues des échantillons d'essai}}{\text{Pertes de masse absolues des échantillons de référence}}$$

2.3.1.6 Classes de durabilité

La classification repose sur les résultats des espèces de champignons causant la plus grande perte de masse moyenne (ou médiane) des éprouvettes, selon le tableau ci-dessous.

Classes de durabilité	Description	Perte de masse absolue x (en %)	Perte de masse relative
-----------------------	-------------	---------------------------------	-------------------------

			(Xr)
5	Non durable	$X > 30$	$X_r > 0.90$
4	Faiblement Durable	$15 < X \leq 30$	$0.60 < X_r \leq 0.90$
3	Moyennement Durable	$10 < X \leq 15$	$0.30 < X_r \leq 0.60$
2	Durable	$5 < X \leq 10$	$0.15 < X_r \leq 0.30$
1	Très durable	$X \leq 5$	$X_r \leq 0.15$

Tableau 5. La classification de durabilité selon la perte de masse.

2.3.2 Durabilité naturelle de contreplaqué vis-à-vis des champignons basidiomycètes lignivores

Cet essai a été exécuté selon des protocoles décrits dans la norme :

Norme XP ENV 12038 : Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois, Panneaux à base de bois, Méthode d'essais pour déterminer la résistance aux champignons basidiomycètes lignivores.

2.3.2.1 Généralités

Cette norme est utilisée pour tester la durabilité naturelle des panneaux à base de bois. Elle décrit une méthode qui permet de vérifier leur résistance vis-à-vis des champignons basidiomycètes lignivores pendant 16 semaines d'incubation.

2.3.2.2 Domaine d'application

La présente méthode est applicable aux panneaux à base de bois rigides et non revêtus. Elle est applicable à la détermination de la résistance à la dégradation des panneaux à base de bois :

- Fabriqués à partir de matériaux à l'état naturel
- Fabriqués à partir de matériaux traités avec des produits de préservation avant leur fabrication
- Traités avec un produit de préservation introduit en cours de la fabrication, par exemple un additif à la colle
- Traité avec un produit de préservation après la fabrication.

2.3.2.3 Champignons d'essai

Nous avons utilisé, les mêmes champignons que pour le bois massif : *Coniophora puteana* préconisé par la norme pour tous les types de panneaux à base de bois (obligatoire) et *Coriolus versicolor* préconisé par la norme pour les panneaux fabriqués à partir de feuillus uniquement ou à partir d'un mélange de résineux et de feuillus.

2.3.2.4 Les étapes constitutives de l'essai

Le déroulement de cet essai et la préparation de milieu de culture suivent exactement les mêmes procédures que celles décrites pour évaluer la durabilité naturelle du bois massif vis-à-vis des champignons lignivores. Les différences sont les suivantes :

-Préconditionnement pour élimination de l'effet protecteur (temporaire) de dégagement de formol des panneaux fraîchement découpé :

Pour éviter de considérer un panneau comme résistant aux attaques fongique à cause de l'arrêt du développement des mycéliums de champignon sur l'éprouvette de panneau dû à l'effet toxique de dégagement temporaire de formol d'un panneau fraîchement coupé, toutes les éprouvettes d'essais et de référence on été placées dans de bonnes conditions d'aération pendant 12 semaines. Les éprouvettes on été retournées à intervalles réguliers de sorte que les éprouvettes restent approximativement trois semaines sur chaque chant. Le preconditionnement a été effectué avant la détermination de la masse initiale des éprouvettes pour éviter les modifications de la masse dues au preconditionnement.



Figure 30. Les bocaux contenant les éprouvettes de contreplaqué

-Eprouvettes de témoin de dimensions :

En plus de la détermination de perte de masse des témoins de virulence (voir 2.3.1, validité d'essai), cette norme préconise d'évaluer la perte de masse d'éprouvettes témoin de dimension (la même dimension que les panneaux mais en bois massif, il s'agit de 50mm x 50mm x épaisseur de panneau).

Six éprouvettes en hêtre (vis-à-vis de *Coriolus versicolor*) et six éprouvettes en aubier de pin sylvestre (vis-à-vis de *Coniophora puteana*) ont été utilisées dans cette étude.

-Evaluation de la perte de masse des éprouvettes de référence (témoin de virulence et témoin de dimension) en plus des exigences normatives.

Selon la norme, on évalue la virulence du champignon agent de pourriture fibreuse en utilisant le hêtre et on évalue la virulence du champignon agent de pourriture cubique en utilisant l'aubier de pin sylvestre. Au point de vue de la fabrication et de l'évaluation de la durabilité des panneaux en mélange d'essences, il nous a paru intéressant d'évaluer la virulence de chaque champignon d'essai sur les deux types de référence (hêtre et aubier de pin sylvestre). Le tableau suivant présente le type de champignon et le type d'éprouvette de référence.

C. versicolor

Dimension
Nombre
d'éprouvettes

C. puteana

Dimension
Nombre
D'éprouvettes

Témoin virulence

Aubier de Pin
sylvestre*
50mmx25mm x15mm*

6
Aubier de Pin
sylvestre
50mmx25mm x15mm

6

Témoin virulence

Hêtre
50mmx25mm x15mm

6

Hêtre*
50mmx25mm x15mm*

6

Témoin dimension

Aubier de Pin
sylvestre*

50mmx50mmx épaisseur du
panneau*

6

Aubier de Pin
sylvestre

50mmx50mmx épaisseur du
panneau

6

Témoin dimension

Hêtre

50mmx50mmx épaisseur du
panneau

6

Hêtre*

50mmx50mmx épaisseur du
panneau*

6

Tableau 6. Les références de bois massif pour évaluer la durabilité des panneaux.

* : les évaluations de perte de masse réalisées en plus de l'exigence normative

2.3.2.5 Validité de l'essai

Les résultats doivent être retenus comme valides si les éprouvettes témoins de virulence, de hêtre et d'aubier de pin sylvestre, ont perdu plus de 20 % de masse en raison de l'action de *Coriolus versicolor* et *Coniophora puteana* respectivement.

2.3.2.6 Evaluation des résultats

La perte de masse des échantillons d'essais est exprimée en perte de masse dite *absolue* en % (**X**) ou en perte de masse *relative* (**Xr**) rapportée à la perte de masse des témoins de virulence.

X = pertes de masse absolues des échantillons d'essai

$$Xr = \frac{\text{Pertes de masse absolues des échantillons d'essai}}{\text{Pertes de masse absolues des échantillons de référence}}$$

Et en plus il y a un autre critère d'évaluation : « l'Indice de Sensibilité à la Dégradation (ISD) » On calcule l'ISD de chaque éprouvette de la manière suivante :

$$ISD = \frac{T}{S} \times 100$$

Où :

T = est le pourcentage de perte de masse d'une éprouvette d'essai

S = est le pourcentage de perte de masse moyen de la série d'éprouvettes témoins de dimension (en principe 6 éprouvettes).

On calcule finalement la valeur moyenne d'ISD pour chaque champignon d'essai.

Comme pour la perte de masse absolue et relative, les panneaux ayant des valeurs d'ISD plus basses sont plus résistants à l'attaque fongique. D'ailleurs les valeurs de pertes de masse des éprouvettes témoins de dimension sont très intéressantes pour comparer la perte de masse entre le bois massif et les contreplaqués car la taille des éprouvettes est la même.

2.3.2.7 Classes de durabilité

Le panneau en essai doit être considéré comme complètement résistant à l'attaque des basidiomycètes lignivores si :

- La perte de masse moyenne des éprouvettes d'essai est inférieure à 3%.
- Une éprouvette d'essai au maximum a subi une perte de masse supérieure à 3% mais inférieure à 5%.

Si la perte de masse moyenne est supérieure à 3%, la norme préconise de calculer l'indice de sensibilité à la dégradation (ISD) expliqué ci-dessus, mais elle ne présente pas le classement de durabilité des panneaux en appliquant cet indice. Dans cette étude nous présentons les classes de durabilité des panneaux selon le tableau 5 préconisée par la norme EN 350-1.

2.3.3 Durabilité naturelle du bois massif et du contreplaqué vis-à-vis des termites

2.3.3.1 Généralité

L'absence d'une norme spécialisée pour évaluer la résistance des panneaux de composites à base de bois, nous a conduit à adapter la Norme **NF EN 117** (Détermination du seuil d'efficacité contre *Reticulitermes santonensis* de Feytaud) pour cette évaluation.

Cette norme est utilisée en général pour tester la durabilité naturelle de bois massif traité par les produits de préservation. Elle décrit une méthode qui permet de vérifier leur résistance vis-à-vis de termites souterrains, *Reticulitermes santonensis* de Feytaud, pendant 8 semaines d'exposition.

2.3.3.2 Eprouvettes de référence

En principe elles sont en aubier de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* Linnaeus). Mais les essais complémentaires peuvent être faits avec d'autres espèces, nous avons choisi deux espèces : le hêtre et le peuplier (bois massif, contreplaqué en 5 plis et contreplaqué en 9 plis), trois éprouvettes par espèce en dimension 50mm x 25 x 5 mm, en tant qu'essais complémentaires pour évaluer l'effet de la colle et l'épaisseur des plis (figure 20).

2.3.3.3 Les étapes constitutives de l'essai

-Préparation de toutes les éprouvettes de référence (bois massif) et d'essai (contreplaqué).

- Mise en place des éprouvettes de bois massif dans une salle de conditionnement réglée à l'atmosphère de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $65\% \pm 5\%$ d'humidité relative jusqu'à la masse constante.
- Mise en place des éprouvettes de contreplaqué dans la salle mentionnée ci-dessus, pendant 12 semaines, trois semaines sur chaque chant, pour éviter de considérer un panneau résistant aux termites à cause du dégagement temporaire de formol (colle MUF) d'un panneau fraîchement coupé empêchant l'activité des termites sur l'éprouvette de panneau.
- Détermination de la masse anhydre des éprouvettes d'essai et de référence avant attaque et des éprouvettes de contrôles d'humidité (voir 2.3.1.3). Cette mesure n'est pas demandée par la norme mais il nous a paru intéressant de déterminer le taux d'humidité et la perte de masse des éprouvettes d'essai et de référence et de les comparer.
- Préparation du dispositif d'essai en verre ou en matière plastique transparente et inerte selon la figure 28.

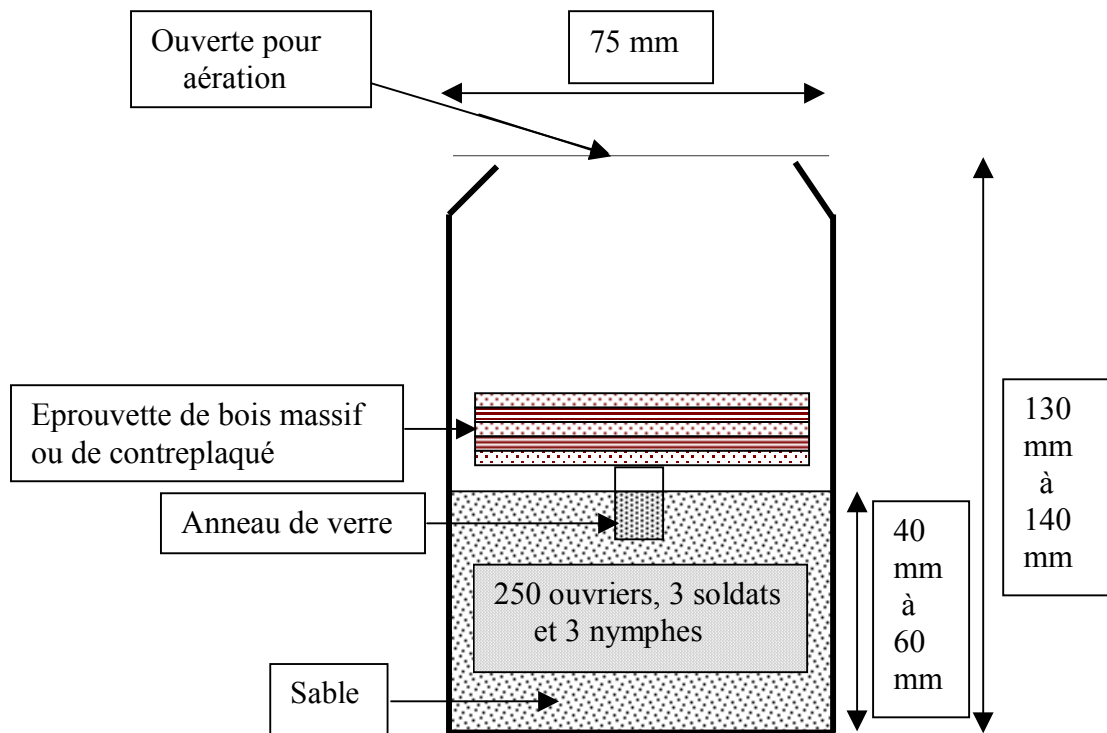


Figure 31. Schéma du dispositif termite conformément à la norme NF EN 117

- Prélèvement et sélection des termites (250 ouvriers, des soldats et des nymphes selon la proportion trouvée dans la récolte, 1% à 5%) en éliminant les termites en période de mue de même que ceux qui apparaîtraient blessés ou demeureraient immobiles.
- Stockage des récipients d'essai dans la chambre $26^{\circ}\text{--}28^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et 75% humidité pendant 2 à 4 jours afin d'observer une circulation animée, notamment, sur le fond du récipient et à la partie inférieure des parois latérales. Elimination des récipients d'essai dans lesquels l'installation des termites ne serait pas jugée satisfaisante.

-Placement avec précaution de l'éprouvette de référence sur l'anneau de verre, la face reposant sur celui-ci étant l'une des petites faces longitudinales, et une grande face longitudinale se trouvant accolée à la paroi du récipient (figure 32).

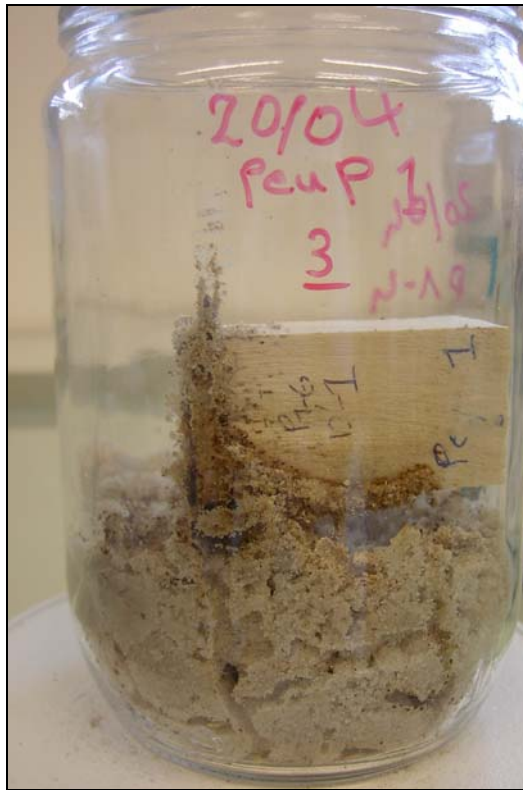


Figure 32. Dispositif termites contenant l'éprouvette de référence.

-Placement avec précaution de l'éprouvette d'essai (contreplaqué de 50 mm x 50 mm x épaisseur) sur l'anneau de verre, deux des trois éprouvettes horizontales et l'autre perpendiculaire, toujours l'éprouvette accolée à la paroi du récipient (figure 30 A).

-Stockage des récipients dans l'enceinte d'essai (26° - $28^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et 75% humidité) pendant 8 semaines.

-Observation quotidienne de chaque colonie, cette observation porte notamment, sur les points suivants :

présence, localisation et activité des termites (forage de galeries dans le substrat au niveau des parois observables, construction de cheminées, circulation des insectes).

approche et enrobage de l'éprouvette, en notant le cas échéant, la date de premier contact, ainsi que, par la suite, l'activité apparente des insectes au niveau de l'éprouvette.

- Réhumidification périodique du substrat qui se déduit de la modification de couleur du sable. Il y a intérêt à entretenir l'humidité par des apports progressifs de petites quantités

d'eau, à l'aide d'une pipette plutôt que par un unique apport brutal risquant de causer des dommages graves à colonie.

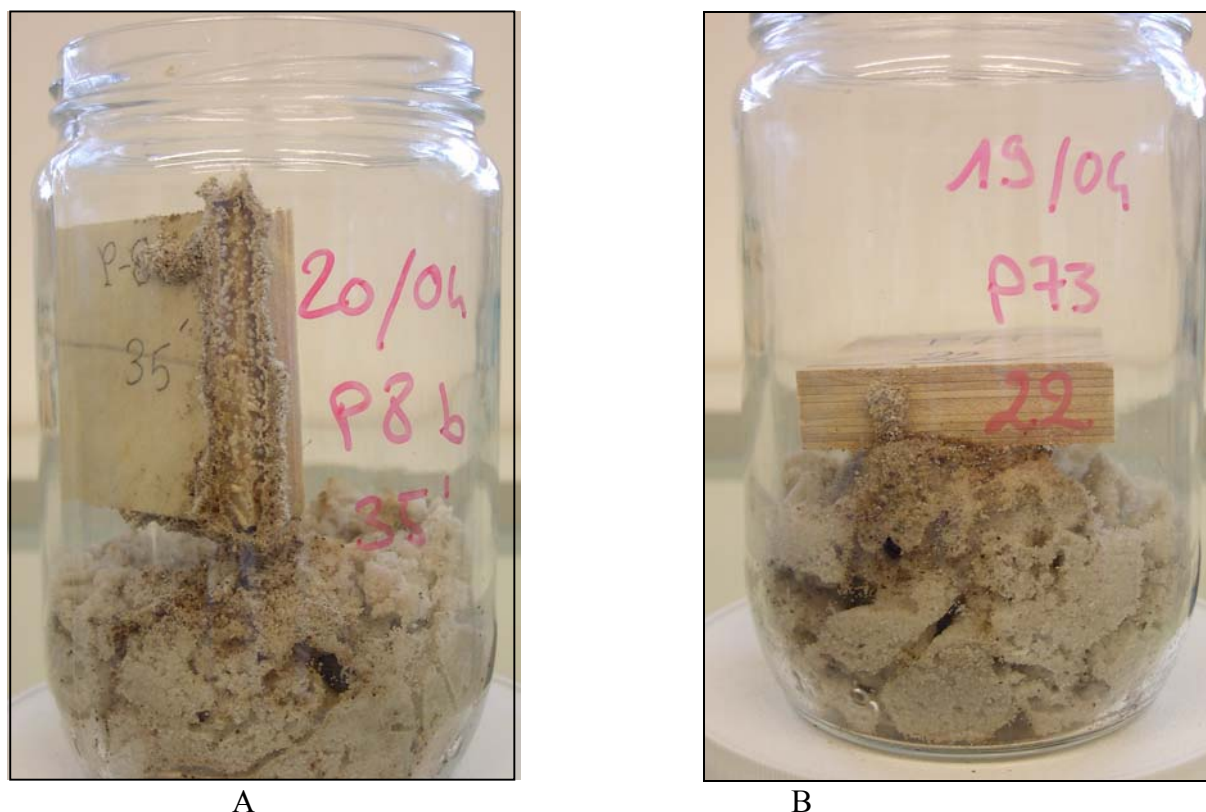


Figure 33. Positions des éprouvettes de contreplaqué (verticale A et horizontale B) dans l'enceinte d'essai.

- A la fin de l'essai, prélèvement des éprouvettes dans les récipients d'essai en les débarrassant soigneusement des particules de substrat et autres substances adhérant à leur surface ; recensement aussi exact que possible de l'effectif de termites encore vivants dans chaque récipient d'essai afin de déterminer le taux de survie des ouvriers, des soldats et des nymphes.
- Pesée des éprouvettes des récipients d'essai et de référence, dès le nettoyage et aussi après un séchage à l'étuve ($103 \pm 2^\circ\text{C}$) jusqu'à la masse constante, 2 à 3 jours, pour déterminer leur taux d'humidité et leur perte de masse.

2.3.3.4 Evaluation du degré d'attaque des termites

On effectue une cotation visuelle afin d'évaluer le degré d'attaque. La cotation visuelle utilisée est celle de l'EN117 selon le barème suivant :

Cotation	Caractéristiques de l'attaque	
0	aucune attaque	-
1	tentative d'attaque	Nettoyage ou effleurage superficiel de profondeur échappant à toute mesure, ou

		Attaque jusqu'à 0,5 mm de profondeur si elle est restreinte à 3 zones de moins de 3 mm de diamètre chacune.
2	attaque légère	Attaque superficielle (< 1 mm) et limitée en étendue à au plus 1/10 de la surface développée de l'éprouvette, ou
		forage unique de profondeur inférieure à 3 mm.
3	attaque moyenne	Attaque superficielle (< 1 mm) de plus de 1/10 de la surface développée de l'éprouvette, ou
		Erosion (de 1 à 3 mm) sur une étendue ne dépassant pas 1/10 de la surface développée de l'éprouvette, ou
		Forages ponctuels et ne s'étendant pas en cavernes et de profondeur supérieure à 3 mm.
4	attaque forte	Erosion sur une étendue supérieure à 1/10 de la surface développée de l'éprouvette, ou
		Attaque pénétrante supérieure à 3 mm s'étendant en caverne dans la masse de l'éprouvette et pouvant aller jusqu'à un stade de destruction très avancé.

Tableau 6: Tableau des citations caractérisant l'attaque des termites selon NF EN 117.

2.3.3.5 Validité de l'essai

L'essai est valable si au moins 2 des 3 éprouvettes témoin (non traitées) présentent à l'examen visuel la note 4 et si les colonies correspondantes comprennent au moins 50% de survivants.

Un essai supplémentaire vis-à-vis des termites selon NF EN 118

Nous avons fait un essai supplémentaire selon EN 118 pour comparer les résultats de durabilité du cyprès (aubier et duramen) avec les résultats obtenus de l'essai EN 117.

La dimension d'éprouvette pour cet essai a été 100mm x 40mm x 10mm (figure 20). Une fois les débits réalisés, les étapes constitutives de l'essai sont chronologiquement les suivantes.

- stabiliser les éprouvettes à 12% d'humidité dans une pièce conditionnée (20°C et 65% d'humidité relative) jusqu'à masse constante.
- fixer au centre de chaque éprouvette, un tube en verre ouvert aux 2 extrémités à l'aide de colle à base de peau de lapin, un adhésif non attaquant par les termites et non toxique.
- verser dans le tube du sable de Fontainebleau, préalablement humidifié dans les proportions 1 volume d'eau et 4 volumes de sable ; la quantité de sable introduite ne doit pas être compactée et doit occuper au moins les 2/3 de la hauteur du tube.
- à l'aide d'une tige métallique de 3 mm de diamètre, effectuer 3 trous ou galeries artificielles dans le sable jusqu'à atteindre l'éprouvette.
- glisser dans les trous quelques fragments de bois provenant du milieu de récolte des insectes afin de favoriser l'établissement de la colonie de termites.
- introduire dans le tube un groupe de 250 termites (250 ouvriers + 3 soldats + 3 nymphes) comptés à l'aide d'un aspirateur, de façon à reproduire une « micro termitière ».
- fermer l'extrémité supérieure du tube à l'aide d'une rondelle en mousse.

- placer les montagnes d'essai dans une pièce conditionnée (27°C, 80% d'humidité relative) pendant 8 semaines.
- durant toute cette période, veiller à maintenir l'humidité du sable dans lequel les colonies sont organisées par un apport régulier d'eau en petite quantité pour éviter tout risque d'inondation synonyme de noyade des termites.
- au terme des 8 semaines, desceller les tubes en verre et compter pour chacun d'eux les termites vivants qui s'y trouvent.
- déterminer ensuite le taux de survie des ouvriers et noter la présence éventuelle de soldats et/ou de nymphes vivants.
- nettoyer soigneusement la surface circulaire exposée sous le tube.
- déterminer, par un examen visuel, la profondeur des attaques éventuellement subies et exprimer celles-ci en utilisant le système de cotation donné dans le tableau.

Classes	Examen visuel
0	Aucune attaque
1	Nettoyage ou effleurage superficiel de profondeur échappant à toute mesure
2	Attaque superficielle (< 1mm) et limitée en étendue à au plus ¼ de la surface exposée, ou forage unique de profondeur inférieure à 3 mm à l'exclusion de toute autre trace d'attaque
3	Attaque superficielle (< 1mm) et limitée en étendue à au plus ¼ de la surface exposée, ou érosion (de 1 à 3 mm) sur une surface inférieure ou égale au ¼, ou forages ponctuels supérieurs à 3mm mais ne s'étendant pas en caverne et non traversants
4	Erosion sur plus du ¼ de la surface de la surface exposée, ou attaque pénétrante supérieure à 3mm s'étendant en cavernes dans la masse de l'éprouvette, ou ne s'étendant pas en cavernes mais traversante

Tableau 7. Classes d'examen visuel du bois vis-à-vis des termites selon NF EN 118.

Les classes d'examen visuel sont converties en durabilité dans le tableau 8 selon la norme NF EN 118. La norme Européenne ne présente pas une conversion en durabilité à base d'examen visuel pour NF EN 117.

Classe de durabilité	Description	Cotation moyenne
D	Durable	0 - 1
M	Moyennement durable	2
S	Sensible	3 - 4

Tableau 8. Classe de durabilité vis-à-vis des termites selon NF EN 118.

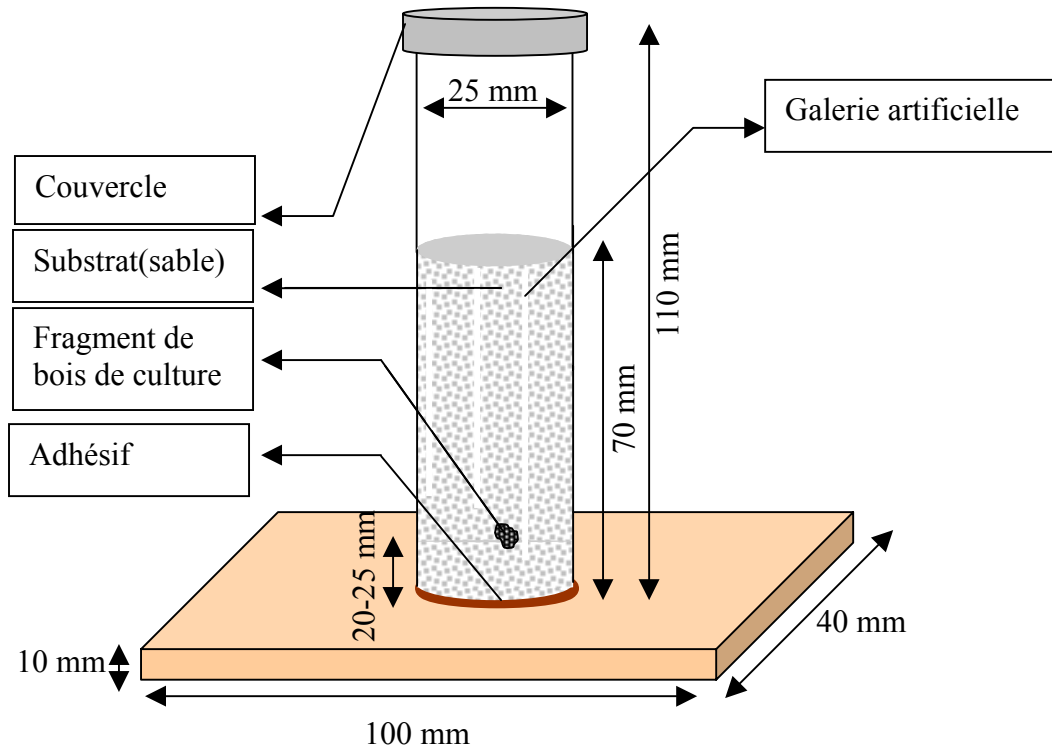


Figure 34. Schéma du dispositif termite conformément à NF EN 118.

2.3.4 Mesure de la densité

2.3.4.1 Mesure de la densité du bois massif

La densité à 12 % a été mesurée, sur chaque éprouvette de module d'élasticité, à l'aide d'une balance de pesée et d'un pied à coulisse servant à mesurer les deux cotes de hauteur et de largeur nominalement 20 mm x 20 mm en trois points de sa longueur (360mm).

2.3.4.2 Mesure de la densité du contreplaqué

De la même façon que le bois massif, la densité à 12%, sur les éprouvettes en dimension 360mm x 20mm x épaisseur de panneau mm, a été mesurée à l'aide d'une balance de pesée et d'un pied à coulisse servant à mesurer les cotes (hauteur et largeur) en 3 points de sa longueur.

2.3.5 Mesure du module d'élasticité

2.3.5.1 Mesure de module d'élasticité longitudinal de bois massif

Cette mesure a été faite sur les éprouvettes de 360mm x 20mm x 20mm équilibrées à 12 % d'humidité ($65\% \pm 5\%$ humidité relative et $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ température), en respectant une orientation la plus parfaite possible dans le plan RT. La méthode utilisée repose sur le principe de l'analyse du spectre des vibrations naturelles de flexion. Elle permet de déterminer les fréquences propres d'une éprouvette à partir de la réponse à une excitation impulsionnelle appliquée à l'une de ses extrémités (figure 35).

On peut décrire cette mesure, mise au point par Bordonné (1989), comme suit :

- mesure de la masse de l'éprouvette à l'aide d'une balance interfacée
- mesure des dimensions et de la masse de chaque éprouvette (une mesure pour la direction L au réglet et trois mesures pour les directions R et T à l'aide d'un pied à coulisse digital)
- positionnement sur les supports élastiques

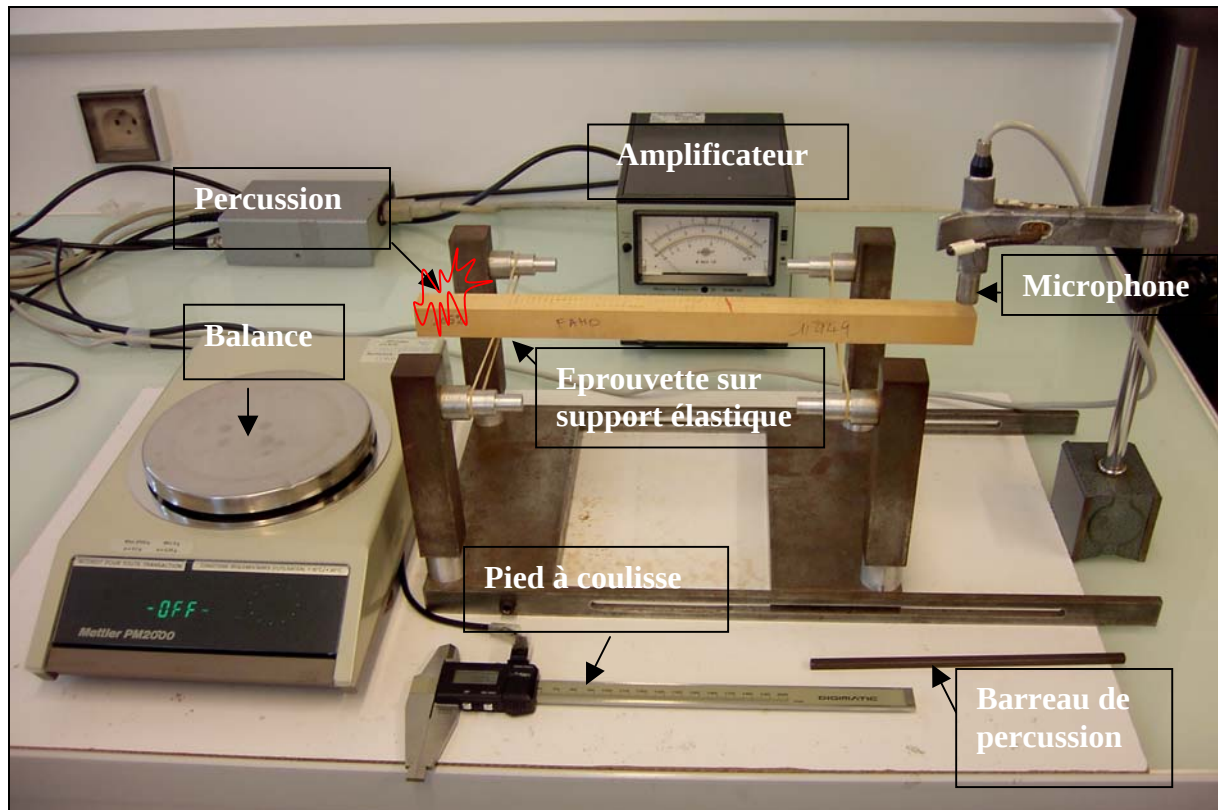


Figure 35. Le dispositif de mesure du module d'élasticité

- application d'une percussion à l'une des extrémités de façon à amorcer une vibration naturelle de flexion
- enregistrement de l'onde sonore à l'aide d'un microphone placé à l'autre extrémité de l'éprouvette
- décomposition du signal électrique enregistré (issu de la transformation de l'onde sonore par l'amplificateur) en fréquences par une procédure FFT (transformée de Fourier), puis sélection des premières fréquences propres (f_1 , f_2 , f_3 en Hz) à prendre en compte pour le calcul du module d'élasticité qui est déterminé en utilisant la procédure proposée par Bordonné.

Lorsque l'alignement des 3 points (figure 32) est mauvais ($r^2 < 0.95$), cela signifie que l'éprouvette présente des défauts et la valeur de « E » devient suspecte.

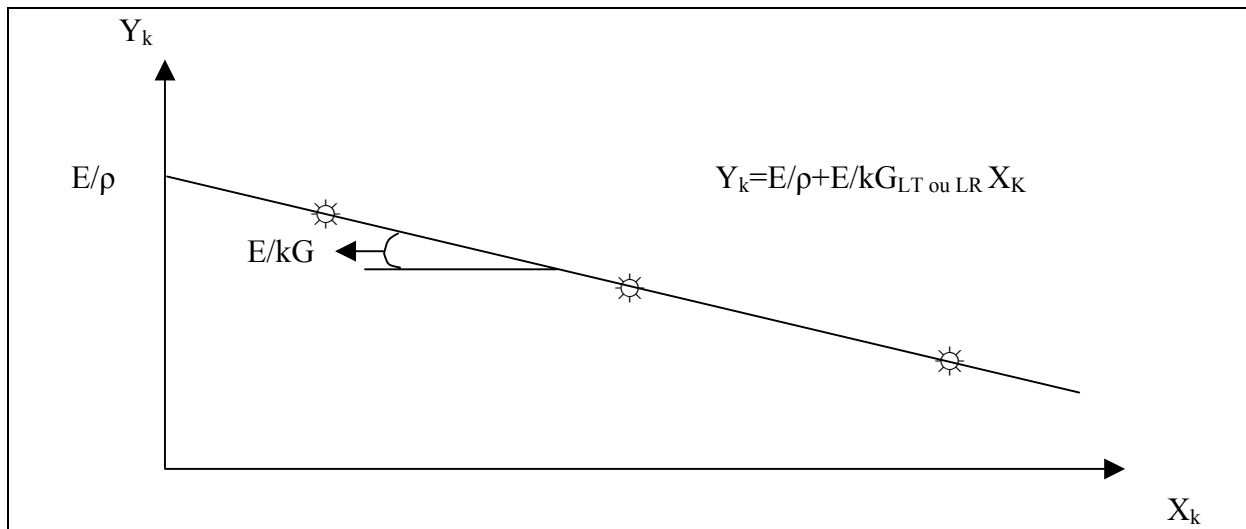


Figure 36. Relation entre modules apparents (rangs 1 à 3) et fréquences avec E = module d'élasticité longitudinal, ρ = densité et G = module de cisaillement $_{LT}$ ou $_{LR}$.

2.3.5.2 Mesure de module d'élasticité de contreplaqué

La taille de chaque éprouvette a été 360mm x 20mm x épaisseur du contreplaqué.

La mesure de module d'élasticité du contreplaqué a été faite en trois groupes d'orientations dans chaque panneau (figure 25) comme suit :

- Direction du fil de toutes les couches, 45° par rapport à la longueur de l'éprouvette.
- Direction du fil des couches extérieures, parallèle à la longueur de l'éprouvette.
- Direction du fil des couches extérieures, perpendiculaire à la longueur de l'éprouvette.

La méthode utilisée pour évaluer la rigidité de contreplaqué a été la même que pour le bois massif (ci-dessus).

2.3.6 Caractérisation ultrasonore

2.3.6.1 Généralités

La mesure ultrasonore fait partie d'un vaste domaine d'essais non destructifs (identification des propriétés physiques ou mécaniques d'un matériau ou identification des défauts d'une pièce ou d'une structure sans altérer ses aptitudes d'utilisation finale).

Les principaux avantages qu'elle présente sont les suivants :

-Les éprouvettes testées ne subissent aucun endommagement, il est possible de réutiliser les éprouvettes pour d'autres mesures expérimentales (ce qui diminue les biais dus à la variabilité inter éprouvettes lors d'études de corrélations entre propriétés).

-La méthode est facile à mettre en œuvre et rapide d'exécution

Il y a plusieurs méthodes normalisées pour évaluer les caractéristiques ultrasonores du bois (ASTM E494-89). Deux des méthodes les plus fréquemment utilisées dans le domaine du bois sont :

2.3.6.2 Méthode d'écho impulsionnelle

Cette méthode utilise un seul transducteur. Il sert à la fois d'émetteur et de récepteur, donc elle est basée sur les signaux réfléchis. Quand on n'a pas accès aux deux surfaces du bois (ou produit à base de bois), cette méthode est la seule utilisable (Kaerly V.C. 1985).

2.3.6.3 Méthode par transmission (la méthode utilisée dans cette étude)

Cette méthode utilise un couple de transducteurs piézo-électrique (normalement cristal de quartz), émetteur et récepteur, positionnés des deux cotés de la pièce du bois en inspection. La transmission des ondes ultrasonores dans l'air est très faible, donc les transducteurs doivent être bien couplés aux surfaces du bois. La propagation des ondes ultrasonores est affectée par plusieurs facteurs environnementaux et par les caractéristiques du bois. La vitesse des ondes ultrasonores augmente quand l'humidité du bois diminue, elle est très sensible à la direction du fil, la vitesse de propagation est presque trois fois plus rapide en direction longitudinale qu'en direction transversale (McDonald K.A.1978). La propagation en direction radiale est environ 50% plus rapide qu'en direction tangentielle.

Le changement de la vitesse de propagation ainsi que l'atténuation des ondes ultrasonores peuvent déterminer la présence/localisation de défauts, comme les nœuds, pourritures, fentes, etc.

La pourriture dans le bois diminue la vitesse et augmente l'atténuation des ondes ultrasonores (Beal. F.C. 1999). Bauer et al. (1991), ont montré que la valeur de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores longitudinales diminue rapidement à mesure que l'intensité de la dégradation augmente, de plus cette diminution est corrélée avec l'augmentation du paramètre « perte de masse ». Ils ont constaté que le type de pourriture affecte la vitesse de propagation, par exemple, pour le même niveau de dégradation, la décroissance de la vitesse des ondes ultrasonores face une pourriture brune et plus importante que pour la pourriture fibreuse en direction radiale (il s'agit de la direction transversale mesurée dans les contreplaqués avec les placages obtenus par déroulage).

2.3.6.3.1 Le principe de la méthode

Le principe de la méthode repose sur la mesure du temps de propagation d'une impulsion à travers un échantillon et sur l'observation de l'amplitude du signal reçu sur l'écran de l'oscilloscope.

La technique ultrasonore utilisée dans cette étude est celle de la transmission, l'échantillon est en contact direct avec les transducteurs. La chaîne de mesure est composée d'un générateur, d'un oscilloscope et de deux transducteurs (*Figure 37*).

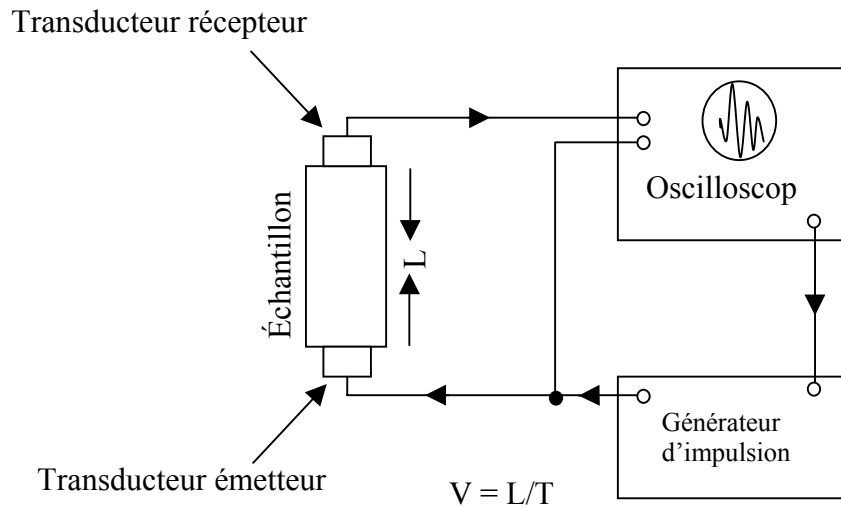


Figure 37. Schéma du montage expérimental de mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. V =vitesse de propagation, T = temps de vol et L = longueur de l'éprouvette.

La technique de mesure est la suivante : le générateur délivre des impulsions périodiques sous forme de créneaux d'une fréquence de 1 MHz. Le signal électrique est converti en onde élastiques par la céramique piézoélectrique du transducteur émetteur : les vibrations mécaniques sont transmises par l'émetteur à l'échantillon (Figure 38).

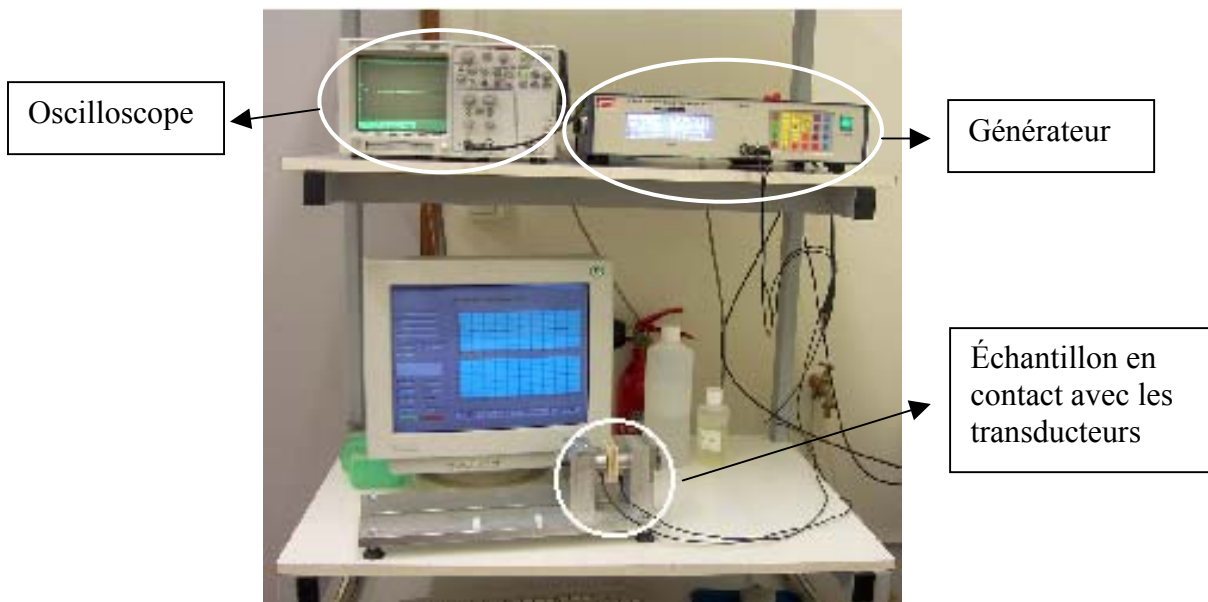


Figure 38. Dispositif de la mesure ultrasonore

Ainsi, les ondes élastiques se déplacent de quelques millimètres en une microseconde dans le matériau qui retarde le signal émis par le générateur.

Le signal retardé est récupéré par le transducteur récepteur. La mesure du retard, donné par la différence entre le signal émis et reçu sert à déterminer le temps de propagation de l'impulsion dans l'échantillon.

Sur l'écran de l'oscilloscope le point de référence choisi pour mesurer le décalage du signal reçu par rapport au signal émis est soit le maximum, soit le minimum, soit l'intersection avec l'horizontale. Nous avons opté pour le premier pic inférieur, soit le minimum. Le diamètre des transducteurs (émetteur et récepteur) était de 15 mm.

2.3.6.3.2 *Mesure sur le bois massif*

Cette mesure a été effectuée sur toutes les éprouvettes de durabilité après la dégradation causée par les champignons pendant 16 semaines, et les mesures enregistrées ont été comparées avec les éprouvettes saines (de même arbre et de même angle de cerne).

La vitesse de propagation des ondes ultrasonores a été mesurée en direction longitudinale (une mesure par éprouvette).

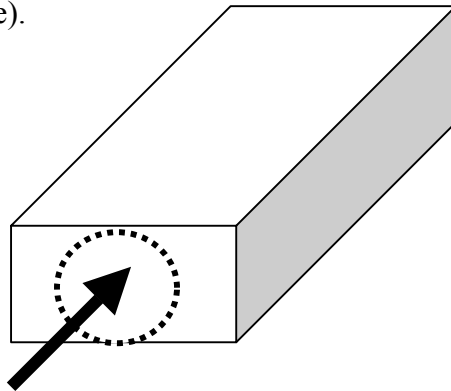


Figure 39. Mesure ultrasonore sur le bois massif

2.3.6.3.3 *Mesure des contreplaqués*

Nous avons fait 5 mesures transversales pour chaque éprouvette de 50mm x 50 mm x épaisseur de contreplaqué après dégradation par les champignons (figure 40). La vitesse après dégradation a été comparée avec la vitesse mesurée sur des éprouvettes témoins (figure 28 a, b).

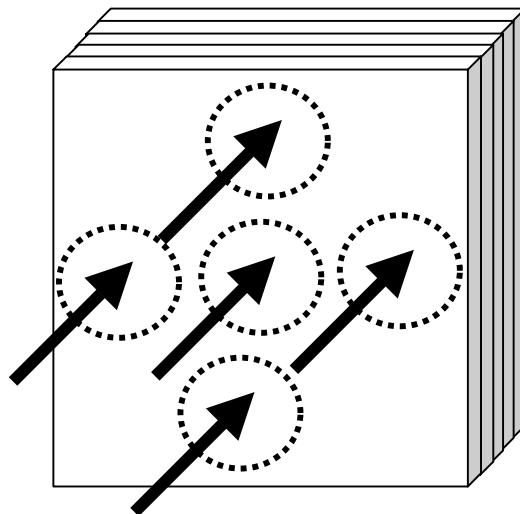


Figure 40. Cinq positions transversales de mesure ultrasonore sur une éprouvette de contreplaqué.

2.3.7 Essai d'indentation

2.3.7.1 Les mesures de dureté sur bois massif

L'essai d'indentation est d'abord utilisé pour mesurer la dureté définie comme la résistance d'un matériau à la pénétration permanente par un autre matériau plus dur. La mesure est faite à partir de la dimension de l'empreinte laissée (surface ou profondeur) après que la force d'essai ait cessé. La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux. Cette méthode ne permet pas d'apprécier le comportement d'un matériel multicouche non homogène. Elle est efficace pour déterminer la dureté chez le bois massif.

Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau dont certaines font l'objet de norme précise.

- La dureté Brinell
- La dureté Vickers
- La dureté Knoop
- La dureté Rockwell B et C
- La dureté Monnin
- La dureté Janka

Le type d'indenteur est différent selon les normes : un bille pour *Brinell*, *Janka* et *Rockwell B*, un cône de diamant de 120° pour *Rockwell C*, une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136° pour *Vickers*, une pyramide à base rectangulaire avec un angle de 172° entre deux faces opposées et 130° pour les autres faces pour *Knoop* et un cylindre pour *Monnin*. Le critère principal est la surface ou la profondeur de l'empreinte laissée.

Les méthodes plus utilisées dans le domaine du bois sont : *Brinell*, *Monnin* et *Janka*.

La dureté **Brinell** est mesurée par le poinçonnement d'une bille en acier trempé ou en carbure de tungstène de 10 mm de diamètre sous une charge donnée, on mesure le diamètre de l'empreinte laissée, plus le diamètre est grand plus la dureté est faible.

La dureté **Monnin** est estimée par la largeur de l'empreinte laissée le cylindre en acier ayant un diamètre de 30 mm et une longueur supérieure à 20 mm sous une charge donnée.

La dureté **Janka** est la force enregistrée pour la pénétration d'une bille en acier de 11.28 mm diamètre jusqu'à la moitié de son diamètre, plus de force est élevé, plus de dureté est grande.

2.3.7.2 Evaluation de la dureté dans un multicouche en mélange d'essences dégradé ou non

Dans un produit comme un contreplaqué en mélange d'essences, la dureté de chaque couche peut être très différente, surtout après dégradation biologique, La mesure de dureté par les méthodes classiques citées ci-dessus est mal adaptée à la détection de pourritures en profondeur

On a choisi un test d'indentation avec un cylindre en acier de diamètre 2.5mm et longueur de 13 mm pour pouvoir traverser les couches successives de contreplaqué, tout en enregistrant la

force de pénétration jusqu'à 70% de l'épaisseur du panneau, au delà de l'axe de symétrie du contreplaqué (figure 41).

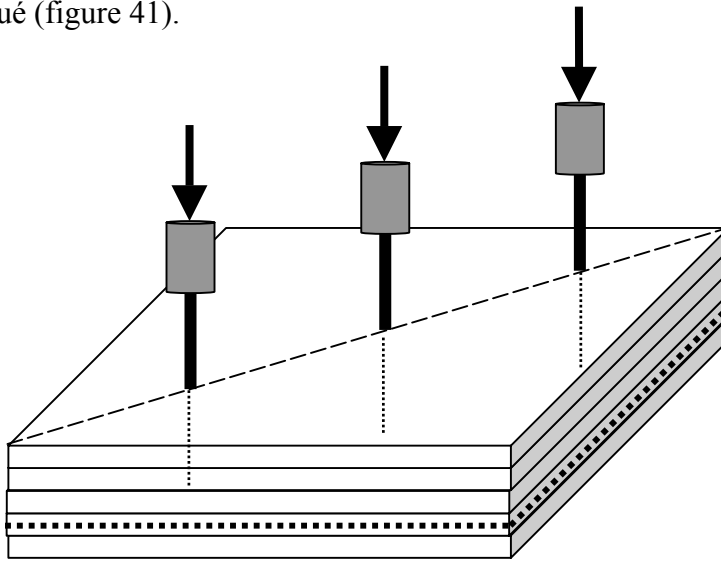


Figure 41. Trois points de mesures de l'essai d'indentation et type de pénétrateur.
 = profondeur de pénétration.

La vitesse de pénétration a été fixée à 0.3 mm par seconde. On a enregistré la force (N) avec une fréquence d'enregistrement de 0.03 mm. Pour chaque éprouvette, trois points d'indentation ont été effectués.

$$Perte\ d'énergie = (E(sain) - E(dégradé)) / E(sain)$$

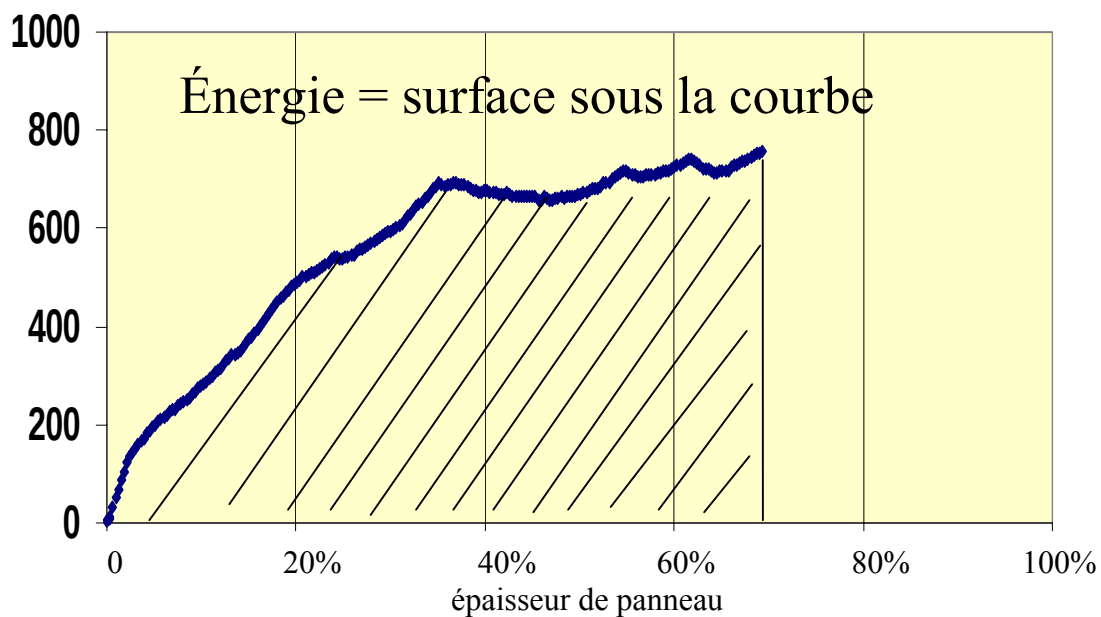


Figure 42. Exemple d'énergie d'indentation dans l'épaisseur d'un contreplaqué de hêtre en 5 plis avant et après l'attaque de C. versicolor.

La méthode de calcul est présentée ci-dessous :

$$E_d = \int_0^d F dx \quad (d = 70\%e \quad d = \text{déplacement} \quad e = \text{épaisseur du panneau})$$

$$E_d = \sum_{i=1}^N (x_i - (x_{i-1})) \frac{y_i + (y_{i-1})}{2}$$

2.3.8 Mesure de la résistance au cisaillement

Cette mesure a été utilisée pour avoir une référence mécanique, importante dans le cas des contreplaqués pour analyser les résultats de perte de masse, d'indentation et de propagation ultrasonore. À l'aide d'une colle polyuréthane (PU) on a collé deux plaquettes en fer sur les deux surfaces de chaque éprouvette en contreplaqué avec 8 heures d'attente pour la polymérisation de la colle (figure 43). Cet ensemble a été maintenu dans la salle conditionnée réglée pour avoir une humidité d'équilibre proche de 12 % au moment d'essai.

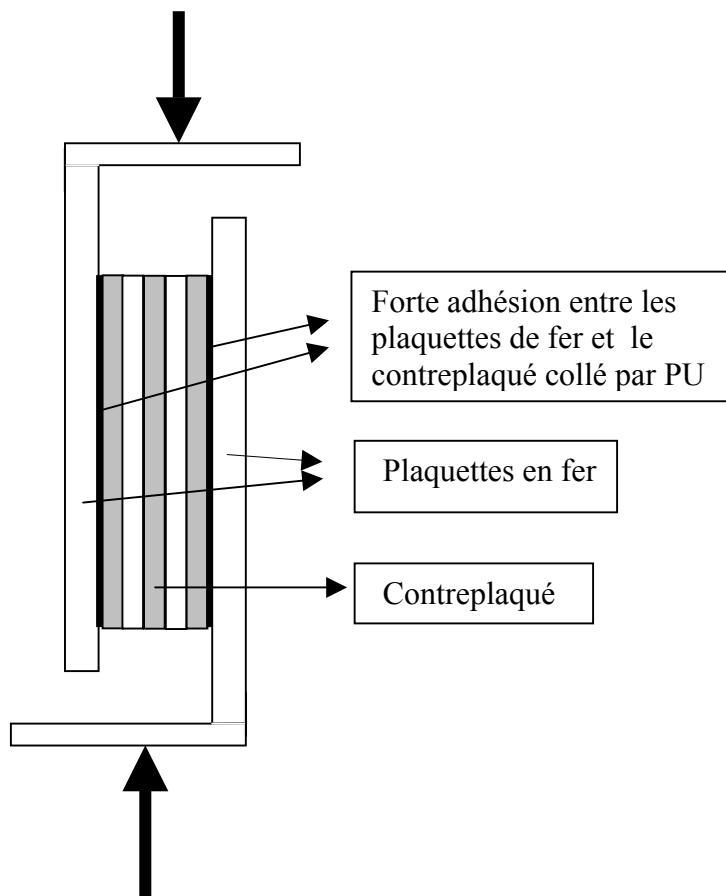


Figure 43. Essai de cisaillement, dimension de l'éprouvette 50 mm x 50 mm x épaisseur de contreplaqué.

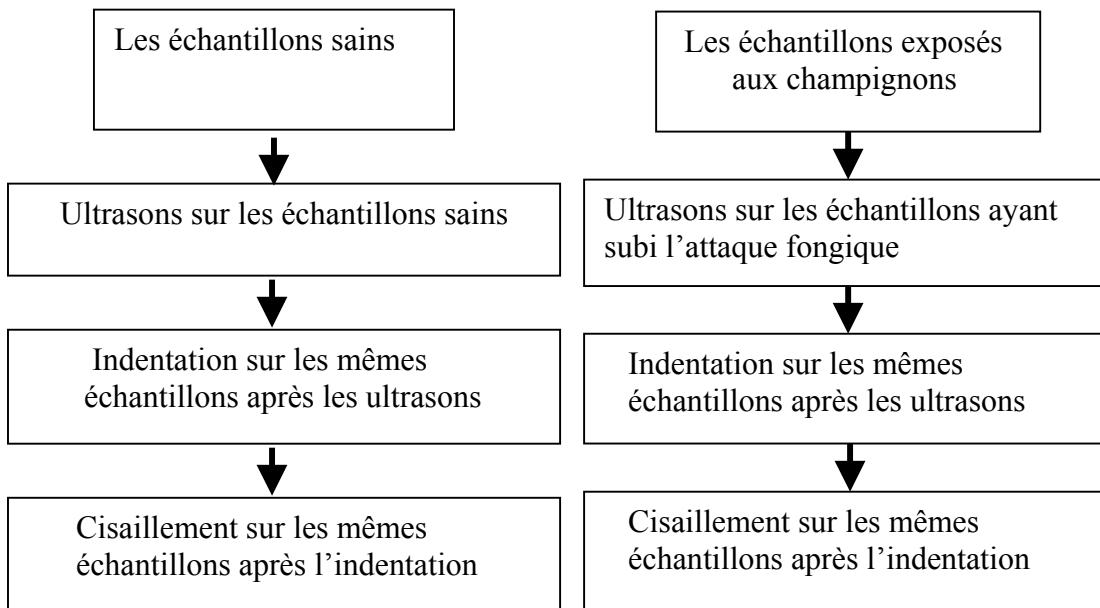


Tableau 9. La procédure des mesures sur les contreplaqués.

Nous avons pris en compte la moyenne de la force maximale obtenue pour chaque série d'éprouvettes d'un panneau avant et après l'exposition à *C. versicolor*.

L'éprouvette est taillée à 45° par rapport au fil du bois, ce qui permet de faire travailler toutes les couches dans les mêmes conditions.

Bien évidemment cet essai est capable de localiser la couche la plus dégradée (la plus faible) dans l'ensemble des couches composant le panneau de contreplaqué, après avoir subi l'attaque fongique. Cet essai a été fait après la mesure d'indentation. L'ordre des essais sur l'éprouvette de contreplaqué est présenté dans le tableau 9.

3

RESULTATS

- 3.1 Résultats des essais normalisés de durabilité vis-à-vis des termites
- 3.2 Résultats des essais normalisés de durabilité vis-à-vis des champignons
- 3.3 Résultats d'utilisation de la méthode ultrasonore pour détecter la présence et le niveau de la pourriture dans les contreplaqués
- 3.4 Résultats des essais d'indentation des contreplaqués
- 3.5 Résultats des essais de cisaillement des contreplaqués
- 3.6 Résultats des mesures de module d'élasticité des contreplaqués

3. Résultats

3.1 Résultats des essais normalisés de durabilité vis-à-vis des termites

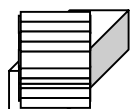
Le but de cet essai est la détermination de la résistance des contreplaqués en mélange d'essences durable et non durable vis-à-vis des termites. Cet essai nous permettra, de déterminer également l'effet de : « plan de colle », « épaisseur des placages », « pourcentage des plis durables d'un panneau » et finalement « un modèle d'intégration des plis durables aux plis non durables » sur la résistance aux termites. À cette fin nous présentons les résultats de deux manières différentes, traditionnellement par *cotation* de 0 à 4 conformément au tableau 6 et aussi par *la perte de masse*, exprimée en %.

En général il est considéré que les panneaux composites non traités ne sont pas résistants aux termites (Becker 1972, Behr 1972, Schmidt et Nehm 1972 et Evans *et al.* 1997). Evans et al. (2000) ont montré qu'un MDF composé d'un mélange d'essence durable (duramen de *Callitris glaucophylla*) et d'essence non durable, a une perte de masse diminuée vis-à-vis des termites souterrains par rapport au MDF pur fabriqué à partir d'essences non durables, avec une relation linéaire.

Kamdern et Sean (1994), ont montré que l'ajout de robinier à du peuplier dans la fabrication d'un panneau de particule permet d'augmenter sensiblement la durabilité. En effet, l'ajout de 20 à 40 % de robinier permet de diminuer de 15 à 30 % la perte de masse après 12 semaines d'attaque. Beal (1979) a comparé la résistance aux termites souterrains sur trois types de panneaux composites, contreplaqué, panneau de particules et panneau de fibres, réalisés au laboratoire à partir des mêmes essences. Après 4 ans d'évaluation, l'étendue de la dégradation a été plus grande chez le contreplaqué et plus petite chez le panneau de fibre.

Concernant la résistance naturelle des contreplaqués non traités aux termites, Suzuki et Hagio (1998) ont testé 73 espèces de bois. Les panneaux ont été fabriqués à partir de la même feuille. Ils ont identifié leur résistance aux termites. Les contreplaqués possédant des feuilles d'essences tropicales durables sont parmi le groupe résistant aux termites.

Paes et al. (2003) remarquent que la résistance aux champignons d'une essence ne lui confère pas forcément la résistance aux termites et inversement. Shukla, (1992) a montré qu'il y a une corrélation significative entre diminution de l'épaisseur des plis et augmentation de la résistance aux termites en utilisant la résine PF.



Classe examen

Type d'évaluation
Essence
Perte de masse
moyenne %
Ecart type de perte de masse
Nombre d'éprouvette

visuel
Classe de durabilité*

peuplier

7.27

1.98

3

4

4

4

S

Peuplier

5 plis

8.53

0.35

3

4

4

4

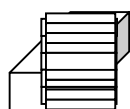
S

Peuplier

9 plis

4.27

0.92



3
4
3
2

S

Hêtre

6.49

2.23

3
4
4
4

S

Hêtre
5 plis

6.27

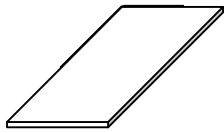
1.24

3
4
4
4

S

Hêtre
9 plis

4.04



0.11

3
3
3
3

S

Pin sylvestre

6.98

1.05

3
4
4
4

S

Cyprés
duramen

0.41

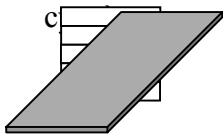
0.17

3
0
1
1

D

Selon EN 118

Aubier du



-

6
4
4
4
4
4
4

S

Selon EN 118

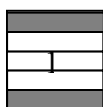
Duramen du cyprès

-

-

6
0
1
0
0
0
0

D



Pur de cyprès aubier (5plis)

5.47

0.62

3

4

4

4

S

Pur de cyprès aubier(9plis)

1.76

0.51

3

-

3

2

S

Mélange
cyprès aubier et cyprès duramen

0.27

0.2

3

0

0

1



D

"

2.45

0.43

3

3

4

3

S

"

0.21

0.17

3

0

1

1

D

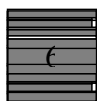
"

1.56

0.65

3

3



3

-

S

"

0.58

0.1

3

1

1

2

M

"

1.53

0.76

3

3

2

3

S

"

0.56

0.27

3



2
2
0

M

"

2.67

-

3
3
-
-

S

"

0.25

0.29

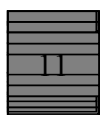
3
0
0
1

D

"

0.32

0.27



3
0
1
1

D

"

1.19

0.09

3
-
3
2

S

Pur de cyprès
duramen

0.39

0.19

3
0
1
0

D

Pur de cyprès
duramen

0.34

0.08

3
1
1
1

D

Tableau 10. Les résultats d'essais termite sur le bois massif et le contreplaqué.
* : la classification dans cette colonne est conforme à NF EN 118 (tableaux 7 et 8).

Les résultats extraits du tableau 10 sont les suivants :

Pour les échantillons de référence :

Une cotation de classe 4 (21 % des ouvriers vivants à la fin d'essai) pour l'aubier du pin sylvestre permet de vérifier que les termites dans les conditions de cet essai sont actifs.

Pour les bois massifs :

- Le bois massif du peuplier, du hêtre et l'aubier de cyprès est *sensible* à l'attaque des termites contrairement au duramen du cyprès considéré comme *durable* (figure 44).

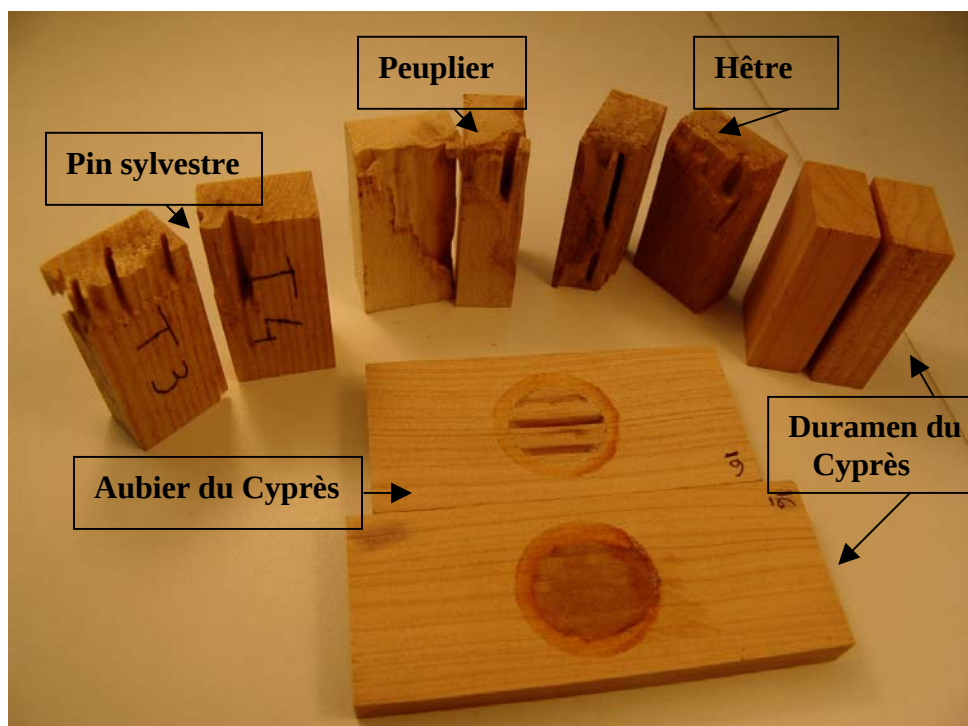


Figure 44. Quelques exemples des éprouvettes de bois massif après 8 semaines d'exposition vis-à-vis des termites.

Chez tous les contreplaqués :

On a observé qu'il n'y a pas une pénétration transversale entre deux plis adjacents d'un contreplaqué, ni entre deux plis épais ni entre deux plis minces, grâce à la présence du plan de colle MUF, qui reste toujours intact.

Chez les contreplaqués purs- non durables :

-Tous les contreplaqués 5 et 9 plis dérivés de peuplier, hêtre et aubier de cyprès, sont considérés comme *sensibles* à l'attaque des termites.

-L'effet de l'épaisseur de pli est significatif, il s'agit d'une protection contre l'attaque des termites chez les plis minces (1.3 mm) en comparaison des plis épais (2.6 mm). Le contreplaqué de peuplier en 9 plis a eu 49,9 % de diminution de perte de masse par rapport au contreplaqué en 5 plis de la même essence, il y a de même 35,5 % de diminution chez le contreplaqué de hêtre en 9 plis et 67,8 % chez le contreplaqué d'aubier de cyprès en 9 plis (figure 45).

Il est évident qu'une partie de la perte de masse chez les contreplaqués purs non durables s'est produite dans le pli central (épais). La diminution de perte de masse constatée pour les contreplaqués 9 plis aurait pu être encore plus forte en n'utilisant que des plis minces.

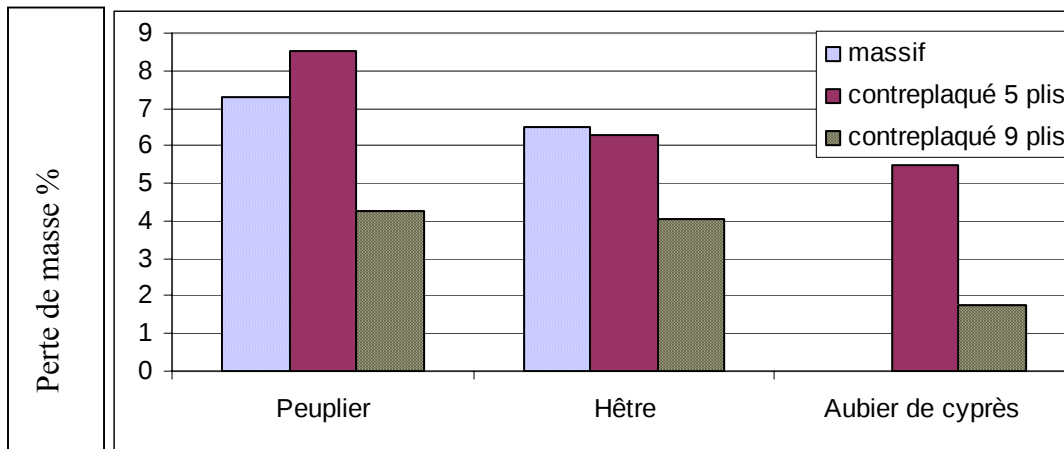


Figure 45. Influence de l'épaisseur des plis non durables sur la résistance contre l'attaque des termites.

-Il n'y a pas de différence significative entre le bois massif d'essences non durables (peuplier, hêtre et aubier de cyprès) et le contreplaqué réalisé à partir de ces essences en plis épais (2.6 mm).

-La pénétration des termites par l'épaisseur du panneau se produit essentiellement dans les plis épais non durables, et par la surface dans les plis non durables aussi bien mince ou épais, figures 46 et 47 A, B.

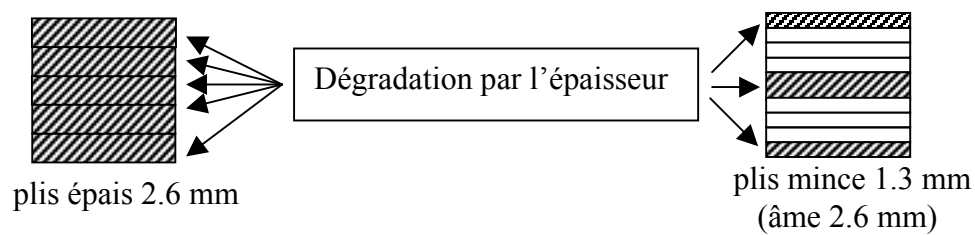


Figure 46. La pénétration des termites par l'épaisseur dans les contreplaqués
pur non durable.

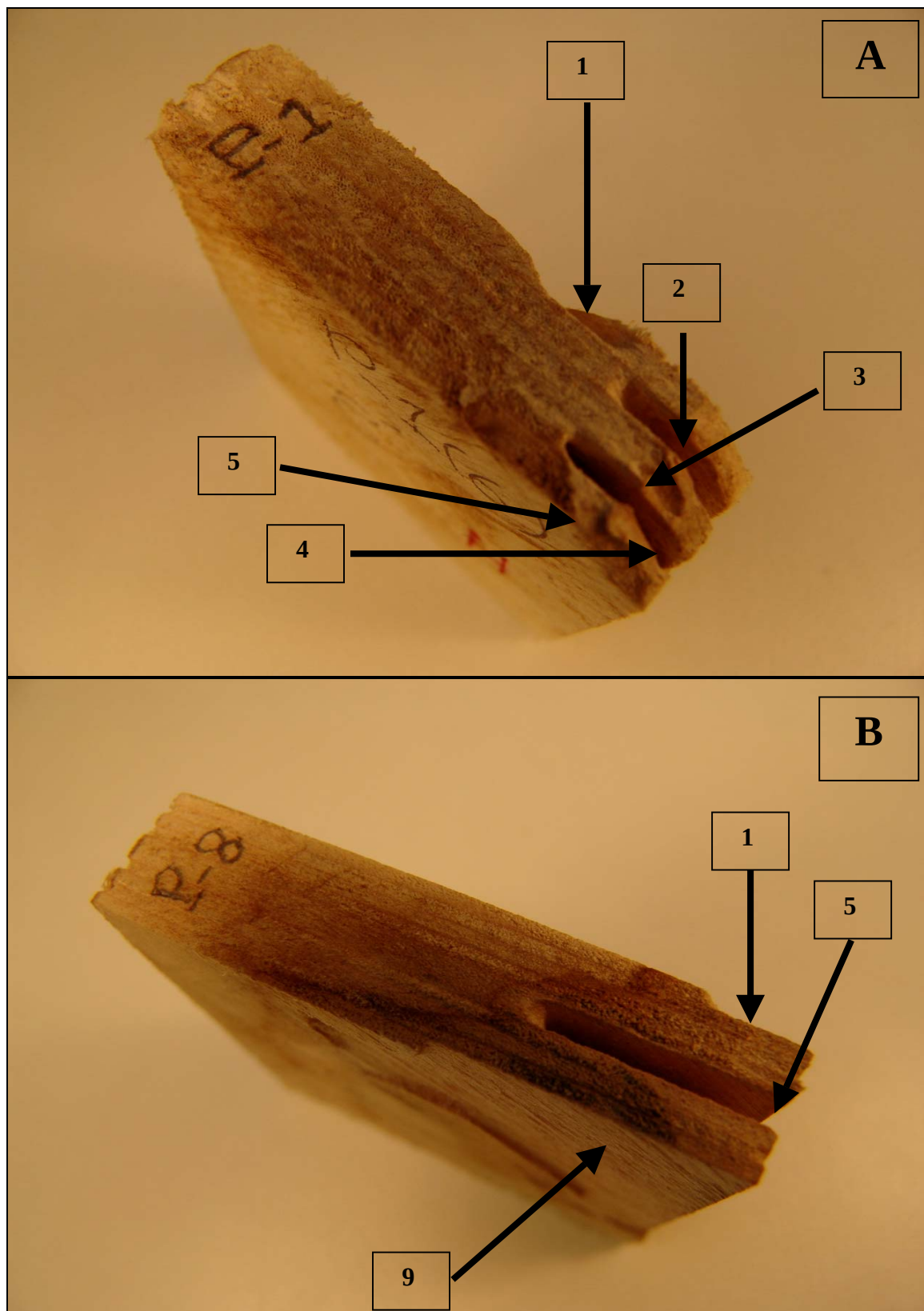


Figure 47. A, présente la sensibilité des plis épais non durables à l'attaque des termites (exemple d'un contreplaqué pur de peuplier en 5 plis),
B, présente une protection des plis minces non durables ayant deux plans de colle MUF des deux côtés (exemple d'un contreplaqué pur de peuplier en 9 plis).

Chez les bois massif durables et le contreplaqués purs en plis durables :

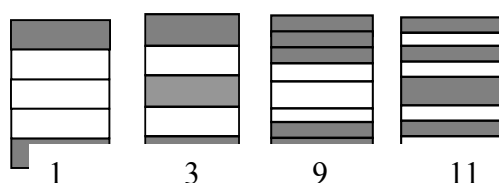
-Le duramen du cyprés et les contreplaqués provenant de cette essence, 5 ou 9 plis sont *durables* vis-à-vis de l'attaque des termites.

-Il n'y a pas de différence significative de la résistance aux termites entre le duramen de cyprés en bois massif, en contreplaqué de 5 plis et en contreplaqué de 9 plis (pour les deux critères d'évaluation : « perte de masse » et « cotation visuelle »).

Chez les contreplaqués en mélange d'essences durables et non durables :

Tous les contreplaqués en mélange qui possèdent les couches de surface en plis non durables, quelle qu'en soit l'épaisseur, ont été considérés comme *sensibles*. Les contreplaqués ayant les couches de surfaces durables, ont été considérés soit comme moyennement durables soit comme durables.

Les plus durables parmi les modèles réalisés au laboratoire sont les suivants :



La présence des panneaux 1 et 3 et 9 et 10 (ayant des couches épaisses non durables) dans le groupe des *durables*, montre un effet répulsif ou protecteur des couches durables vers les couches non durables. L'activité des termites sur les plis non durables d'un panneau est affectée par la quantité et la position des plis durables. Il paraît donc logique que parmi les 5 contreplaqués considérés comme durables, il y ait 4 panneaux ayant 60 % de plis durables. Les deux contreplaqués 5 et 7 ont été considérés comme moyennement durables (figure 49). Ils comportent 40 % de plis durables et il y a deux couches durables en surface.

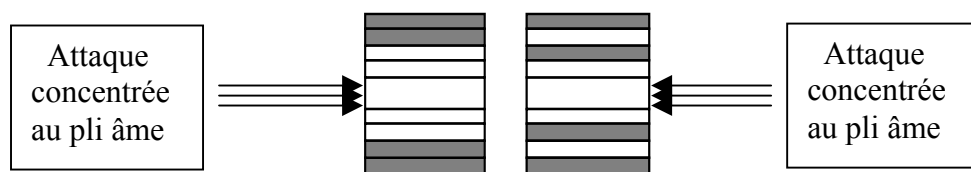


Figure 49. Les deux mé 5 7 *durables*

L'attaque observée dans ces panneaux est ~~uniquement~~ concentrée au pli central du panneau (figure 50). Toutefois il ne faut pas oublier que 2 cotations sur 3 observées pour le panneau 5 ont la valeur 1 qui peut conférer la classe *durable* comme pour le panneau 1.

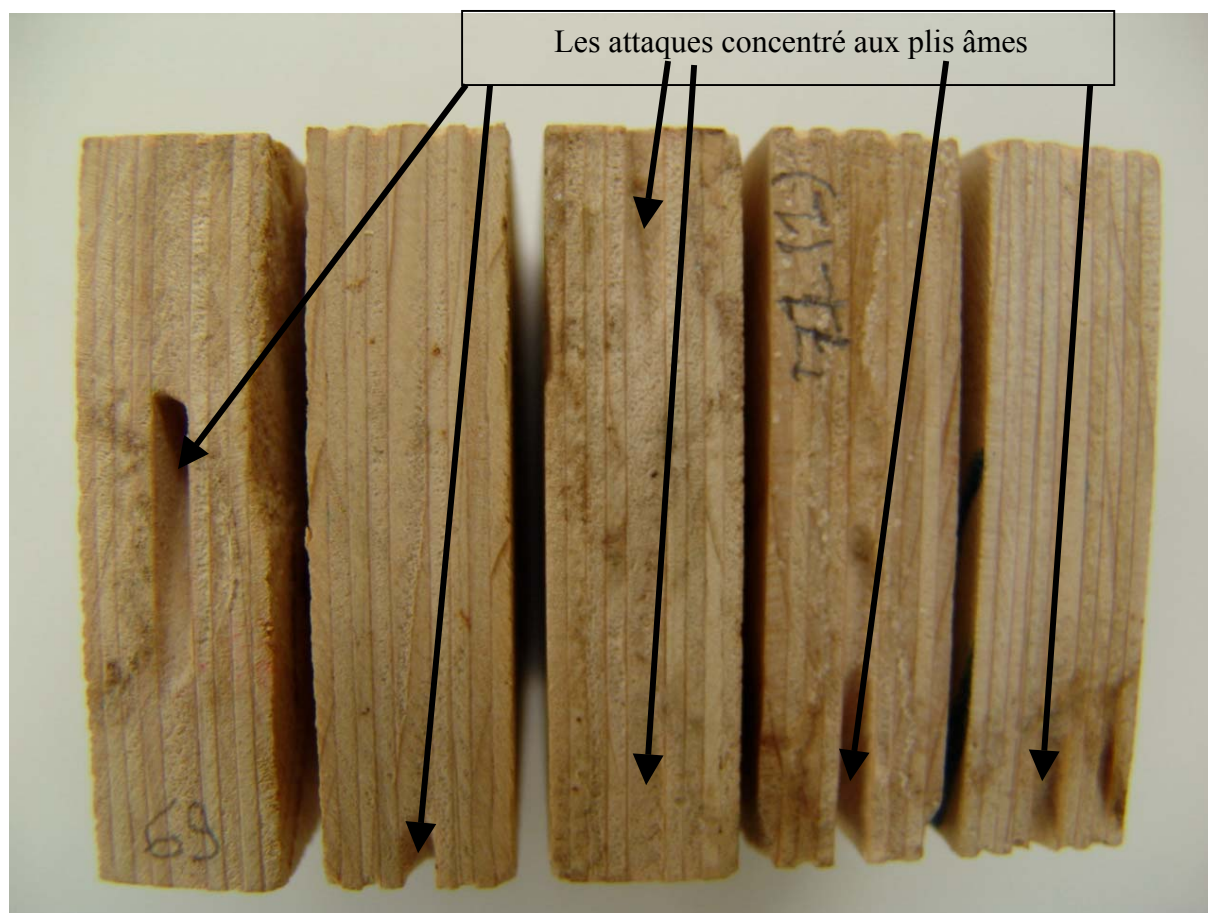


Figure 50. Panneaux 5 et 7 ayant un pli épais non durable au centre.

Compte tenu de ces observations on peut considérer que les contreplaqués en mélange d'aubier et de duramen de cyprès comprenant 60% en volume de duramen et des plis externes durables sont résistants aux termites. La résistance est d'autant plus forte que les plis non durables sont minces. Il faut noter que même avec un mélange à 40% de plis durables, et des plis durables en extérieur, les contreplaqués mélangés d'aubier et duramen de cyprès sont presque durables. Cela signifie qu'il peut être intéressant de valoriser cette espèce pour réaliser des contreplaqués ou des LVL en zones infestées par les termites, en valorisant à la fois l'aubier et le duramen.

3.2 Résultats des essais normalisés de durabilité vis-à-vis des champignons

Les résultats obtenus concernant la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons seront présentés séparément pour le bois massif et pour le contreplaqué.

3.2.1. Résultats de durabilité naturelle du bois massif

Les pertes de masse obtenues vis-à-vis de *Coriolus versicolor* et de *Coniophora puteana* sont présentées dans le tableau 11.

Les résultat de cette partie sont les donnés de base pour :

- déterminer le niveau de perte de masse chez les essences désignées dans cette étude
- distinguer s'il y a une différence significative entre duramen externe et duramen interne, et pour estimer le niveau de perte de masse des feuilles appliquées dans un contreplaqué provenant du duramen externe et du duramen interne.
- pouvoir évaluer l'influence de la colle (avec deux nombres de plans de colle : 4 et 8) sur la durabilité naturelle des contreplaqués
- pouvoir évaluer l'efficacité de la technique ultrasonore dans une gamme de perte de masse importante chez les différentes espèce

Espèces, arbres (chiffres) et proportion (lettres)	<i>Coriolus versicolor</i>			<i>Coniophora puteana</i>			Classe de durabilité
	Nombre d'éprouvettes	Moyenne de perte de masse absolue %	Ecart type %	Nombre d'éprouvettes	Moyenne de perte de masse absolue %	Ecart type %	

Cèdre 1 DI	12	0.74	0.26	12	0.60	0.39	TD
Cèdre 1 DE	12	0.40	0.22	12	0.17	0.25	TD
Cèdre 2 DI	12	0.51	0.22	12	0.39	0.49	TD
Cèdre 2 DE	12	0.34	0.28	12	0.38	0.30	TD
Cèdre 3 DI	12	0.57	0.45	12	0.17	0.22	TD
Cèdre 3 DE	12	0.27	0.31	12	0.13	0.19	TD
Cyprès 1 DI	15	1.52	0.41	15	1.39	0.70	TD
Cyprès 1 DE	15	1.88	0.32	15	1.54	0.38	TD
Cyprès 2 DI	15	1.65	0.71	15	1.12	0.70	TD
Cyprès 2 DE	15	1.40	0.66	15	1.30	0.51	TD
Châtaignier 1D	18	0.31	0.17	18	0.41	0.43	TD
Châtaignier 2D	18	0.44	0.43	18	0.68	0.6	TD
Cèdre 1A	9	19.2	3.41	9	33.2	3.8	ND
Cèdre 2A	9	15.3	1.60	9	27.4	2.1	FD
Cèdre 3A	9	15.1	2.12	9	29.8	3.2	FD
Cyprès 1A	9	14.5	2.21	9	22.6	3.0	FD
Cyprès 2A	9	15.1	1.46	9	23.8	3.3	FD

Peuplier 1BG	18	23.8	3.40	18	23.4	13.9	FD
Peuplier 1BN	18	20.2	2.57	18	21.8	3.7	FD
Peuplier 2BG	18	28.4	3.13	18	17.3	6.8	FD
Peuplier 2BN	12	30.1	2.04	12	28.6	2.8	ND
Hêtre BN	18	26.8	3.88	18	29.4	3.7	FD
Hêtre CR	18	28.9	3.05	18	21.8	9.2	FD
<i>Hêtre de Contrôle de virulence</i>	8	25.9	0.89				<i>valide</i>
<i>Pin sylvestre de Contrôle de virulence</i>				8	22.8	3.6	<i>valide</i>

Tableau 11. Moyenne et écart type de la perte de masse chez toutes les essences étudiées.

DI : duramen interne, DE : duramen externe, D : duramen, A : aubier,
 BG : bois gris, BN : bois normale, CR : cœur rouge, TD : très durable,
 FD : faiblement durable, ND : non durable.

Selon les pertes de masse calculées, tous les duramens internes et externes évalués dans cette étude sont dans la classe de durabilité « *très durable* », il s'agit de moins 5 % de perte de masse absolue (X) ou moins de 0.15 de perte de masse relative (Xr), vis-à-vis *Coriolus versicolor* et *Coniophora puteana*. Les variations de perte de masse relative, dans cette classe de durabilité, sont présentées dans la figure 51.

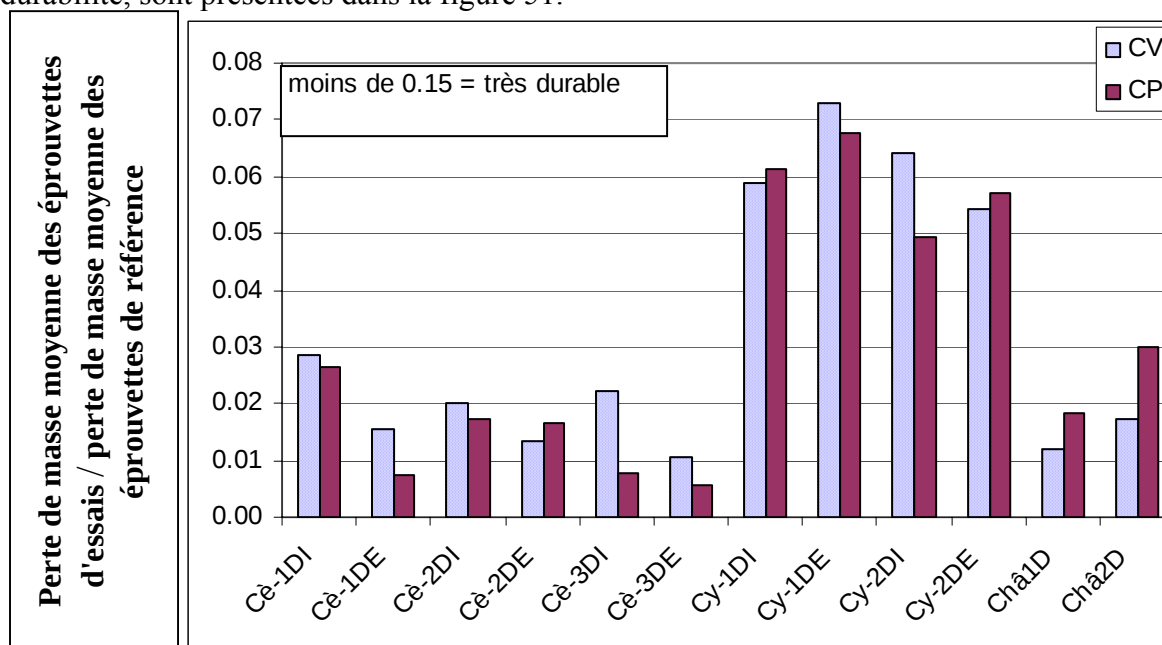


Figure 51. Les pertes de masse pour tous les duramens étudiés. Cè : cèdre, Cy : cyprès, Châ : châtaignier, DI : duramen interne, DE : duramen externe, D : duramen.

Selon l'analyse de variance il n'y a pas une différence significative entre duramen externe et duramen interne pour les essences étudiées sauf dans le cas du duramen de cèdre vis-à-vis de *Coriolus versicolor* (figure 52).

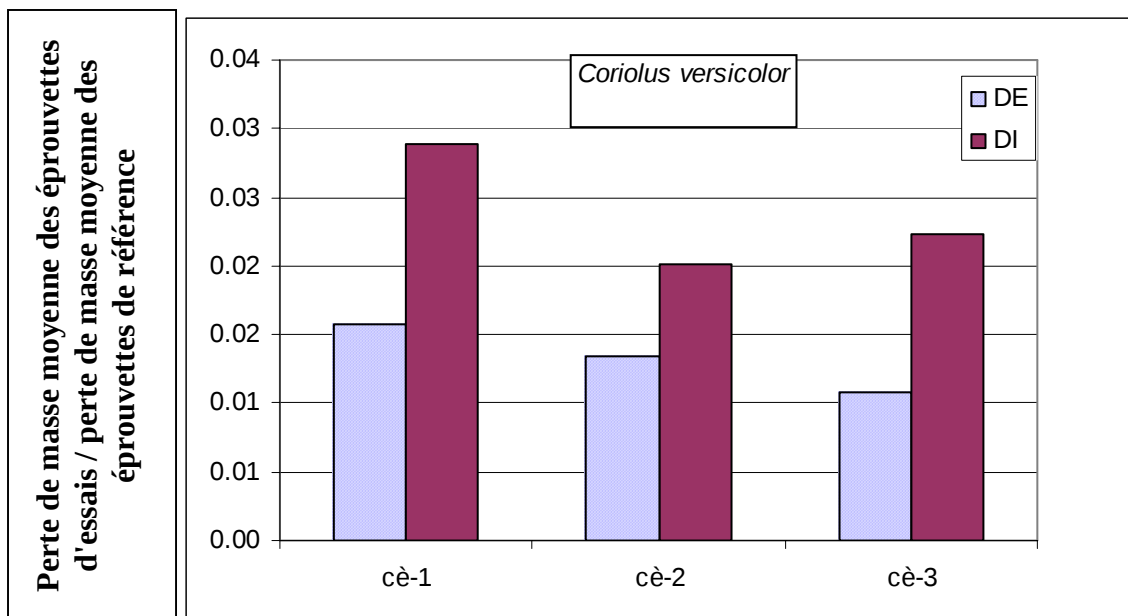


Figure 52. Comparaison de perte de masse entre duramen externe (DE) et duramen interne (DI) pour les cèdres 1, 2, 3, causées par *coriolus versicolor*.

Selon les pertes de masse absolues (présentées dans le tableau 11), la majorité des aubiers sont considérées comme « *faiblement durable* » mais en utilisant la perte de masse des témoins de virulence dans le calcul de perte de masse relative, tous les aubiers se placent dans la classe de durabilité « non durable ».

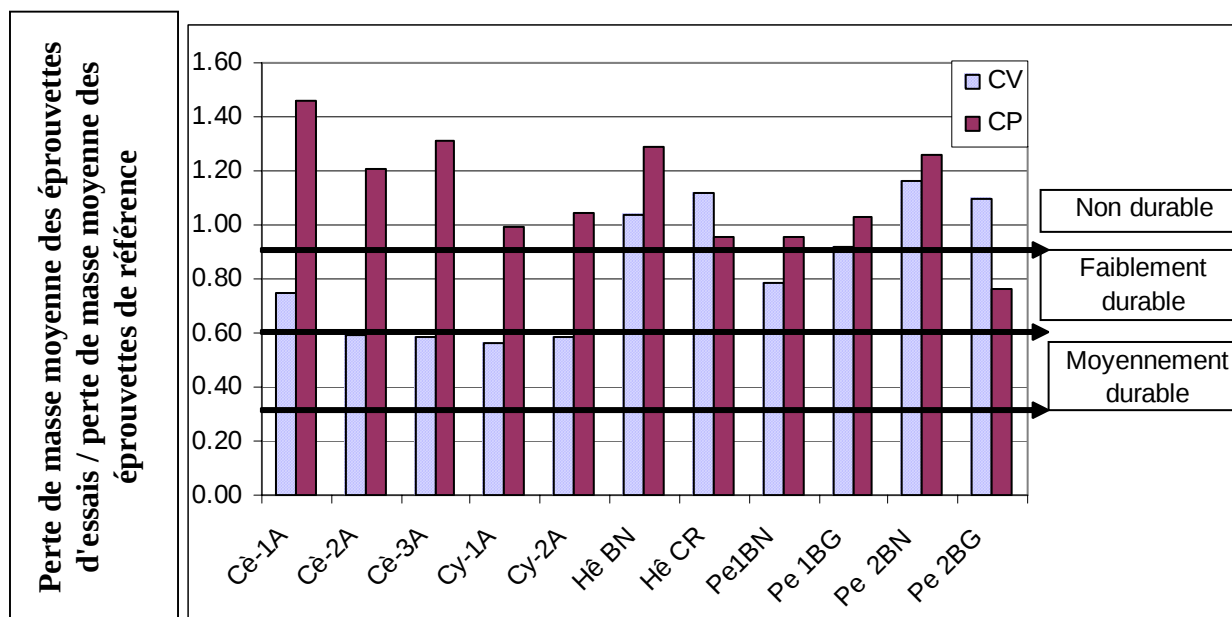


Figure 53. Perte de masse relative chez les aubiers (différencié et non différencié) causées par *Coriolus versicolor* et *Coniophora puteana*.

Compte tenu des résultats obtenus de cet essai, de manière générale, on considèrera les duramens différenciés de cèdre, cyprès, et châtaignier comme *durables*, et les aubiers différenciés de cèdre et de cyprès ainsi que les aubiers non différenciés de peuplier, et de hêtre, plus les duramens non différenciés de peuplier et de hêtre comme *non durables*.

3.2.2 Résultats de durabilité naturelle des contreplaqués.

Le but de cet essai est la détermination de la résistance des contreplaqués en mélange d'essence durable et non durable vis-à-vis des deux types principaux de dégradation fongique. A cet égard nous avons déterminé la durabilité des bois massifs et des contreplaqués purs d'essences désignées. Cet essai nous permettra, de déterminer les effets « plan de colle », « épaisseur des placages », « pourcentage des plis durables par rapport aux plis non durables » et finalement « le modèle d'intégration des plis durables aux plis non durables » sur la résistance aux champignons.

Nous présentons les pertes de masse obtenues pour les contreplaqués vis-à-vis de *Coriolus versicolor* et *Coniophora puteana* respectivement en 6 groupes suivants :

- les contreplaqués purs
- les contreplaqués mélangés de châtaignier et de peuplier
- les contreplaqués mélangés de châtaignier et de hêtre
- les contreplaqués mélangés de cèdre et de peuplier
- les contreplaqués mélangés de cèdre et de hêtre
- les contreplaqués mélangés de cyprès aubier et de cyprès duramen

3.2.2.1 Les contreplaqués purs

Les résultats de perte de masse des contreplaqués purs en 5 plis et en 9 plis vis-à-vis de *C. versicolor* et *C. puteana* respectivement sont présentés dans les tableaux 1 à 6 en annexe B et la figure 54.

Dans le tableau 12 les validations d'essai selon les résultats de perte de masse pour les témoins de virulence et les témoins de dimension exigés par la norme (et complémentaire avec *) sont présentées.

Contrôles	Echantillon	Dimension	Perte de masse moyenne CV	Validité d'essai avec CV	Perte de masse moyenne CP	Validité d'essai avec CP
Témoin de virulence	Aubier de Pin Sylvestre*	50mmx25mm x15mm*	5.05	Non exigée par la norme	33.7	Valide
Témoin de virulence	Hêtre	50mmx25mm x15mm	19.6	Valide	28.5	Non Exigée par la norme
Témoin de dimension	Aubier de Pin Sylvestre*	50mmx50mmx épaisseur du panneau*	7.59	Non exigée par la norme	31.7	Valide
Témoin de dimension	Hêtre	50mmx50mmx épaisseur du panneau	20.9	Valide	29.6	Non exigée par la norme

* : les mesures complémentaires

Tableau 12. La perte de masse chez les témoins de virulence et les témoins de dimension.

CV : *Coriolus versicolor*, Cp : *Coniophora puteana*

Les résultats du tableau 12 montrent que les deux champignons utilisés, *Coriolus versicolor* et *Coniophora puteana* ont été actifs dans ces essais.

Tous les contreplaqués réalisés à partir d'essences non durables (selon EN 350-1) sont également non durables selon EN 12038.

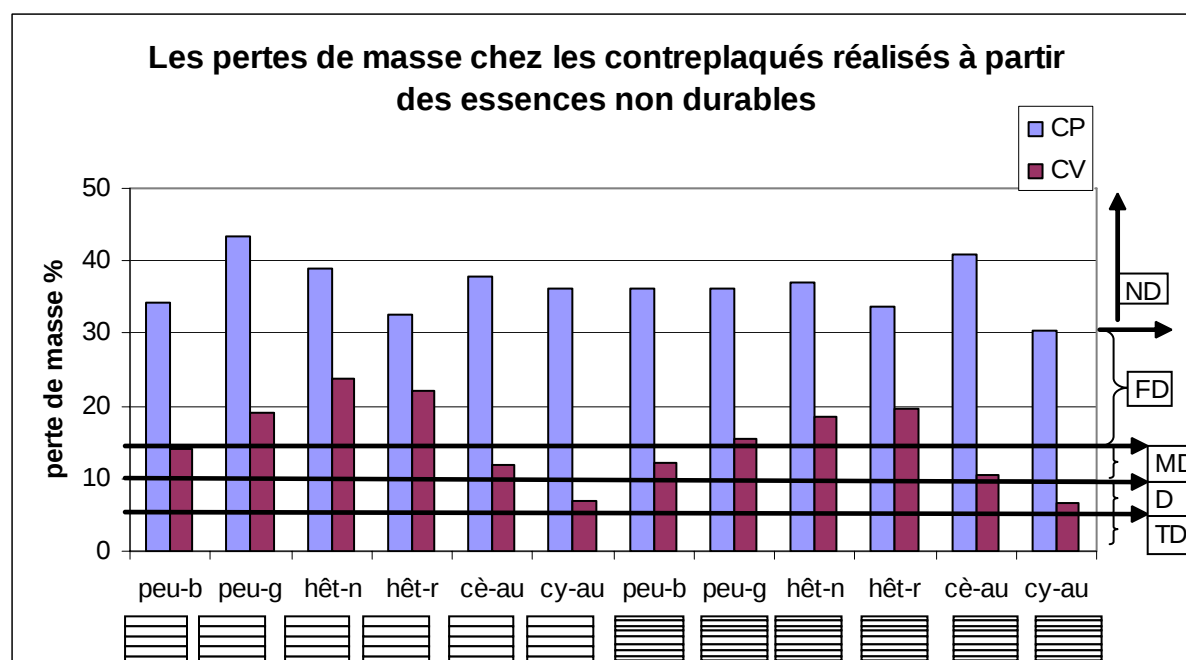


Figure 54. Perte de masse chez les contreplaqués réalisés à partir d'essences non durables.
 CV : *Coriolus versicolor*, CP : *Coniophora puteana*, ND : non durable,
 FD : faiblement durable, MD : moyennement durable, D : durable, TD : très durable.

Les seuils de signification de la différence de perte de masse vis-à-vis de *C. versicolor* et *C. puteana* entre les 3 états : bois massif, contreplaqué en 5 plis et contreplaqué en 9 plis sont présentés dans le tableau 13.

Analyse de variance pour l'essences non durables	Seuil de signification	
	<i>C. versicolor</i>	<i>C. puteana</i>
<i>Peuplier bois blanc</i>		
Entre bois massif et contreplaqué en 5 plis	**	*_
Entre bois massif et contreplaqué en 9 plis	***	**_
Entre contreplaqué en 5 plis et en 9 plis	**	ns
<i>Peuplier bois gris</i>		
Entre bois massif et contreplaqué en 5 plis	ns	ns
Entre bois massif et contreplaqué en 9 plis	**	ns
Entre contreplaqué en 5 plis et en 9 plis	*	ns
<i>Hêtre bois normal</i>		
Entre bois massif et contreplaqué en 5 plis	**	ns
Entre bois massif et contreplaqué en 9 plis	**	ns
Entre contreplaqué en 5 plis et en 9 plis	**	ns
<i>Hêtre cœur rouge</i>		
Entre bois massif et contreplaqué en 5 plis	**	ns
Entre bois massif et contreplaqué en 9 plis	***	ns
Entre contreplaqué en 5 plis et en 9 plis	*	ns
Aubier du cèdre		

Entre bois massif et contreplaqué en 5 plis	**	*
Entre bois massif et contreplaqué en 9 plis	***	10%
Entre contreplaqué en 5 plis et en 9 plis	ns	ns
Aubier du cypès		
Entre bois massif et contreplaqué en 5 plis	***	**_
Entre bois massif et contreplaqué en 9 plis	***	ns
Entre contreplaqué en 5 plis et en 9 plis	ns	**

- : augmentation de perte de masse

Tableau 13. Les analyses de variance pour déterminer le seuil de signification des différences de perte de masse entre les bois massifs non durables et les contreplaqués en 5 et en 9 plis.

Les résultats vis-à-vis de *C. versicolor*.

L'analyse de variance a révélé que *C. versicolor* en général est sensible à la présence de la colle MUF. Nous avons trouvé que tous les bois massif utilisés (feuillu ou résineux) présentent une perte de masse plus élevée que les contreplaqués réalisés en 9 plis de la même essence. En plus, à part pour le peuplier (bois gris) nous avons observé une différence significative entre le bois massif et les contreplaqués en 5 plis chez toutes les autres essences non durables.

Les résultats vis-à-vis de *C. puteana*.

A part l'aubier du cèdre, les différences entre l'état de bois massif et de contreplaqué en 9 plis sont non significatives, ce qui traduit une non sensibilité de *C. puteana* à la présence de la colle MUF dans le panneau. En plus pour le peuplier blanc on a observé un effet l'inverse d'augmentation de la perte de masse entre le bois massif et les contreplaqués en 5 plis et en 9 plis respectivement, de même pour le bois massif d'aubier du cypès et le contreplaqué en 5 plis, ce qui confirme au moins que la colle MUF n'a aucune influence protectrice sur l'activité de *C. puteana*.

-Chez les contreplaqué réalisés à partir des essences très durables

Les pertes de masse causées par *C. puteana* et *C. versicolor* sont différentes, nous avons observé une augmentation significative de la perte de masse entre le bois massif, le contreplaqué en 5 plis et le contreplaqué en 9 plis, causée par *C. puteana*. Les variations de perte de masse du bois massif aux contreplaqués en 5 plis et 9 plis ne sont pas significatives pour *C. versicolor*.

Les contreplaqués réalisés à partir du duramen de cèdre et de châtaignier en 5 plis ou en 9 plis sont « très durables », mais les contreplaqués de duramen de cypès ont été trouvés seulement « durables ». Il s'agit d'une diminution de la résistance vis-à-vis *C. puteana* qui de toute façon détermine le classement final de durabilité du contreplaqué.

Cette augmentation de perte de masse a été observée également dans le cas des duramens de cèdre et de châtaignier, mais ces contreplaqués restent dans la même classe de durabilité (figure 55 et 56).

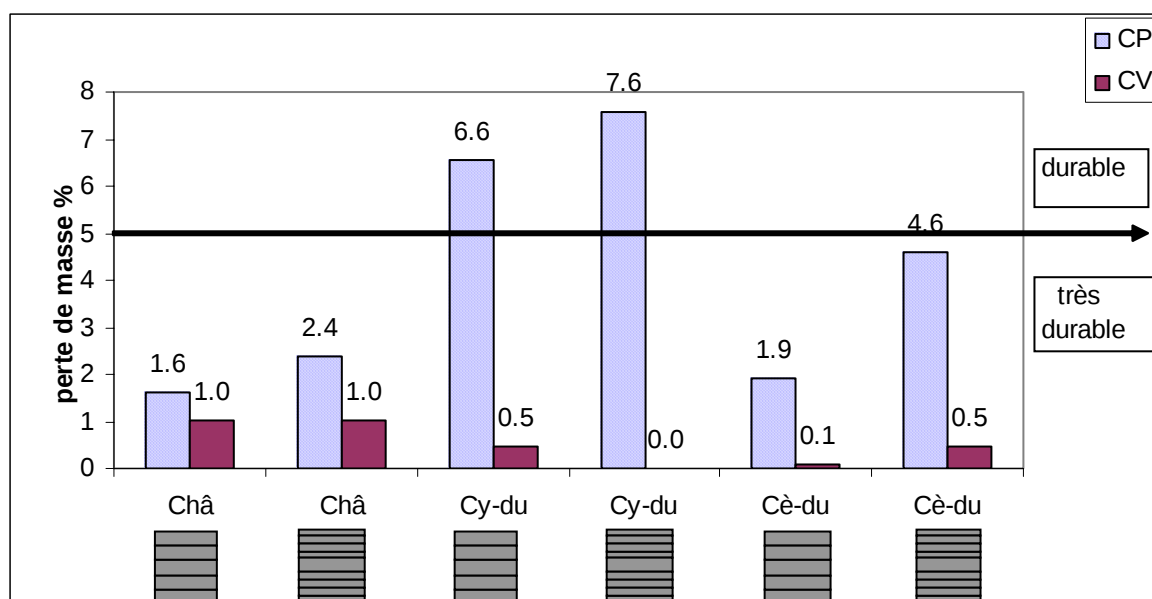


Figure 55. Les pertes de masse des contreplaqués réalisés à partir des placages d'essences très durables.

Une comparaison des pertes de masse causées par *C. puteana* pour les duramens utilisés dans cette étude entre l'état de bois massif, de contreplaqué en 5 plis et de contreplaqué en 9 plis est présentée dans la figure 56.

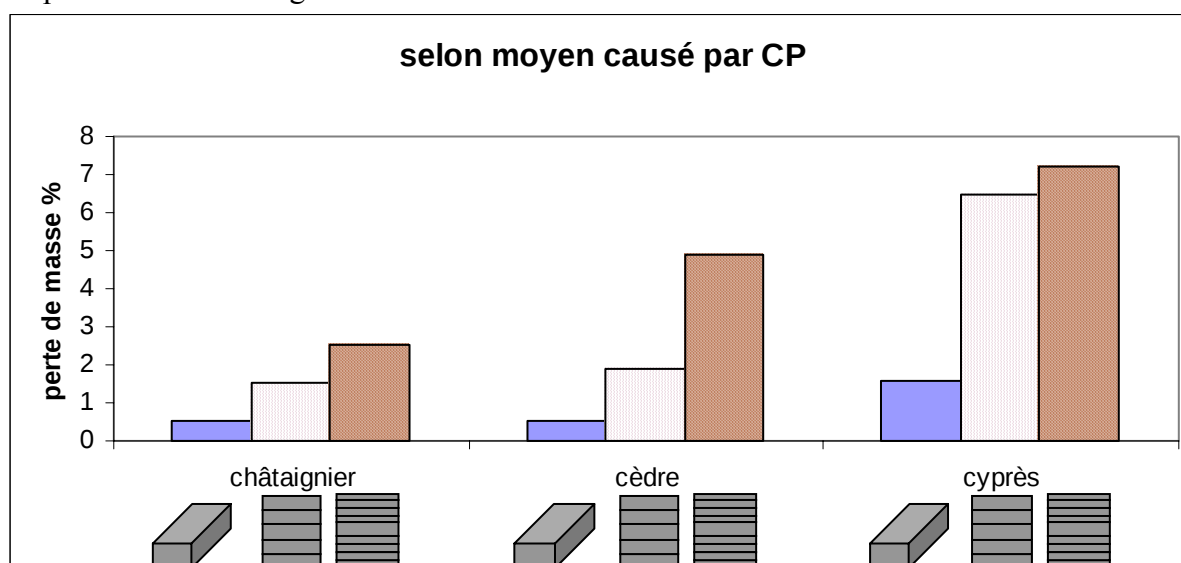


Figure 56. Comparaison de la perte de masse causée par *C. puteana* entre bois massif, contreplaqué en 5 plis, et contreplaqué en 9 plis.

Dans le tableau 14 les seuils de signification des différences de perte de masse pour les duramens utilisés vis-à-vis de *C. puteana* entre « bois massif et contreplaqué en 5 plis », entre « bois massif et contreplaqué en 9 plis » et finalement entre « contreplaqués en 5 plis et en 9 plis » sont présentés.

Analyse de variance pour l'essences non durables	Seuil de signification	
	<i>C. versicolor</i>	<i>C. puteana</i>
<i>Duramen de châtaignier</i>		
Entre bois massif et contreplaqué en 5 plis	NS	NS
Entre bois massif et contreplaqué en 9 plis	NS	* * -
Entre contreplaqué en 5 plis et en 9 plis	NS	10% -
<i>Duramen du cèdre</i>		
Entre bois massif et contreplaqué en 5 plis	***	10% -
Entre bois massif et contreplaqué en 9 plis	***	* * -
Entre contreplaqué en 5 plis et en 9 plis	NS	NS
<i>Duramen du cyprès</i>		
Entre bois massif et contreplaqué en 5 plis	*	* * * -
Entre bois massif et contreplaqué en 9 plis	**	* * * -
Entre contreplaqué en 5 plis et en 9 plis	NS	NS

- : augmentation de perte de masse.

Tableau 14. Les analyses de variance pour déterminer le seuil de signification de perte de masse entre les bois massifs non durables et les contreplaqués en 5 et en 9 plis.

Les résultats obtenus pour *C. versicolor* montrent à nouveau la sensibilité de cet agent de dégradation à la colle MUF. Cet effet de protection contre *C. versicolor* a été observé pour les duramens de cèdre et de cyprès mais pas pour le châtaignier.

Face à l'attaque de *C. puteana*, il apparaît que les contreplaqués réalisés à partir de duramen de châtaignier, de cèdre et de cyprès en 9 plis sont moins durables que le bois massif. De plus pour le duramen de cyprès nous avons trouvé aussi une différence fortement significative entre le bois massif et le contreplaqué en 5 plis. Ces résultats semblent prouver que *C. puteana* n'est pas inhibé par la présence de la colle MUF, au contraire, celle-ci semble favoriser son activité de dégradation.

L'augmentation de la perte de masse des bois massifs aux contreplaqués en 5 plis a été trouvée 3, 3.8 et 4.1 fois plus élevée respectivement chez le châtaignier, le cèdre et le cyprès. Ces facteurs pour le passage des bois massifs aux contreplaqués en 9 plis sont de 4.4, 9.1 et 4.7 chez le châtaignier, le cèdre et le cyprès respectivement.

La diminution de la résistance à la pourriture entre le bois massif et les contreplaqués réalisés dans ces essences peut trouver son explication d'abord par la volatilité d'une partie des extractibles responsables de la durabilité naturelle. En effet on facilite la perte de certaines substances volatiles présentes dans le duramen en transformant le bois massif en placage de petite épaisseur (11.5 et 5.8 fois moins épais chez les placages de 1.3 mm et 2.6 mm respectivement par rapport à l'épaisseur du bois massif utilisé dans un test). Il a été observé par Yazaki (1983) chez *Callitris columellaris* (de la même famille que le cyprès) que la disparition des composants volatils a été accélérée par la plus grande surface disponible chez les copeaux en comparaison des piquets de bois massif de 50 mm x 50 mm x 370 mm. Il a trouvé une diminution de 4.3 % m/m de taux d'extractibles chez le bois massif frais à 1.5% chez les copeaux après 2.5 ans de stockage en chambre ventilée. On connaît bien les molécules responsables de la durabilité naturelle chez *Cupressus sempervirens* et *Cedrus atlantica*. Chez le cyprès, la composition chimique est constituées par les tropolones (notamment β -thujaplicin et nootcatin) et par les terpènes (notamment carvacrol), cedrol, manool etc (Biemann et al.1966). Sentera et al. (1975) mesure les constituants volatils chez *Cupressus stephonsonii* et il trouve que 1.3 % (par rapport à la matière sèche) sont des

composés volatils, après analyse il détermine que 78% des volatils font partie des terpènes et 17% des tropolones (β -thujaplicine et nootkatine). Carvacrol est un monoterpène réputé pour ses propriétés insecticides et répulsives (Ahn et al.1998).

D'ailleurs les tropolones sont aussi connues pour être très fongitoxiques (Anderson et al. 1962; Anderson et al. 1963; Lin et Liu 1963; Southam et Ehrlich 1943; Saito et al. 1997; Baya et al. 2001). Les cèdres sont connus pour l'huile essentielle qui est majoritairement (plus de 70%) composée par des sesquiterpènes (α , β , γ -himachalène respectivement 10.8 %, 54% et 17.2%), et aussi les composées de alpha et gamma-atlantone, isomères qui donnent une odeur sucrée à l'huile. Ahn et al. (2003) présentent la propriété anti fongique de l'huile essentielle de *cedrus atlantica* avec un seuil d'efficacité de 100 micros g/ml. Chalchat (1994) a analysé l'huile essentielle provenant des sciures de *Cedrus atlantica* et confirme que sur 53 composés identifiés, environ 70 % sont des alpha, beta, et gamma isomères de himachalene (sésquiterpenes). D'ailleurs Fleisher (2000) en mesurant les constituants volatils chez *Cedrus libani*, détermine que 53 % des composées volatils sont les sesquiterpènes, alpha et beta-himachalène.

Par ailleurs Gambetta (1995), a montré que les agents de pourriture brune et fibreuse ont provoqué une plus grande perte de masse sur les L.V.L (collé avec une colle MUF) que sur du châtaignier massif. Le résultat s'est traduit par un classement du châtaignier massif en classe 1 et du L.V.L. en classe 2. Dans ce cas la perte de résistance semblait due au lessivage des ellagitannins en raison de l'étuvage à l'eau chaude des grumes. L'existence de la colle MUF n'avait pas empêché la perte de résistance du panneau de contreplaqué contre *Coriolus versicolor*.

Dans notre cas les résultats inverses entre les deux types de champignons laissent penser qu'en dehors d'un effet de perte de substances bio actives volatiles ou lessivables éventuel, il y a un effet significatif de la colle MUF qui pourrait augmenter la résistance à *Coriolus* mais Sans aucune influence négative sur l'activité de *Coniophora*.

3.2.2.2 Les contreplaqués en mélange d'essence durable et non durable

Nous avons réalisé 3 groupes de mélange d'essences durables et non durables, Il s'agit de Mélanges de différents feuillus :

- mélange du châtaignier et du peuplier
- mélange du châtaignier et du hêtre

Mélanges de feuillus-résineux :

- mélange du cèdre-duramen et du peuplier
- mélange du cèdre-duramen et du hêtre

Mélange de différents résineux :

- mélange du cèdre-duramen et du cèdre-aubier
- mélange du cyprès-duramen et du cyprès-aubier.

Etant donné que le classement de durabilité s'effectue dans la norme selon le maximum de perte de masse obtenue par chacun des champignons d'essai, la classification de résistance des contreplaqués en mélange devrait être faite sur la base des résultats obtenus pour

C.puteana. Mais compte tenu de ce qui a été dit plus haut de « l'appétence » de *Coniophora* pour la colle MUF, il faut aussi examiner les résultats sur *Coriolus*

3.1.2.2.1 Les contreplaqués en mélange de Châtaignier et de Peuplier

Les résultats de perte de masse pour ces différents contreplaqués, vis-à-vis de *C. versicolor* et de *C. puteana*, sont présentés dans le tableau 1 d'annexe B et la figure 57

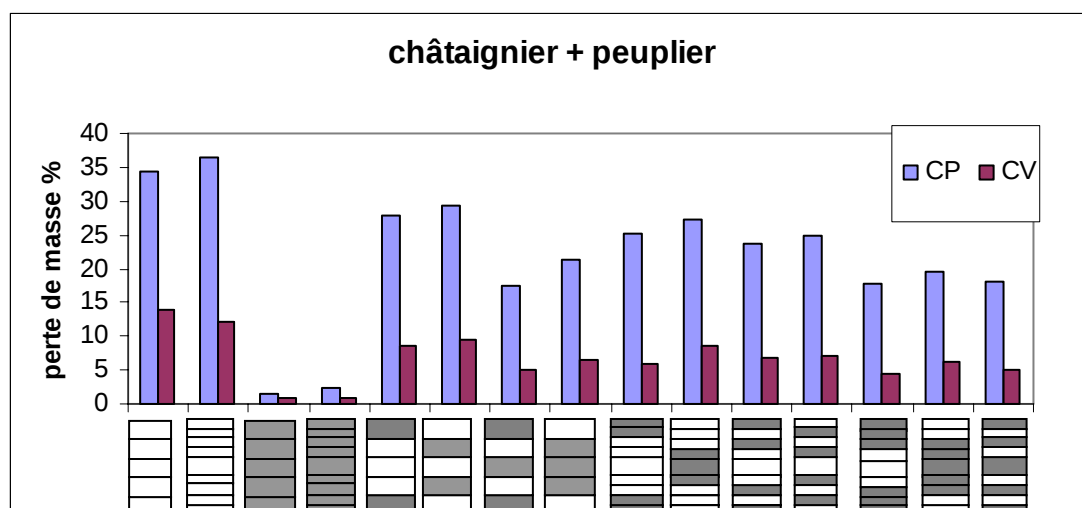


Figure 57. Les pertes de masse pour les contreplaqués purs et mélangés en châtaignier et peuplier.

En moyenne les mélanges de peuplier et de châtaignier ont une résistance proche de la prédiction que l'on peut faire au prorata des durabilités des contreplaqués purs correspondants (5 ou 9 plis) de chaque constituant.

Dans les tableaux 15 et 16, nous avons présenté les analyses de variance pour déterminer la signification des effets des facteurs « nombre de plis » (soit un contreplaqué en 5 plis ayant 4 plans de colle MUF soit, pour la même épaisseur, en 9 plis avec 8 plans de colle), «pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durables» (0% pur non durable, 40% des plis durables, 60% des plis durables, et 100% pur durable), et «durabilité des plis d'extérieur» (soit ayant deux couches durables en extérieur soit ayant deux couches non durables en extérieur).

Analyse de variance du mélange « châtaignier + peuplier » (<i>Coriolus versicolor</i>)				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	seuil de signification
Nombre de plis (A) 5 / 9	1	21	25	***
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%	3	191	220	***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable	1	21	24	***
Interaction A * B	3	4	5	**
Interaction A * C	1	0.003	0.003	NS
Interaction B * C	1	0.3	0.3	NS

Interaction A * B * C	1	0.001	0.001	NS
Erreur	78	1		
Total	90			

Tableau 15. Résultats des analyses de variance des effets de « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durables », « durabilité de surface du panneau » et de leurs interactions sur le paramètre perte de masse des contreplaqués en mélange de peuplier et de châtaignier vis-à-vis de *C. versicolor* (** = différence significative au seuil de 0.1%, * = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, 10% = au seuil de 10%, NS = non significatif).

Analyse de variance du mélange « châtaignier + peuplier » (<i>Coniophora puteana</i>)				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	seuil de signification
Nombre de plis (A) 5 / 9	1	3.0	0.4	NS
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%	4	1342.8	174.7	***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable	1	44.5	5.8	*
Interaction A * B	2	30.9	4.0	*
Interaction A * C	1	17.7	2.3	NS
Interaction B * C	1	15.4	2.0	NS
Interaction A * B * C	1	0.2	0.02	NS
Erreur	77	7.7		
Total	89			

Tableau 16. Résultats des analyses de variance des effets « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durables » et « durabilité de surface du panneau » et de leurs interactions sur le paramètre de perte de masse des contreplaqués en mélange de peuplier et de châtaignier vis-à-vis de *C. puteana* (*** = différence significative au seuil de 0.1%, ** = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, 10% = au seuil de 10%, NS = non significatif).

La virulence observée de *C. versicolor* est complètement différente de celle de *C. puteana*. D'un côté on a trouvé une augmentation intéressante de la résistance des mélanges contre *C. versicolor*, en particulier le panneau 9 avec moins de 5 % de perte de masse qui se place dans le classement très durable. De l'autre côté on a observé une forte dégradation des contreplaqués de ce mélange vis-à-vis de *C. puteana* qui engendre une perte de masse 2 à 2.5 fois plus grande que vis-à-vis de *C. versicolor*.

Ce résultat a été obtenu également pour tous les autres mélanges réalisés dans cette étude.

L'analyse de variance a révélé que dans le cas d'attaque par *C. versicolor* l'effet de la colle (nombre de plis) a été significatif, ce qui n'est pas le cas pour l'attaque par *C. puteana*.

L'effet de pourcentage des plis durables par rapport aux plis non durables a été trouvé fortement significatif pour les deux agents de dégradation. L'effet de durabilité des couches extérieures (durable ou non durable), a été trouvé très significatif dans le cas de *C. versicolor* et significatif au seuil de 5% dans le cas de *C. puteana*. Les interactions entre facteurs ont été trouvées non significatives à part l'interaction entre le nombre de plis et le pourcentage des plis durables (A * B) dans les deux cas de *C. versicolor* et *C. puteana*.

Les contreplaqués les plus résistants en 5 plis et en 9 plis contre l'attaque de *C. puteana* et *C. versicolor* respectivement sont présentés dans la figure 58.

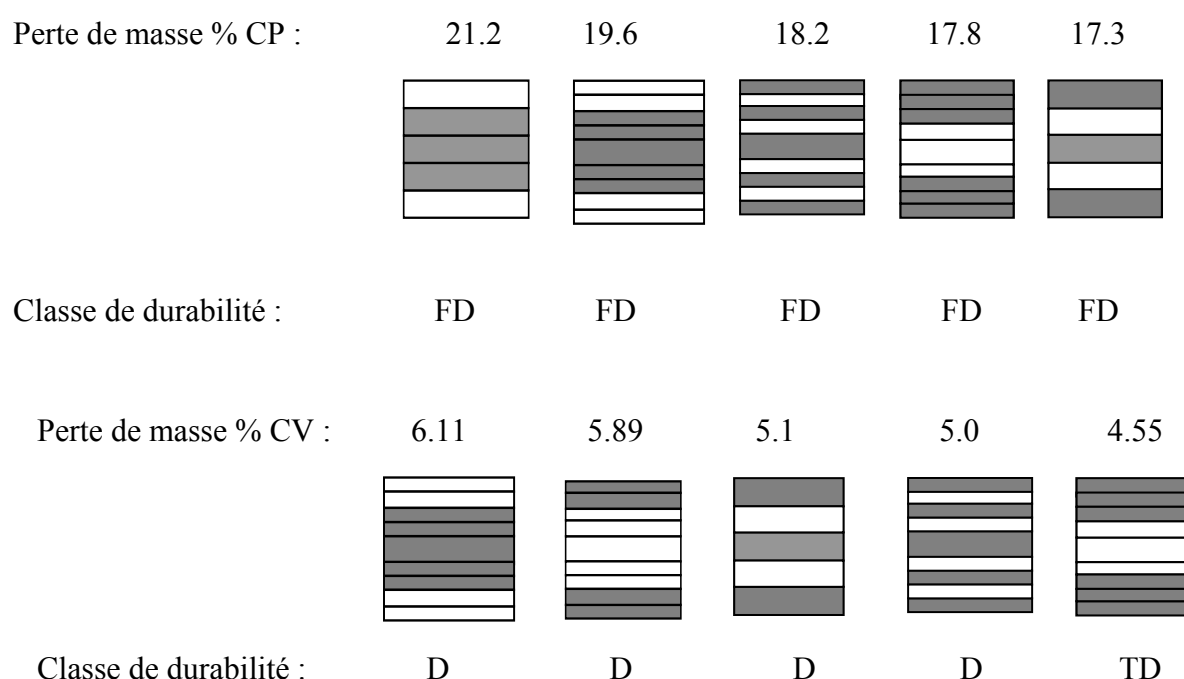


Figure 58. Les contreplaqués les plus résistants à l'attaque de *C. versicolor* et *C. puteana* pour le mélange du châtaignier et du peuplier (FD : faiblement durable, D : durable, TD : très durable)

3.2.2.2 Les contreplaqués en mélange de châtaignier et de hêtre

Les résultats de perte de masse de ces contreplaqués en 5 plis et en 9 plis vis-à-vis de *C. versicolor* et de *C. puteana* respectivement sont présentés dans le tableau 2 d'annexe B et la figure 59.

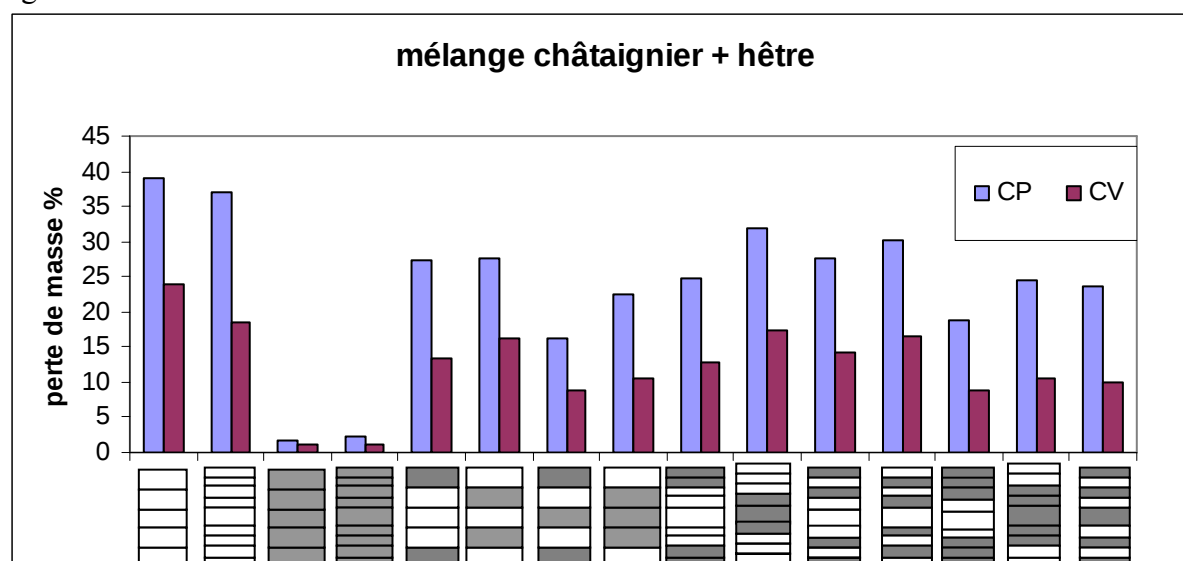


Figure 59. Les pertes de masse pour les contreplaqués purs et mélangés de châtaignier et de hêtre.

En moyenne les mélanges de hêtre et de châtaignier ont une résistance proche de la prédiction que l'on peut faire au prorata des durabilités des contreplaqués purs correspondants (5 ou 9 plis) de chaque constituant.

Analyse de variance du mélange « châtaignier + hêtre » (<i>Coriolus versicolor</i>)				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
Nombre de plis (A) 5 / 9	1	16.7	5.7	*
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%	3	585.3	198.7	***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable	1	72.3	24.6	***
Interaction A * B	1	12.2	4.1	*
Interaction A * C	3	23.1	7.8	**
Interaction B * C	1	0.1	0.04	NS
Interaction A * B * C	1	1.9	0.6	NS
Erreur	78	2.9		
Total	90			

Tableau 17. Résultats des analyses de variance des effets « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durables » et « durabilité de surface du panneau » et de leurs interactions sur le paramètre « perte de masse » des contreplaqués en mélange de hêtre et de châtaignier vis-à-vis de *C. versicolor* (*** = différence significative au seuil de 0.1%, ** = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, NS= non significatif).

Analyse de variance du mélange « châtaignier + hêtre » (<i>Coniophora puteana</i>)				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
Nombre de plis (A) 5 / 9	1	19.5	3.0	10%
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%	3	1770.8	268.4	***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable	1	123.5	18.7	**
Interaction A * B	3	19.0	2.9	*
Interaction A * C	1	1.4	0.2	NS
Interaction B * C	1	45.0	6.8	*
Interaction A * B * C	1	25.5	3.9	10%
Erreur	75	6.6		
Total	87			

Tableau 18. Résultats des analyses de variance des effets « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durables » et «durabilité de surface du panneau » et de leurs interactions sur le paramètre de perte de masse des contreplaqués en mélange de hêtre et de châtaignier vis-à-vis *C. puteana* (*** = différence significative au seuil de 0.1%, ** = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, 10%= au seuil de 10%, NS= non significatif).

Selon l'analyse de variance, l'effet de la colle, dans le cas de *C. versicolor* a été trouvé significatif au seuil de 5%, dans le cas de *C. puteana* cet effet a été trouvé significatif à un faible seuil de signification de 10%. Ce qui confirme la sensibilité de *C. versicolor* à la colle MUF. L'effet pourcentage des plis durables par rapport aux plis non durables a été trouvé fortement significatif vis-à-vis des deux agents de dégradation. L'effet de durabilité des couches extérieures, durable ou non durable, sur le paramètre de perte de masse, a été trouvé significatif au seuil de 0.1% dans le cas de *C. versicolor* et au seuil de 1% dans le cas de *C. puteana* respectivement.

Les interactions des facteurs variables pour *C. versicolor* présentent des effets significatifs entre nombres des plis et pourcentage des plis durable (A * B) ainsi qu'entre nombre de plis et durabilité des couches extérieure (A * C). Pour *C. puteana* l'interaction entre A et B et également entre B et C ont été trouvés significatifs au seuil de 5 % et entre tous les trois facteurs variables de cette étude (A*B*C) à seuil de 10%.

Les contreplaqués les plus résistants contre l'attaque de *C. puteana* parmi ce mélange, pour les deux champignon sont les contreplaqués ayant 60 % des plis durables et des couches durables en extérieur du panneau.

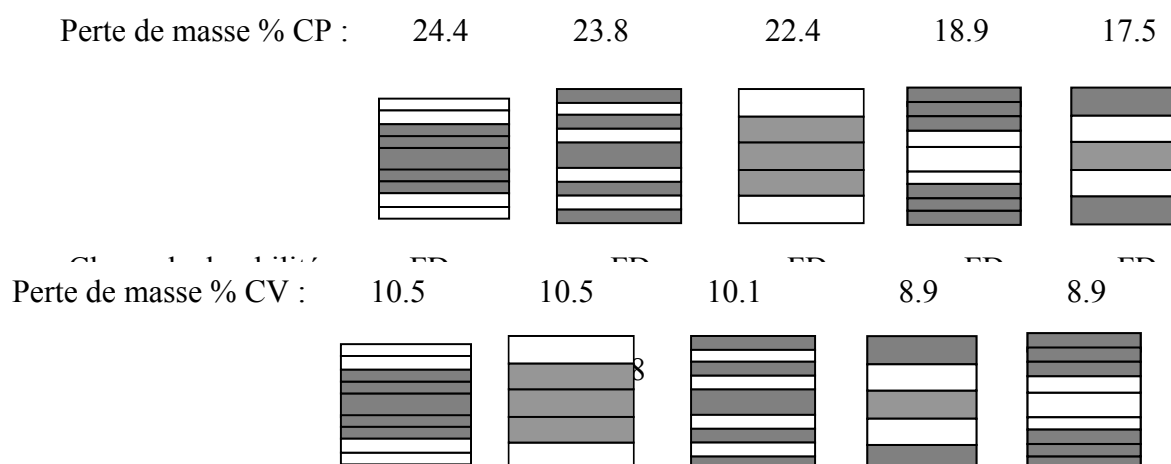


Figure 60. Les contreplaqués les plus résistants du mélange de châtaignier et de hêtre.
CP : *C. puteana*, CV : *C. versicolor* (FD : faiblement durable, MD : Moyennement durable, D : durable).

3.2.2.2.3 Les contreplaqués en mélange d'aubier et de duramen de cèdre

Les résultats de perte de masse de ces contreplaqués en 5 plis et en 9 plis vis-à-vis de *C. versicolor* et de *C. puteana* sont présentés dans le tableau 3 d'annexe B et la figure 61.

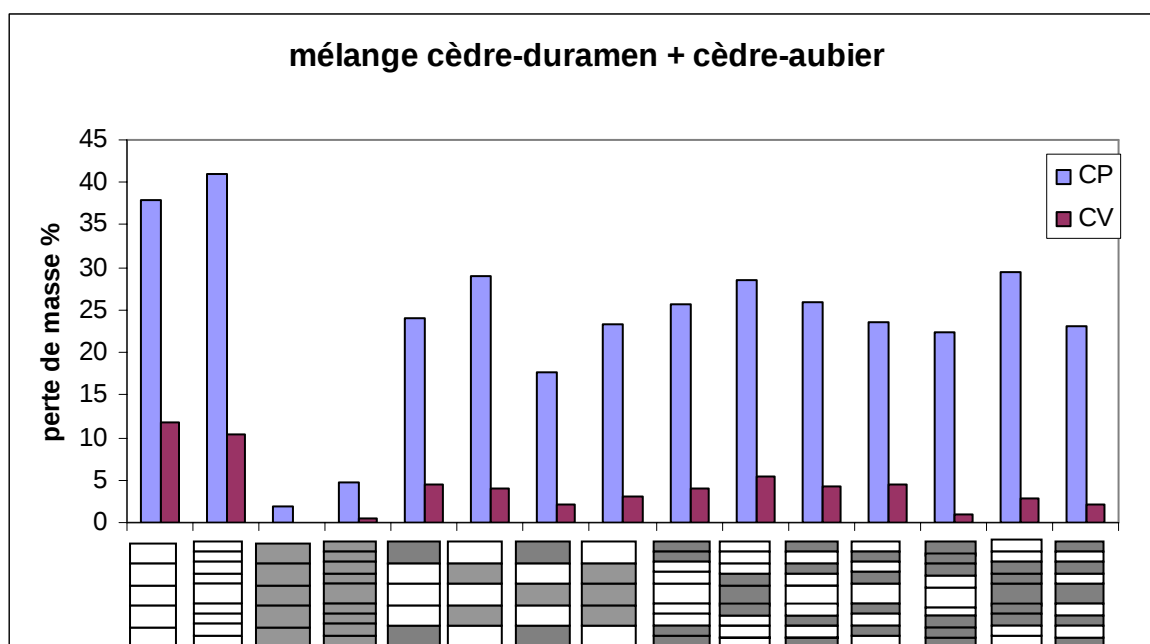


Figure 61. Les pertes de masse pour les contreplaqués purs et mélangés de cèdre-duramen et de cèdre-aubier.

En moyenne les mélanges d'aubier et de duramen de cèdre sont plus résistants que la prédiction que l'on peut faire au prorata des durabilités des contreplaqués purs correspondants (5 ou 9 plis) de chaque constituant.

Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
Nombre de plis (A) 5 / 9	1	0.8	0.6	NS
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%	3	185.2	137.6	***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable	1	7.2	5.3	*
Interaction A * B	3	3.3	2.4	10%
Interaction A * C	1	1.9	1.4	NS
Interaction B * C	1	3.7	2.8	10%
Interaction A * B * C	1	0.8	0.6	NS
Erreur	78	1.3		
Total	90			

Tableau 19. Résultats des analyses de variance des effets de « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durables » et « durabilité de surface du panneau » et ces de leurs interactions sur le paramètre de perte de masse des contreplaqués en mélange de cèdre duramen et de cèdre aubier vis-à-vis de *C. versicolor* (*** = différence significative au seuil de 0.1%, ** = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, 10% = au seuil de 10%, NS = non significatif).

Analyse de variance « cèdre duramen + cèdre aubier » (<i>Coniophora puteana</i>)				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
Nombre de plis (A) 5 / 9	1	65.0	5.9	*
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%	3	1578.2	144.2	***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable	1	188.8	17.2	***
Interaction A * B	3	34.3	3.1	*
Interaction A * C	1	44.8	4.1	*
Interaction B * C	1	13.4	1.2	NS
Interaction A * B * C	1	5.9	0.5	NS
Erreur	75	10.9		
Total	87			

Tableau 20. Résultats des analyses de variance des effets « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durables » et « durabilité de surface du panneau » et de leurs interactions sur le paramètre de perte de masse des contreplaqués en mélange de cèdre duramen et de cèdre aubier vis-à-vis de *C. puteana* (*** = différence significative au seuil de 0.1%, ** = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, 10% = au seuil de 10%, NS = non significatif).

Selon l'analyse de variance, l'effet de la colle, n'a pas été significatif dans le cas de *C. versicolor* et au contraire il a été trouvé significatif dans le cas de *C. puteana*. Par contre, l'effet du pourcentage des plis durables a été trouvé significatif pour tous les deux agents de

dégradation. L'effet de durabilité des couches extérieures, durable ou non durable, sur la perte de masse, a été trouvé significatif au seuil de 5 % dans le cas de *C. versicolor* et au seuil de 1% dans le cas de *C. puteana*.

Les interactions des facteurs variables de nombre de plis et pourcentage des plis durables (A * B) et l'interactions entre pourcentage des plis durables et durabilité des couches extérieurs (B * C) pour *C. versicolor* sont significatives à un faible seuil de signification de 10%, mais pour *C. puteana* l'interaction de nombre de plis et pourcentage des plis durables (A * B) et l'interaction de nombre de plis et durabilité des couches extérieurs (A * C) a été trouvée significative au seuil de 5 %.

Comme il est évident dans la figure 61 la perte de masse causée par *C. puteana* est presque 3 fois plus forte que la perte de masse causée par *C. versicolor*.

Les contreplaqués avec 60 % des plis durables ayant les couches durables en extérieur du panneau on été trouvés les plus durables.

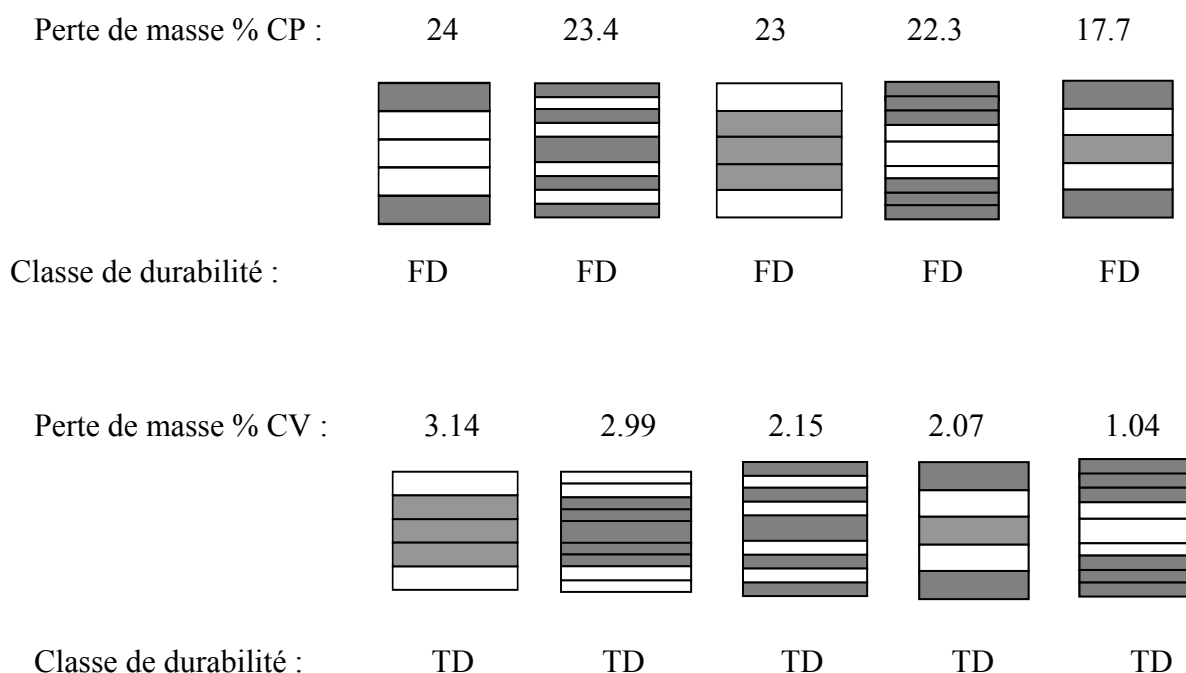


Figure 62. Les contreplaqués les plus résistants du mélange de cèdre-duramen et de cèdre-aubier (FD : faiblement durable, TD : très durable).

3.2.2.2.4 Les contreplaqués en mélange de cèdre duramen et de hêtre

Les résultats de perte de masse de ces contreplaqués en 5 plis et en 9 plis vis-à-vis de *C. versicolor* et de *C. puteana* sont présentés dans le tableau 4 d'annexe B et la figure 63.

En moyenne les mélanges de hêtre et de duramen de cèdre sont moins résistants que la prédiction que l'on peut faire au prorata des durabilités des contreplaqués purs correspondants (5 ou 9 plis) de chaque constituant.

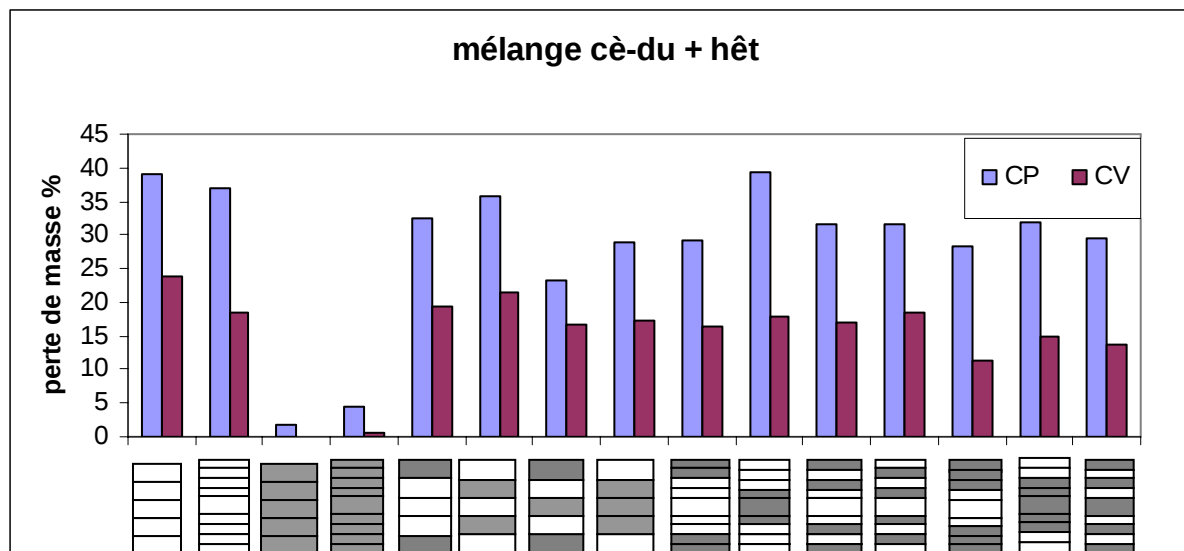


Figure 63. Les pertes de masse pour les contreplaqués purs et mélangés de cèdre-duramen et de hêtre.

Analyse de variance du mélange « cèdre duramen + hêtre » (*Corolus versicolor*)

Degré de liberté	Source	Carré de moyen	F	Seuil de Signification.
Nombre de plis (A) 5 / 9		1	149.5	22.5 ***
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%		3	828.7	124.9 ***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable				

.....Résultat-durabilité naturelle-champignons-contreplaqué.....

		1
		39.8
		6.0
		*
Interaction	A * B	
		3
		15.8
		2.4
		10%
Interaction	A * C	
		1
		1.9
		0.3
		NS
Interaction	B * C	
		1
		0.3
		0.0
		NS
Interaction	A * B * C	
		1
		4.1
		0.6
		NS
Erreur		
		77
		6.6
Total		
		89

Tableau 21. Résultats des analyses de variance des effets « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durables » et « durabilité de surface du panneau » et de leurs interactions sur le paramètre de perte de masse des contreplaqués en mélange de cèdre duramen et de hêtre vis-à-vis de *C. versicolor* (*** = différence significative au seuil de 0.1%, ** = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, 10% = au seuil de 10%, NS = non significatif).

Analyse de variance pour cèdre duramen + hêtre (<i>Coniophora puteana</i>)

Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
Nombre de plis (A) 5 / 9	1	7.1	1.0	NS
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%	3	1932.7	258.7	***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable	1	223.6	29.9	**
Interaction A * B	3	38.8	5.2	**
Interaction A * C	1	1.7	0.2	NS
Interaction B * C	1	0.9	0.1	NS
Interaction A * B * C	1	14.1	1.9	NS
Erreur	69	7.5		
Total	81			

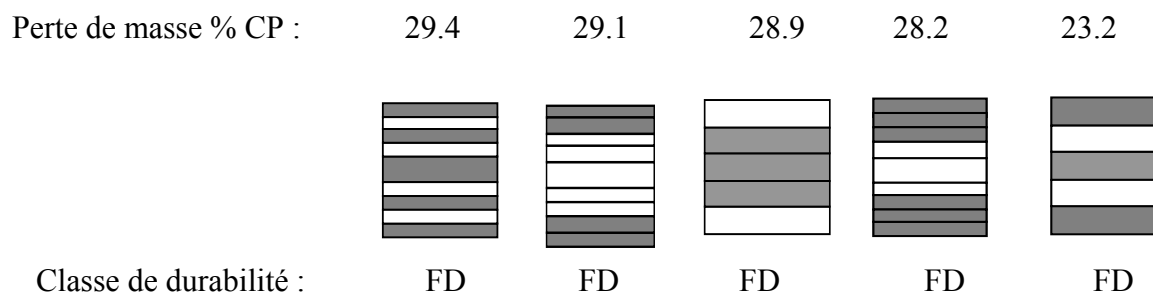
Tableau 22. Résultats des analyses de variance des effets « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durable » et « durabilité de surface du panneau » et de leurs interactions sur le paramètre de perte de masse des contreplaqués en mélange de cèdre duramen et de hêtre vis-à-vis de *C. puteana* (*** = différence significative au seuil de 0.1%, ** = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, 10% = au seuil de 10%, NS = non significatif).

Les analyses de variance de ce mélange présentent un effet significatif de nombre de plis pour *C.versicolor* (seuil de 0.1%). Cet effet n'a pas été significatif pour *C. puteana*. L'effet de pourcentage des plis durables a été trouvé significatif pour les deux champignons d'essais.

L'effet de la durabilité des couches extérieures du panneau (durable ou non durable) a été trouvé significatif également pour *C.versicolor* et *C. puteana* mais avec un seuil de signification plus important chez *C. puteana*.

L'interaction entre les facteurs ne présente qu'une seule interaction significative entre le nombre de plis et le pourcentage des plis durables (A * B) pour tous les champignons.

Les contreplaqués les plus résistants contre l'attaque de *C. versicolor* et *C. puteana* sont présentés dans la figure 64.



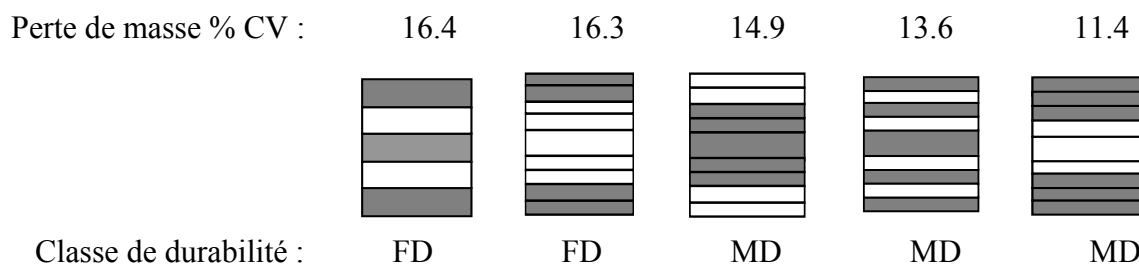


Figure 64. Les contreplaqués les plus résistants du mélange de cèdre-duramen et de hêtre (FD : faiblement durable, MD : moyennement durable).

3.2.2.2.5 Les contreplaqués en mélange de cèdre duramen et de peuplier

Les résultats de perte de masse de ces contreplaqués en 5 plis et en 9 plis vis-à-vis de *C. versicolor* et de *C. puteana* sont présentés dans le tableau 5 d'annexe B et la figure 65.

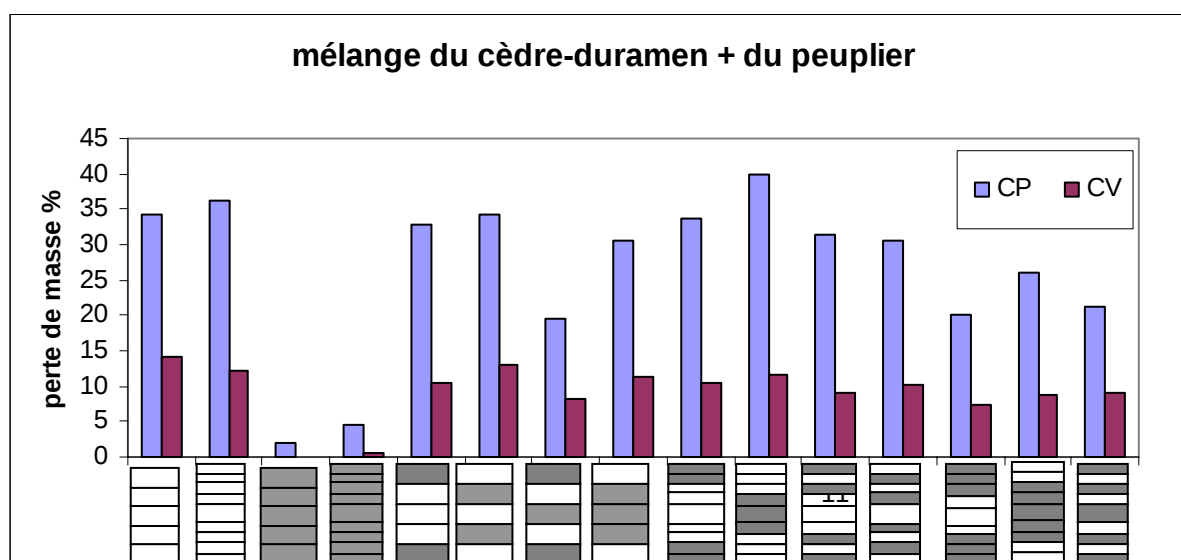


Figure 65. Les pertes de masse pour les contreplaqués purs et mélangés de cèdre-duramen et de peuplier.

En moyenne les mélanges de peuplier et de duramen de cèdre sont aussi moins résistants que la prédiction que l'on peut faire au prorata des durabilités des contreplaqués purs correspondants (5 ou 9 plis) de chaque constituant.

Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
Nombre de plis (A) 5 / 9	1	32.1	12.0	**
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%	3	271.3	101.2	***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable	1	29.6	11.0	**
Interaction A * B	3	1.4	0.5	NS
Interaction A * C	1	19.4	7.3	**
Interaction B * C	1	0.9	0.3	NS
Interaction A * B * C	1	12.4	4.6	*
Erreur	77	2.7		
Total	89			

Tableau 23. Résultats des analyses de variance des effets « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durables » et « durabilité de surface du panneau » et de leurs interactions sur le paramètre de perte de masse des contreplaqués en mélange de cèdre duramen et de peuplier vis-à-vis de *Coriolus versicolor* (*** = différence significative au seuil de 0.1%, ** = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, 10% = au seuil de 10%, NS = non significatif).

Analyse de variance pour cèdre duramen + peuplier (<i>Coniophora puteana</i>)				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
Nombre de plis (A) 5 / 9	1	1.6	0.2	NS
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%	3	2288.0	231.1	***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable	1	224.7	22.7	***
Interaction A * B	3	14.3	1.4	NS
Interaction A * C	1	16.0	1.6	NS
Interaction B * C	1	278.6	28.1	***
Interaction A * B * C	1	51.2	5.2	*
Erreur	76	9.9		
Total	88			

Tableau 24. Résultats des analyses de variance des effets « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durable » et « durabilité de surface du panneau » et de leurs interactions sur le paramètre de perte de masse des contreplaqués en mélange de cèdre duramen et de peuplier vis-à-vis de *C. puteana* (*** = différence significative au seuil de 0.1%, ** = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, 10% = au seuil de 10%, NS = non significatif).

Les analyses de variance ont révélé un effet significatif du nombre de plis sur le paramètre de perte de masse dans le cas de *C.versicolor* seulement, une fois encore la confirmation de

sensibilité de *C. versicolor* à la colle MUF. L'effet du pourcentage des plis durables a été trouvé fortement significatif pour *C. versicolor* ainsi que pour *C. puteana*. L'effet de durabilité des couches d'extérieur du panneau également a été trouvé significatif au seuil de 1% pour *C.versicolor* et de 0.1% pour *C. puteana*.

Pour *C. versicolor* l'interaction du nombre de plis et de la durabilité des couches extérieures (A * C) présente un seuil de signification de 1% et l'interaction entre trois facteurs variables de cette étude (A * B * C) également a été trouvé significatif au seuil de 5 %.

Pour *C. puteana* l'interaction entre pourcentage des plis durables et durabilité des couches d'extérieurs (B * C) a été trouvée fortement significative ainsi que l'interaction des 3 facteurs de nombre de plis, de pourcentage des plis durable et de durabilité des plis durables, à un seuil de signification de 1%.

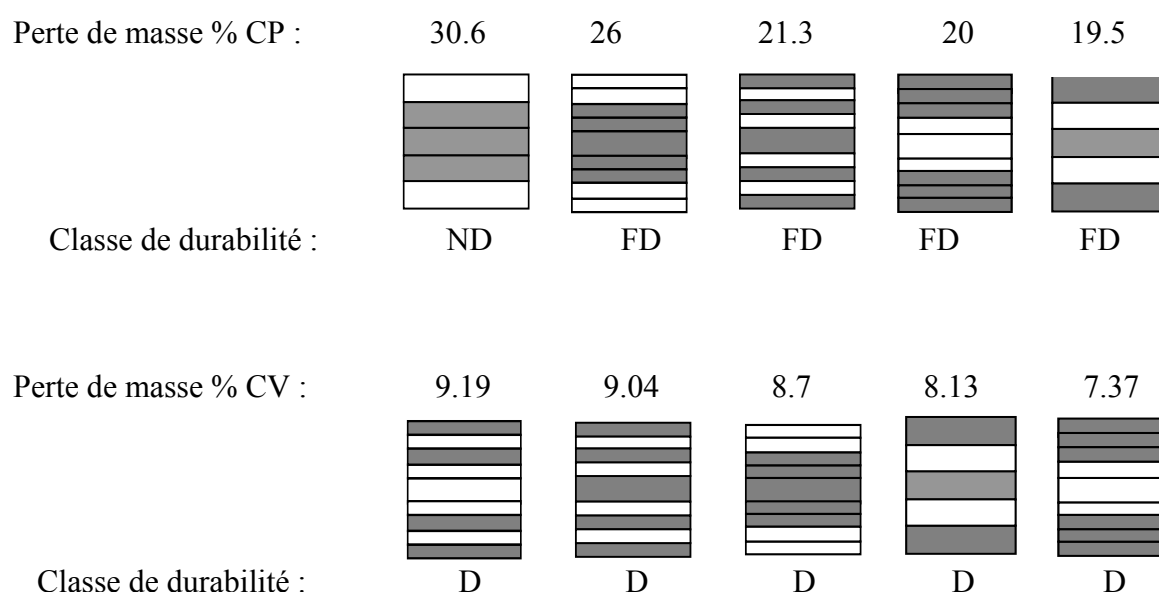


Figure 66. Les contreplaqués les plus résistants du mélange de cèdre-duramen et de peuplier (ND : non durable, FD : faiblement durable, D : durable).

3.2.2.2.6 Les contreplaqués en mélange d'aubier et de duramen de cyprès

Les résultats de perte de masse de ces contreplaqués en 5 plis et en 9 plis vis-à-vis de *C. versicolor* et de *C. puteana* sont présentés dans le tableau 6 d'annexe B et figure 67.

En moyenne les mélanges d'aubier et de duramen de cyprès sont plus résistants que la prédiction que l'on peut faire au prorata des durabilités des contreplaqués purs correspondants (5 ou 9 plis) de chaque constituant, comme c'était le cas pour le cèdre.

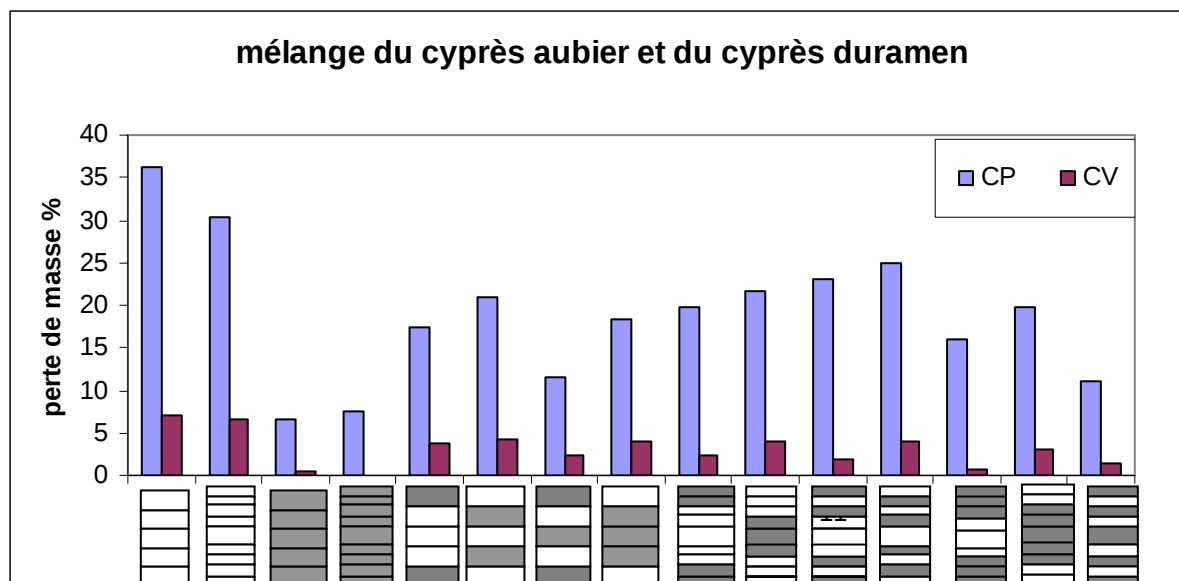


Figure 67. Les pertes de masse pour les contreplaqués purs et mélangés de cyprès-duramen et de cyprès-aubier.

Analyse de variance pour cyprès duramen + cyprès aubier (<i>Coriolus versicolor</i>)				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
Nombre de plis (A) 5 / 9	1	10.8	6.6	*
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%	3	38.2	23.3	***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable	1	29.4	17.9	***
Interaction A * B	3	1.4	0.9	NS
Interaction A * C	1	3.2	1.9	NS
Interaction B * C	1	1.5	0.9	NS
Interaction A * B * C	1	0.3	0.2	NS
Erreur	74	1.6		
Total	86			

Tableau 25. Résultats des analyses de variance des effets « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durables » et «durabilité de surface du panneau » et de leurs interactions sur le paramètre de perte de masse des contreplaqués en mélange de cyprès duramen et de cyprès aubier vis-à-vis de *C. versicolor* (*** = différence significative au seuil de 0.1%, ** = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, 10% = au seuil de 10%, NS = non significatif).

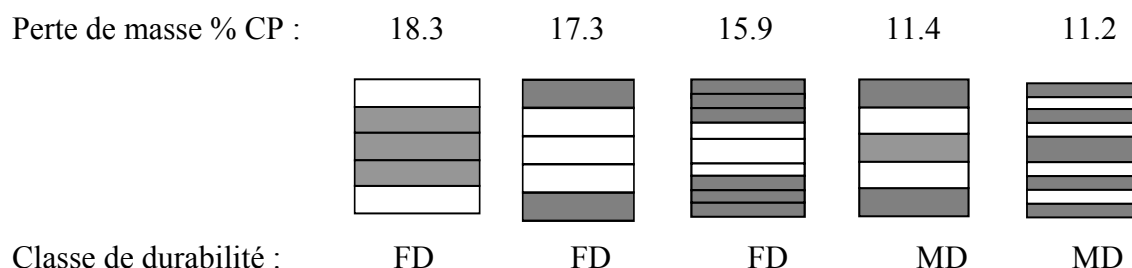
Analyse de variance pour cyprès duramen + cyprès aubier (<i>Coniophora puteana</i>)				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
Nombre de plis (A) 5 / 9	1	2.7	0.3	NS
Pourcentage de plis durables (B) 0%,40%,60%, et 100%	3	738.2	79.1	***
Surfaces de panneau(C) durable / non durable	1	310.6	33.3	***
Interaction A * B	3	51.0	5.5	NS
Interaction A * C	1	6.1	0.7	NS
Interaction B * C	1	59.0	6.3	*
Interaction A * B * C	1	1.9	0.2	NS
Erreur	75	9.334710742		
Total	87			

Tableau 26. Résultats des analyses de variance des effets « nombre de plis », « pourcentage des plis durables intégrés aux plis non durables » et « durabilité de surface du panneau » et de leurs interactions sur le paramètre de perte de masse des contreplaqués en mélange de cyprès duramen et de cyprès aubier vis-à-vis de *C. puteana* (*** = différence significative au seuil de 0.1%, ** = au seuil de 1%, * = au seuil de 5%, 10% = au seuil de 10%, NS = non significatif).

Parmi tous les mélanges c'est le seul qui s'est placé dans la classe moyennement durable avec les deux panneaux numéro 3 et 11 ayant 60 % des plis durables et les couches durables en extérieur du panneau.

Selon l'analyse de variance, l'effet de la colle a été confirmé contre l'activité de *C. versicolor* et l'inverse sans influence sur l'activité de *C. puteana*. Comme tous les autres panneaux l'effet de pourcentage des plis durable a été trouvé fortement significatif pour *C. versicolor* et pour *C. puteana*. Le même résultat a été trouvé sur l'effet de durabilité des couches.

Nous n'avons trouvé aucun effet significatif pour l'interaction des facteurs variables dans le cas de *C. versicolor*, mais dans le cas de *C. puteana* deux interactions de nombre de plis durables et de pourcentage des plis durable (A * B) ainsi que de pourcentage de plis durables et de durabilité des couches extérieurs (B * D) ont été trouvés significatives.



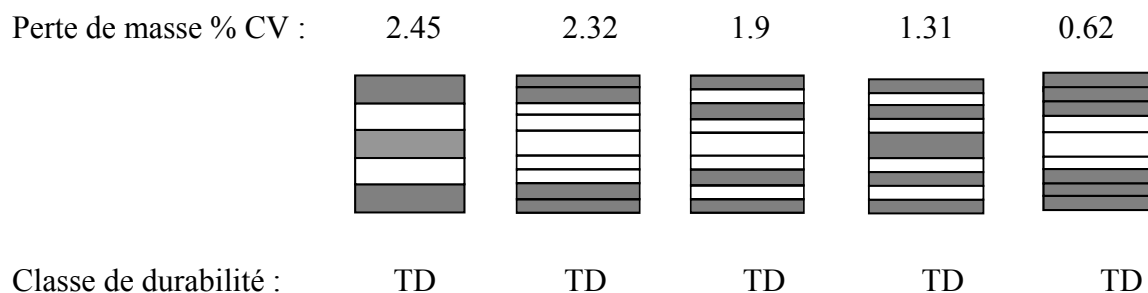


Figure 68. Les contreplaqués les plus résistants du mélange de cyprès-duramen et de cyprès-aubier. (FD : faiblement durable, MD : moyennement durable TD : très durable).

3.2.2.3 Les analyses de variance confondue pour tous les mélanges réalisés

L'effet de la colle

Les résultats des analyses de variance confondue des 6 mélanges réalisés pour l'effet de nombre de plis ou l'effet de la colle pour tous les deux champignons d'essai, *C. puteana* et *C. versicolor* sont présentés respectivement dans les tableaux suivants :

Analyse de variance pour tous les mélanges confondus vis-à-vis <i>C. puteana</i>				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
Nombre de plis 5/9	1	189.6	2.3	NS
Erreur	464	82.3		
Total	466			

Tableau 27. Résultats des analyses de variance de l'effet de nombre de plis vis-à-vis de *C. puteana*.

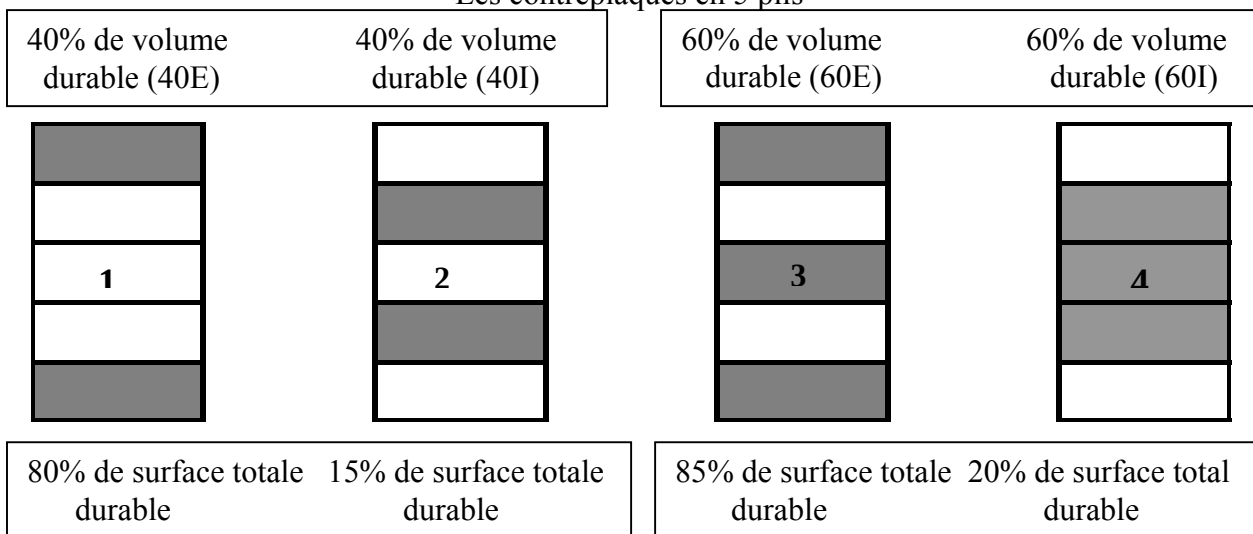
Analyse de variance pour tous les mélanges confondus vis-à-vis <i>C. versicolor</i>				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
Nombre de plis 5/9	1	84.4	2.4	NS
Erreur	471	35.4		
Total	473			

Tableau 28. Résultats des analyses de variance de l'effet de nombre de plis vis-à-vis de *C. versicolor*.

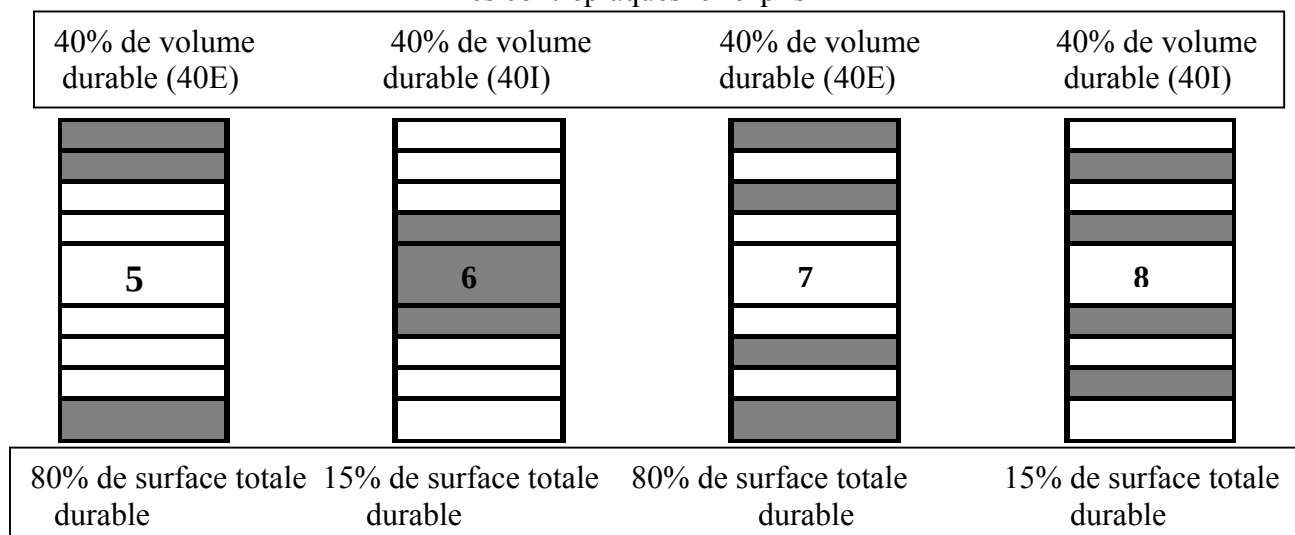
Les résultats des analyses de variance montrent que dans le cas des mélanges d'essences durable et non durable et pour les deux champignons d'essai, l'effet de la colle sur la perte de masse est non significatif.

L'effet de la surface totale durable ou non durable d'éprouvette

Les contreplaqués en 5 plis



Les contreplaqués en 9 plis



60% de volume durable (60E)	60% de volume durable (60I)	60% de volume durable (60E)
-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

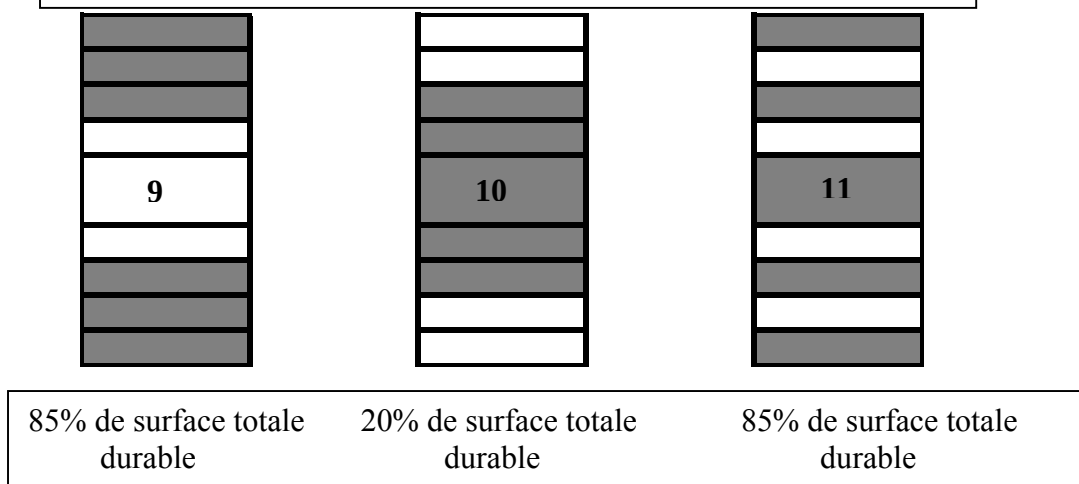


Figure 69. Comparaison entre volume et surface durable des différents contreplaqués en 5

et en 9 plis (E : Externe et I : Interne).

L'effet de la durabilité des deux couches extérieures du contreplaqué (durables ou non durables) a été significatif pour tous les mélanges réalisés. Pour une même proportion de plis durables en utilisant les plis durables comme couches d'extérieur on peut atteindre à une perte de masse significativement inférieure. Egalement nous avons trouvé un effet significatif de pourcentage des plis durables utilisés dans le panneau. Ce résultat nous conduit d'abord à diviser chaque proportion de volume du bois durable d'un panneau en deux positions externe ou interne.

Dans la figure 69 le volume des plis durables est présenté avec sa position externe E ou interne I. De plus nous avons présenté la surface totale durable de tous les modèles réalisés pour comparer avec le volume d'une éprouvette normalisée conformément à EN 12038 de dimension 50 mm * 50 mm * épaisseur de panneau (13mm).

Si l'on prend en compte le volume des plis durables on trouve deux groupes de 40% et 60% de volume durable pour les mélanges réalisés. Dans le cas des contreplaqués purs on peut ajouter 0% des plis durables et 100% des plis durables (en volume ou en surface). Mais si l'on prend en compte à la fois le volume et la surface externe de l'éprouvette, on trouve quatre groupes de 40%I, 40%E, 60%I et 60%E dans chaque mélange réalisé.

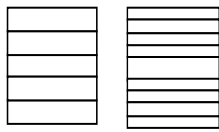
A cet égard pour le volume 40 % des plis durables on aura deux groupes différents, un groupe des contreplaqués numéros 1, 5 et 7 composés pour 80% de ses surfaces par les plis durables et 20 % de ses surfaces par les plis périssables appelé le groupe de 40%E et un autre groupe des contreplaqués numéros 2, 6 et 8 composés pour 15 % de ses surfaces par les plis durables et 85% de ses surfaces par les plis périssables en surface, appelé le groupe de 40%I.

De la même manière pour le volume 60 % de plis durables on peut diviser la perte de masse entre deux groupes de contreplaqués suivants : un groupe des contreplaqués numéros 3, 9 et 11 composés pour 85% de ses surfaces par les plis durables et 15 % de ses surfaces par les plis périssables appelé le groupe de 60%E et d'autre groupe les contreplaqués numéros 4, 10 composés pour 20 % de ses surfaces par les plis durables et 80% de ses surfaces par les plis périssable, en surface, appelé le groupe de 60%I.

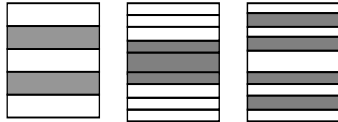
Nous avons étudié l'effet de ce nouveau regroupement sur le paramètre de perte de masse pour tous les mélanges réalisés confondus.

Ce regroupement comprend 6 différents niveaux dans cette étude :

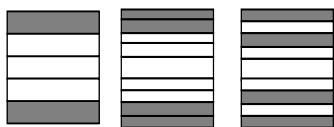
0 % : L'éprouvette est constituée par les plis non durables



40%I (15% de surface de l'éprouvette est couverte par les plis durables)



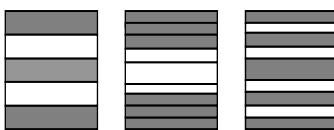
40%E (80% de surface de l'éprouvette est couverte par les plis durables)



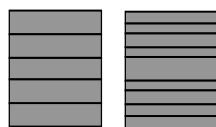
60%I (20% de surface de l'éprouvette est couverte par les plis durables)



60%E (85% de surface de l'éprouvette est couverte par les plis durables)



100% : L'éprouvette est constituée par les plis durables



Les résultats pour *C. versicolor* et *C. puteana* son présentés respectivement dans les tableaux suivants.

Analyse de variance pour tous les mélanges confondus vis-à-vis <i>C. versicolor</i>				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
0 / 40%I / 40%E / 60%I / 60%E / 100	5	847	31	* * *
Erreur	469	27.1	27.1	
Total	475			

Tableau 29. Résultats des analyses de variance de l'effet de surface durable du panneau vis-à-vis de *C. versicolor* (*** = différence significative au seuil de 0.1%).

Analyse de variance pour tous les mélanges confondus vis-à-vis <i>C. puteana</i>				
Source	Degré de liberté	Carré de moyen	F	Seuil de signification
0 / 40%I / 40%E / 60%I / 60%E / 100	5	5173	191	* * *
Erreur	459	27		
Total	465			

Tableau 30. Résultats des analyses de variance de l'effet de surface durable du panneau vis-à-vis de *C. puteana* (*** = différence significative au seuil de 0.1%).

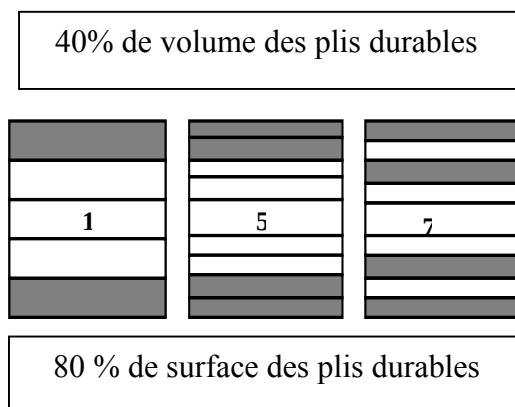
L'analyse de variance a révélé que pour les deux champignons utilisés, et pour les mélanges réalisés, l'effet de surface totale durable (ou non durable) d'une éprouvette est fortement significatif sur la perte de masse. Nous pouvons donc regrouper les modèles étudiés dans l'ordre de la résistance contre une attaque fongique, comme ci- dessous

$$0\% \text{durable} < 40\% \text{I} < 40\% \text{E} < 60\% \text{I} < 60\% \text{E} < 100\%$$

Ce résultat présente la priorité de pourcentage des plis durables présent dans un panneau par rapport au positionnement de ces couches durables (extérieur ou intérieur) : les contreplaqués ayant 40% des plis durables en extérieur du panneau sont moins durables que les panneaux ayant 60% des plis durables en intérieur du panneau. Mais dans le cas de même pourcentage des plis durables le positionnement des couches durables en extérieur du panneau confère une résistance bien supérieure par rapport au positionnement en intérieur du panneau.

Etant donné que chaque groupe des modèles présentés ci-dessus possède la même proportion en volume et en surface externe des plis durables, nous avons étudié la différence de perte de masse pour une intégration différente:

La différence entre le modèle 1, le modèle 5 et le modèle 7 :



Les analyses de variance de perte de masse de trois modèles de 1, de 5 et de 7 ayant 40% de volume durable et 80 % de surface totale de l'éprouvette couverte par les plis durables, pour les 6 mélanges réalisés confondus sont présentées dans le tableau 31.

C. puteana

degré de liberté

carré de moyen

F

seuil de signification

nombre d'éprouvette

Panneau 1/5/7

2

3.4

0.1

NS

panneau 1 n=35

Erreur

103

33.3

panneau 5 n=35

Total

106

panneau 7 n=36

C. vericolor

Panneau 1/5/7

2

14.6

0.5

NS

panneau 1 n= 34

Erreur

103

31.4

panneau 5 n= 36

Total

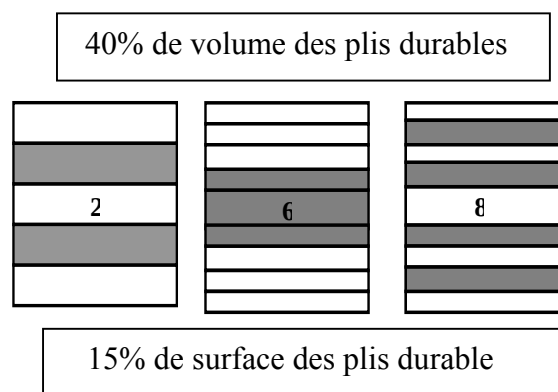
106

panneau 7 n= 36

Tableau 31. Les analyses de variance de perte de masse pour trois modèles de 1, 5 et 7 ayant 40% des plis durable et 80% de surface totale durable.

Nous n'avons pas trouvé une différence significatif entre les trois modèles qui portent de même volume des plis durables et de même surface totale couverte par les plis durables. Cette analyse de variance confondu de perte de masse de tous les mélanges réalisé confirme que ces contreplaqués ne sont pas différents en vu de perte de masse contre une attaque fongique.

La différence entre le modèle 2, le modèle 6 et le modèle 8:



Les analyses de variance de perte de masse de ces trois modèles présentes un effet significatif de modèle sur la perte de masse pour *C. puteana*. Cet effet n'a pas été significatif dans le cas de *C. versicolor* (tableau 32).

C. puteana

degré de liberté

carré de moyen

F

seuil de signification

nombre d'éprouvette

Panneau 2/6/8

2
106.7
3.2
*

panneau 2 n=35

.....Résultat-durabilité naturelle-champignons-contreplaqué.....

Erreur	102
	33.3

panneau 6 n=35

Total	105
-------	-----

panneau 8 n=35

C. versicolor

panneau 2 n=30

Panneau 2/6/8	2
	6.2
	0.2
	NS

panneau 6 n=36

Erreur	99
	38.7

panneau 8 n=36

Total	102
-------	-----

Tableau 32. Les analyses de variance de perte de masse pour trois modèles de 2, 6 et 8 ayant 40% des plis durable et 15% de surface totale durable.

Pour avoir plus de détaille sur la différence de perte de masse causé par *C. puteana* entre ces contreplaqué, nous avons fait une série d'analyse de variance deux par deux entre panneau 2 et 6, entre panneau 2 et 8 et finalement entre panneau 6 et 8 (tableau 33).

C. puteana

degré de liberté

carré de moyen

F

seuil de signification

nombre d'éprouvette

Panneau 6 / 8

1
208.7
5.8
*

panneau 6 n=35

Erreur

68
35.7

panneau 8 n=35

Total

70

Panneau 2 / 6

1
28.4
0.7
NS

panneau 2 n=35

Erreur

68
39.6

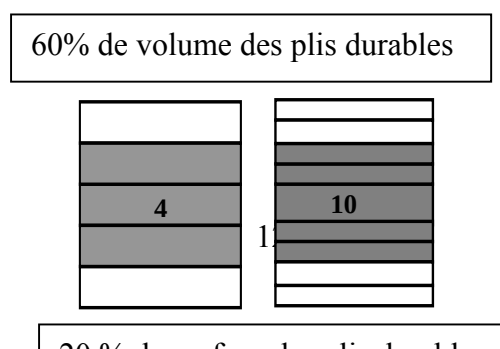
panneau 6 n=35

Total	70
Panneau 2 / 8	1
	83.0
	3.4
	10%
panneau 2 n=35	
Erreur	68
	24.6
panneau 8 n=35	
Total	70

Tableau 33. L'analyse de variance pour déterminer le seuil de signification de perte de masse entre le modèle 2, 6 et 8 pour tous les mélanges confondus.

Cette analyse de variance confirme que le modèle 8 significativement a tendance à présenter une perte de masse plus faible que le modèle 6 et de même tendance mais à un faible seuil de signification par rapport de modèle 2. Il parait que le positionnement des couches durables plus proche de surface peut jouer le rôle d'un obstacle sur le développement des mycéliums de champignons d'extérieur ver intérieur du panneau.

La différence entre le modèle 4 et le modèle 10 :



L'analyse de variance confondue de tous les mélanges réalisés entre modèle 4 et modèle 10 présente un effet non significatif entre ces deux modèles (tableau 34).

C. puteana

degré de liberté

carré de moyen

F

seuil de signification

nombre d'éprouvette

Panneau 4 / 10

10.2

0.5

NS

panneau 4 n=35

Erreur

22.2

panneau 10 n=35

Total

1

69

71

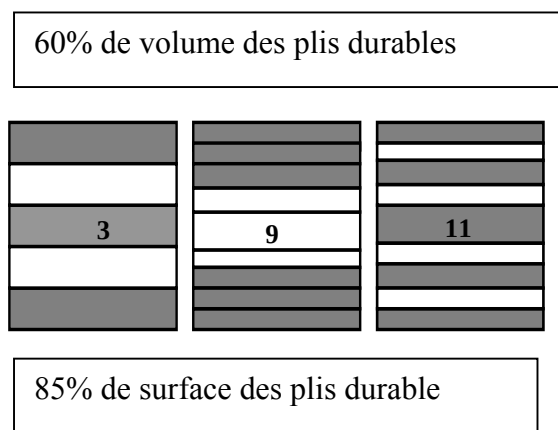
C. versicolor

Panneau 4/10			1
	18.7		
	0.83		
	NS		
panneau 4 n=36			
Erreur			68
	22.5		
panneau 10 n=34			
Total			70

Tableau 34. L'analyse de variance pour déterminer le seuil de signification de perte de masse entre le modèle 4 et 10 pour tous les mélanges confondus.

En effet la seule différence dans ce cas est le nombre de plis que son effet a été déjà trouvé non significatif pour les contreplaqués en mélanges (mais pas pour les contreplaqués purs) et pour tous les deux champignons d'essai.

La différence entre les modèle 3, 9 et 11 :



Les analyses de variance confondue de tous les mélanges a révélé qu'entre les trois modèles de 3, 9 et 10 ayant de même volume et de même surface des plis durable existe un effet significatif de modèle sur la perte de masse causé par *C. puteana*. Ces contreplaqués se comportent de même façon face à l'attaque de *C. versicolor*.

C.puteana

degré de liberté

carré de moyen

F

seuil de signification

nombre d'éprouvette

Panneau 3/9/11

2

142.3

5.6

* *

panneau 3 n=36

Erreur

102

25.5

panneau 9 n=35

Total

105

panneau 11 n=34

C.versicolor

Panneau 3/9/11

2

21

0.9

NS

panneau 3 n=36

Erreur

103

23.6

panneau 9 n=35

Total

106

panneau 11 n=35

Tableau 35. Les analyses de variance de perte de masse pour trois modèles de 3, 9 et 11 ayant 60% des plis durable et 85% de surface totale durable.

Une série d'analyse de variance confondue deux par deux est présentée dans le tableau 36 pour déterminer plus précisément l'effet de ces modèles sur la perte de masse.

<i>C. puteana</i>	degré de liberté	carré de moyen	F	seuil de signification	nombre d'éprouvette
Panneau 9 / 11	1	2.42	0.08	NS	panneau 9 n=36
Erreur	69	29.31			panneau 11 n=35
Total	71				

Panneau 3 / 9

1

187.2
9.3
* *

panneau 3 n=34

Erreur

62

20.2

panneau 9 n=30

Total

64

Panneau 3 / 11

1

234.9

	8.2	
* *		
panneau 3 n=34		
Erreur		67
	28.7	
Panneau 1 n=35		
Total		69

Tableau 36. L'analyse de variance pour déterminer le seuil de signification de perte de masse entre le modèle 9 et 11 pour tous les mélanges confondus.

Les résultats des analyses de variance de perte de masse a montré que les deux contreplaqués 9 et 11 ayant de même volume et de même surface des plis durable et en plus de même nombre de plis sont entièrement identique face à l'attaque de *C. puteana* . Par contre le contreplaqué 3 est plus résistant que les contreplaqués 9 ou 11 vis-à-vis de *C. puteana*. Encore une fois ces résultats confirment la consommation de la colle avec du bois par *C. puteana* qui cause la délamination de contreplaqués dans le cas d'une attaque plus de 10%.

Conclusion

Les résultats nous montrent des différences sensibles entre le bois massif et les contreplaqués pour la résistance contre l'attaque des champignons. On pouvait attendre une diminution de perte de masse en transformant le bois massif en contreplaqué. Les résultats obtenus pour *C. versicolor* présentent une légère diminution de perte de masse entre les trois états de bois massif, de contreplaqué pur en 5 plis et de contreplaqué pur en 9 plis, surtout pour les bois non durables, ce qui confirmerait un effet positif de la colle dans ce cas.

Par contre, pour *C. puteana* c'est plutôt l'inverse qui est observé, surtout pour les bois durables, ce qui laisserait supposer que la colle elle-même est attaquée par le champignon dans ces conditions. Ceci est conforté par les nombreuses observations de délamination après passage à l'étuve des contreplaqués en mélange soumis à *Coniophora* (fig. 70), alors qu'aucune délamination n'est observée en pareil cas pour les contreplaqués attaqués par *Coriolus*.

Concernant l'intérêt des mélanges entre essences durables et non durables dans le contreplaqué, le fait de mélanger diminue systématiquement le niveau de perte de masse par rapport au contreplaqué pur en essences non durables. Cette augmentation de la résistance est corrélée positivement au pourcentage des plis durables dans un contreplaqué, pour tous les cas étudiés et les deux types de pourriture.

Elle est aussi corrélée à la durabilité des deux couches extérieures du panneau, le positionnement de plis durables en extérieur augmente la durabilité en même temps que cette surface externe, à composition volumique identique entre plis durables et non durables.

Le nombre de plis dans le cas des mélanges n'a pas un effet significatif (ni positif ni négatif) sur la perte de masse des contreplaqués.

La surface totale (toutes les 6 faces) durable ou non durable d'une éprouvette peut expliquer à la fois les deux effets de pourcentage (volumique) de plis durables et de durabilité des deux couches extérieures du panneau. Nous avons trouvé que ce critère est fortement corrélé à la perte de masse pour les deux champignons et les six groupes de mélanges réalisés.

Les résultats montrent que l'effet de durabilité des couches extérieures par rapport au pourcentage des plis durables a un effet secondaire. Un contreplaqué ayant 60% de plis durables même en intérieur du panneau a toujours une perte de masse moins importante qu'un panneau ayant 40% de plis durables superposés en extérieur du panneau.

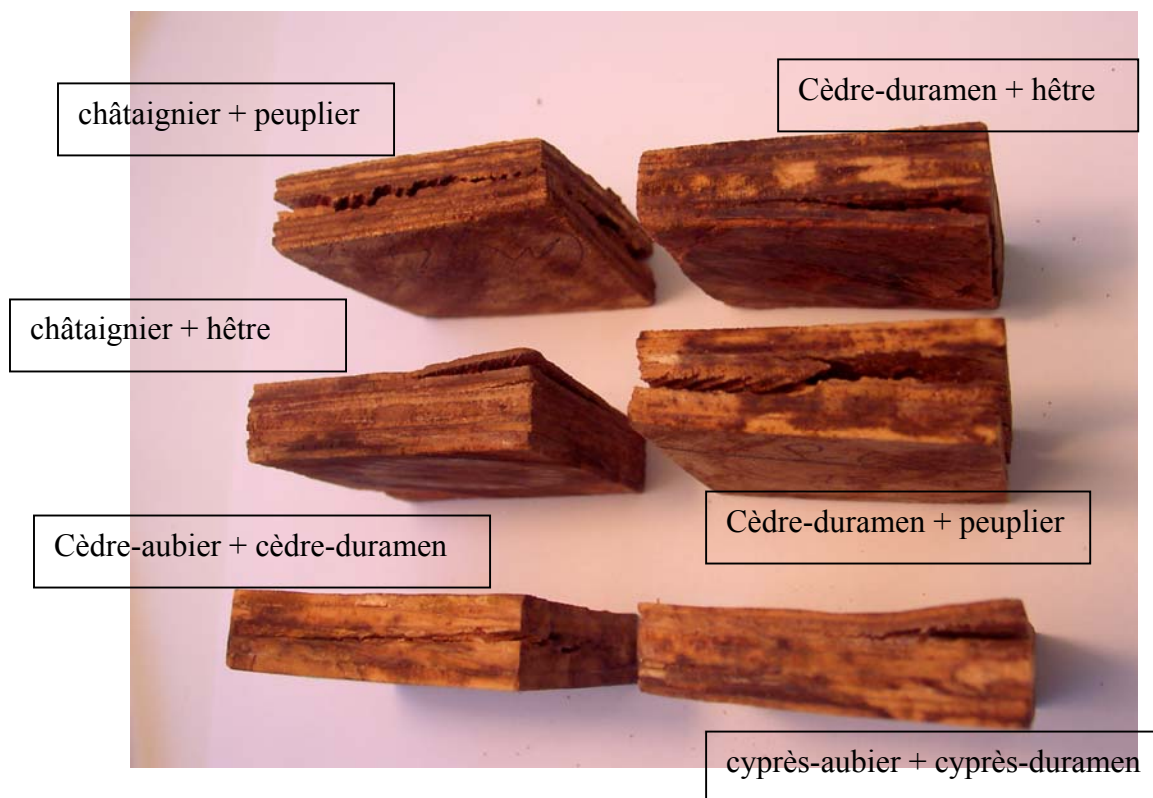


Figure 70. Exemples de contreplaqués délamés après attaque de *Coniophora* et séchage à l'étuve.

Compte tenu de la dégradation de la colle due à *Coniophora*, les chapitres suivants consacrés aux autres critères d'évaluation de la dégradation ne concerneront que les tests avec *Coriolus versicolor*. Il faudrait éventuellement reprendre l'expérimentation avec une colle résistante (et si possible pas trop toxique) pour ce champignon, pour vérifier si les résultats obtenus avec *Coriolus* peuvent être extrapolés.

3.3 Résultats de l'utilisation de la méthode ultrasonore pour détecter la présence et le niveau de la pourriture dans le bois massif et le contreplaqué.

Le but de cette phase de la recherche est de déterminer l'évolution de la vitesse de propagation transversale des ondes ultrasonores dans les panneaux de contreplaqué purs et mélangés après qu'ils aient subi la dégradation fongique.

3.3.1 Propagation des ondes dans le bois massif et le contreplaqué avant l'attaque fongique

Comme information de base nous présentons le changement de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores entre les trois états : bois massif, contreplaqué en 5 plis et contreplaqué en 9 plis. Toutes les mesures sont réalisées dans la direction radiale (il s'agit de la direction radiale pour le bois massif et chaque placage individuel d'un panneau de contreplaqué).

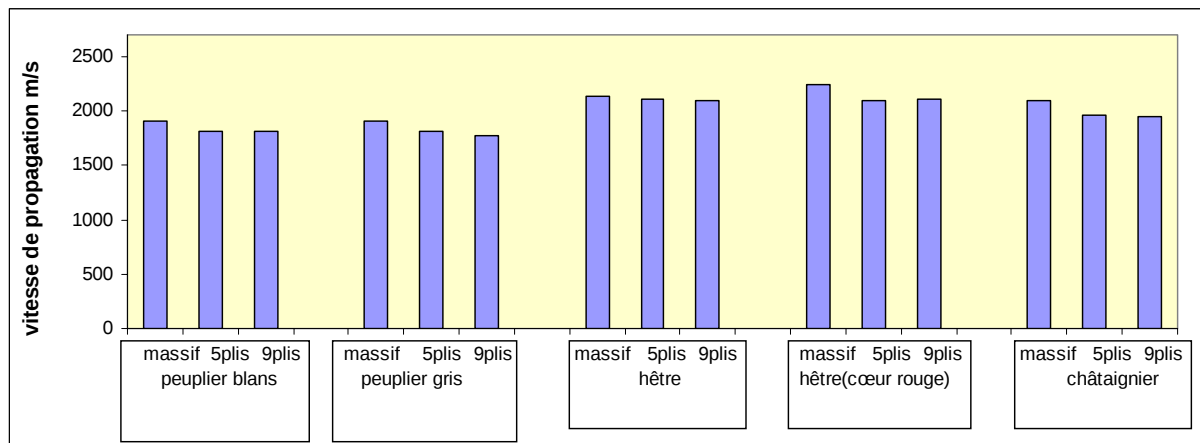


Figure 71. Vitesse transversale des ondes ultrasonores pour différentes essences, dans les trois cas : bois massif, contreplaqué en 5 plis et contreplaqué en 9 plis.

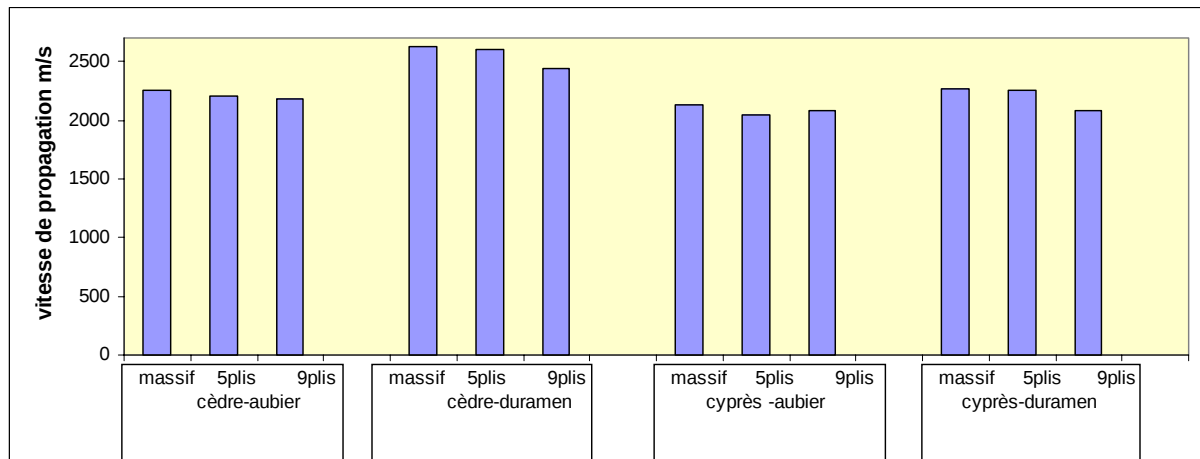


Figure 72. Vitesse transversale des ondes ultrasonores pour différentes essences, dans les trois cas : bois massif, contreplaqué en 5 plis et contreplaqué en 9 plis.

Les résultats présentent une différence entre les essences utilisées qui est liée théoriquement au module d'élasticité radial, lequel est normalement lié à la densité du bois. La hiérarchie des densités est bien mieux respectée que pour les modules longitudinaux. Egalement on note une légère diminution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores entre le bois massif et

les contreplaqués, diminution plus marquée souvent pour les 9 plis que pour les 5 plis. Ceci est très probablement uniquement dû à l'augmentation de densité du contreplaqué liée à la présence de la colle plus dense que le bois

3.3.2 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores due aux attaques fongiques

3.3.2.1 Cas du bois massif

Nous avons étudié l'évolution de la vitesse des ondes ultrasonores dans la direction longitudinale du bois massif avant et après la dégradation fongique. Les résultats présentés dans les figures 3 et 4 comparent l'influence de deux types de la pourriture, brune et fibreuse, respectivement engendrée après l'exposition aux *Coniophora puteana* et *Coriolus versicolor* sur la propagation des ondes ultrasonores.

La figure 72 présente une différence significative de propagation des ondes ultrasonores dans la direction longitudinale entre pourriture brune et fibreuse. Pour une perte de masse causée par *C. versicolor* comprise entre 15 et 20 % pour l'aubier de cyprès et de cèdre nous avons trouvé une diminution légère de la vitesse de 1.5 à 2.5 %. Par contre une perte de masse entre 20% et 30% sur les mêmes essences due à *Coniophora* a rendu impossible la propagation des ondes ultrasonores. Nous l'avons noté arbitrairement comme une diminution de la vitesse de propagation de 100%. En fait il s'agit probablement surtout d'une augmentation considérable de l'amortissement qui empêche toute lecture de l'onde transmise.

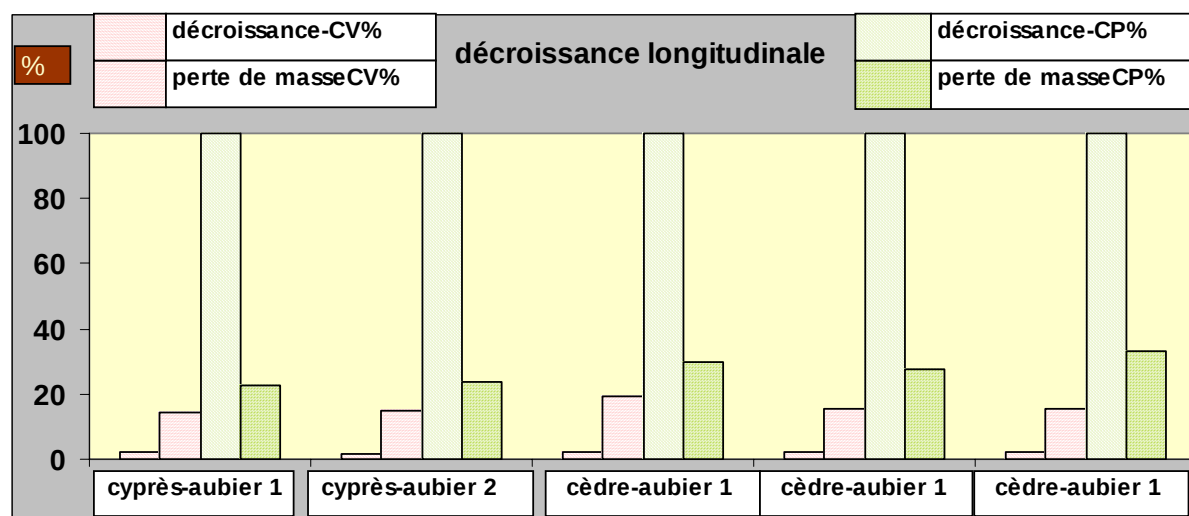


Figure 72. Relation entre la perte de masse et la diminution de la vitesse des ondes ultrasonores propagées dans la direction longitudinale du bois massif d'aubier de cyprès et de cèdre(CV: *Coriolus versicolor*, CP: *Coniophora puteana*).

Les agents de pourriture fibreuse (*coriolus versicolor*) entraînent une défibrillation du plan ligneux (Dirole et Ravilly 1979). Les manifestations macroscopiques de l'altération provoquée par *Coniophora puteana* sont des larges fissurations selon les trois axes d'orthotropie.

Les résultats observés pour le hêtre et le peuplier confirment cet ordre pour la diminution de la vitesse après une altération causée par *C.versicolor* et *C. puteana*. Mais il est possible cette fois de mesurer la diminution de la vitesse dans les deux types d'attaque. Globalement, pour les essences étudiées la propagation des ondes ultrasonores dans le sens du fil est plus sensible à la pourriture cubique qu'à la pourriture fibreuse.

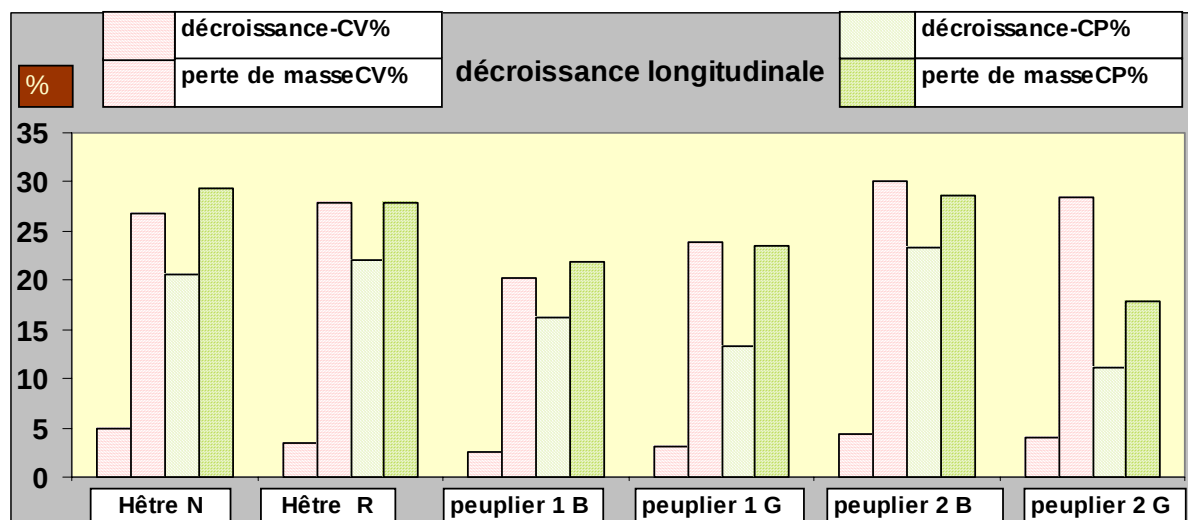


Figure 73. Relation entre la perte de masse et la diminution de la vitesse des ondes ultrasonores propagées dans la direction longitudinale du bois massif de hêtre et de peuplier (CV: *Coriolus versicolor*, CP: *Coniophora puteana*, N: bois normale, R: cœur rouge, B: bois blanc, G: bois gris).

3.3.2.2 Diminution de la vitesse pour le contreplaqué

Nous présentons les résultats selon le pourcentage de diminution de la vitesse transversale des ondes ultrasonores obtenue entre l'état sain et l'état dégradé par l'attaque fongique. Les résultats sont présentés d'abord pour les contreplaqués purs puis pour les mélanges réalisés.

3.3.2.2.1 Diminution de la vitesse des ondes ultrasonores pour des contreplaqués purs.

Les résultats (fig. 74) montrent qu'il est possible de détecter la présence de la pourriture dans les contreplaqués réalisés à partir des essences non durables.

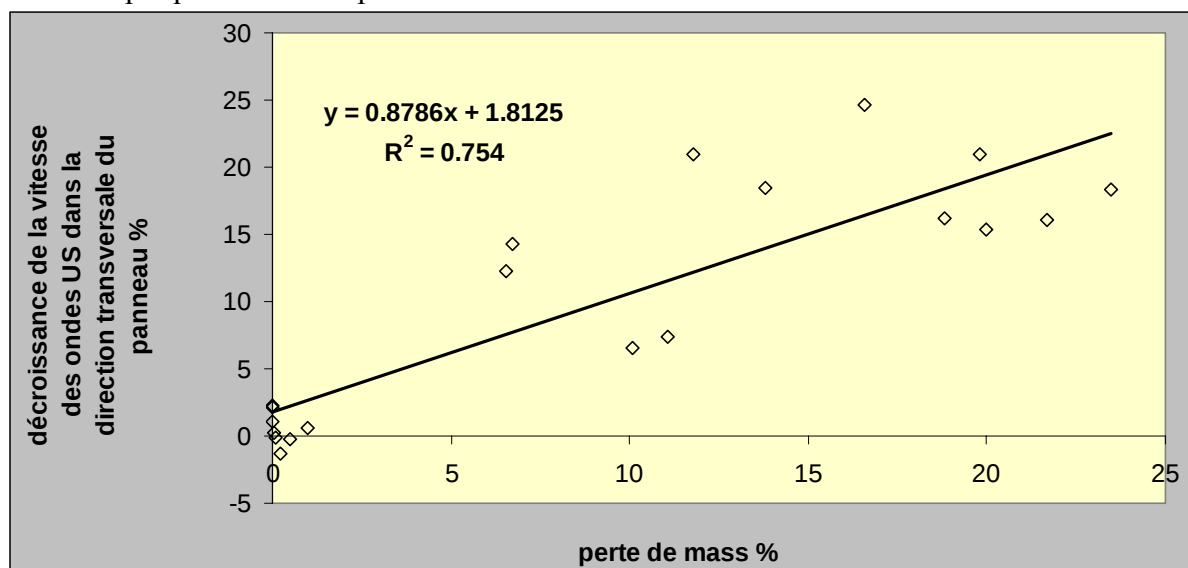


Figure 74. Comparaison entre la diminution de la vitesse de propagation transversale des ondes ultrasonores (US) et la perte de masse avant et après dégradation, causée par *C. versicolor* dans les contreplaqués purs (5 et 9 plis).

La corrélation entre perte de masse et décroissance de la vitesse de propagation est très significative, mais moins bonne que dans le cas de l'énergie d'indentation. Il apparaît que, systématiquement, la perte de masse en % est supérieure à la décroissance en % de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores pour le peuplier et l'aulxier de cyprès, alors que c'est l'inverse qui se produit pour le hêtre et l'aulxier de cèdre (fig. 75).

En moyenne, la sensibilité des deux types de mesures (perte de masse et diminution de la vitesse) est très similaire. Il est donc possible, a priori d'utiliser la propagation des ondes ultrasonores, quand son application se révèle plus facile, ce qui n'est pas le cas des essais de laboratoire.

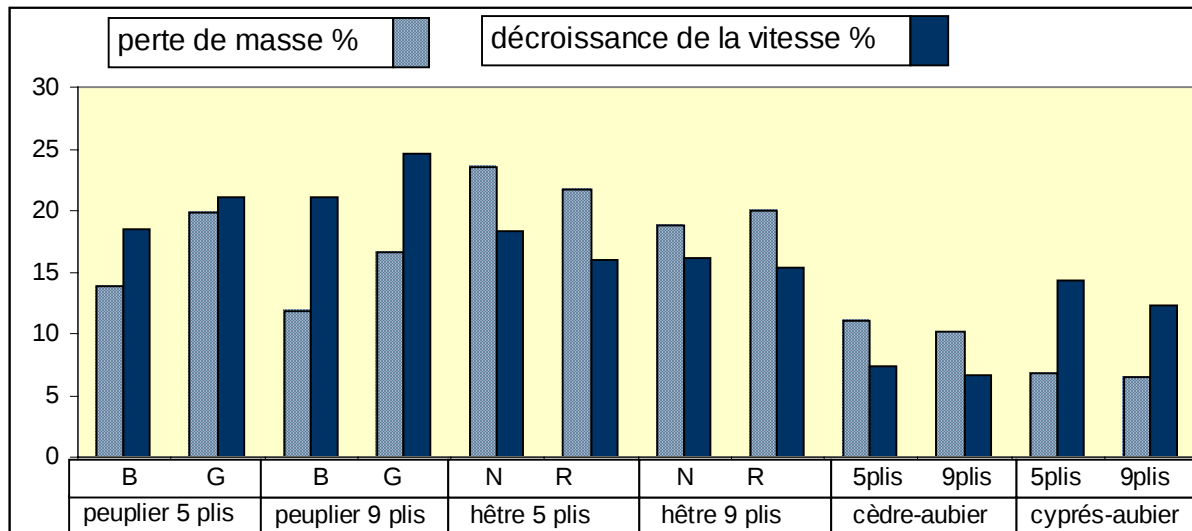


Figure 75. La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores dans la direction transversale des panneaux de contreplaqué non durable à cause de la pourriture blanche (*C. versicolor*). B : bois blanc, G : bois gris, N : bois normale, R : cœur rouge.

3.3.2.2.2 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de peuplier et de châtaignier.

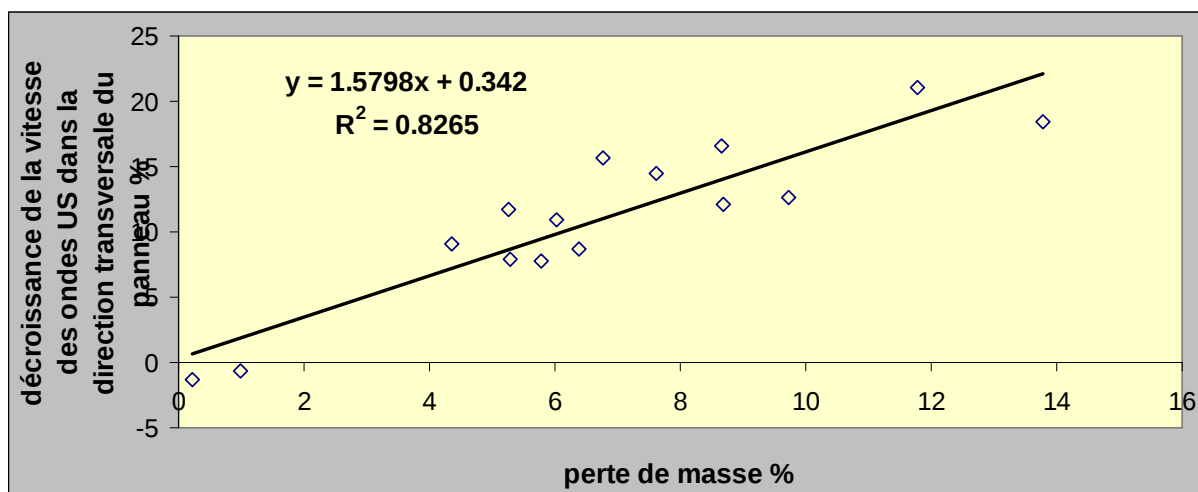


Figure 76. Comparaison entre la diminution de vitesse de propagation transversale des ondes US (avant et après dégradation) et la perte de masse causée par *C. versicolor* dans les contreplaqués purs et mélangés de châtaignier et de peuplier (5 et 9 plis).

Les 11 contreplaqués réalisés avec ce mélange, ont révélé la présence de la pourriture en montrant une diminution nette de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores (fig. 76). Comme pour les contreplaqués purs de peuplier la diminution de la vitesse dans la direction transversale des panneaux a été supérieure à celle de la perte de masse.

3.3.2.2.3 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de hêtre et de châtaignier.

On retrouve le même résultat que précédemment, la diminution de vitesse est inférieure à la perte de masse, comme pour les contreplaqués purs de hêtre (fig. 77)

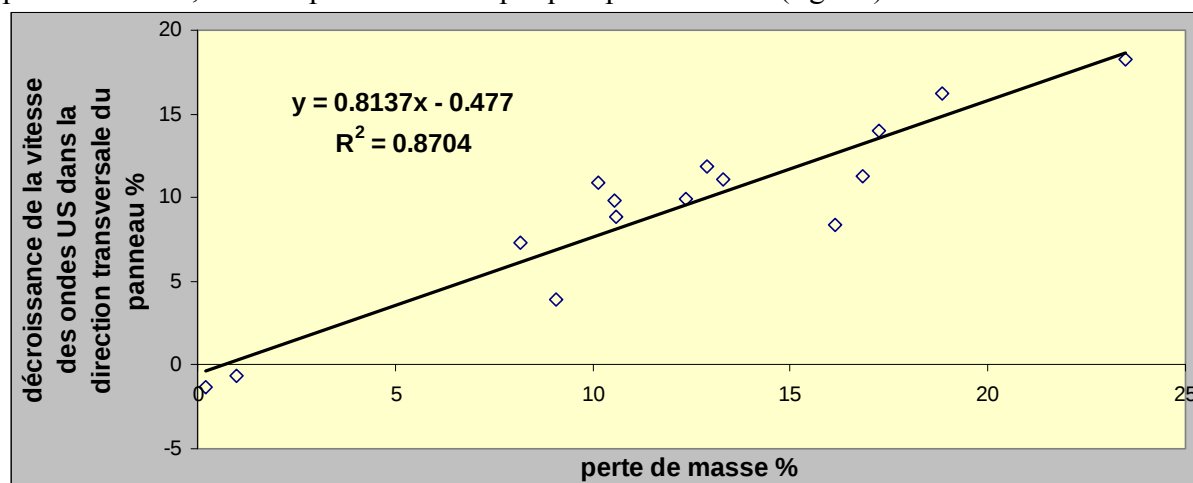


Figure 77. Comparaison entre la diminution de vitesse de propagation transversale des ondes US (avant et après dégradation) et la perte de masse causée par *C. versicolor* dans les contreplaqués purs et mélangés de châtaignier et de hêtre (5 et 9 plis).

La corrélation entre la diminution de la vitesse des ondes ultrasonores et la perte de masse dans ce mélange est un peu plus importante que pour le mélange de châtaignier et de peuplier.

3.3.2.2.4 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de cèdre- duramen et de cèdre-aubier.

La corrélation obtenue est nettement moins bonne pour ce mélange (fig. 78), ce qui est peut-être dû aux faibles pertes de masse (de 1 à 6 %) enregistrées.

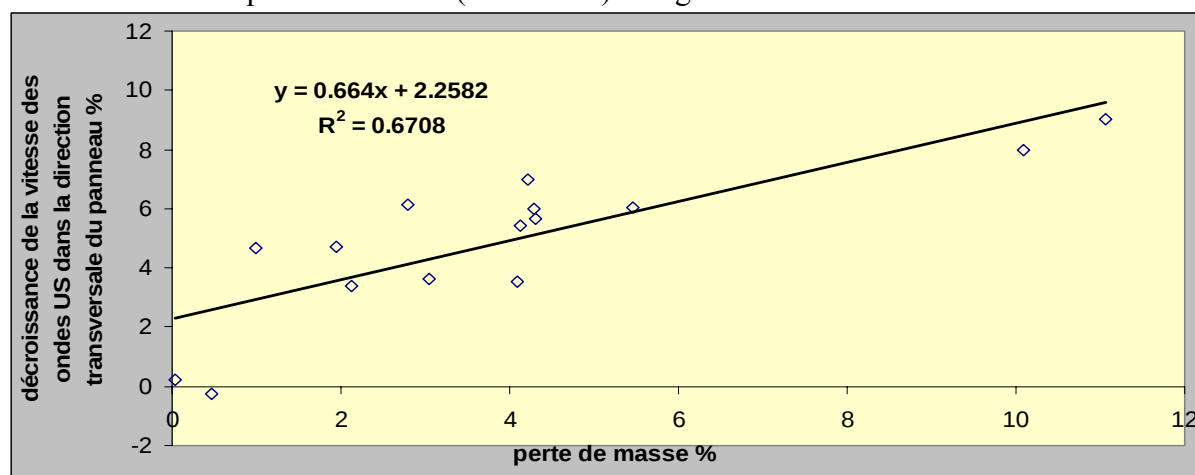


Figure 78. Comparaison entre la diminution de vitesse de propagation transversale des ondes US (avant et après dégradation) et la perte de masse causée par *C. versicolor* dans les contreplaqués purs et mélangés de cèdre aubier et duramen (5 et 9 plis).

3.3.2.2.5 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de peuplier et de cèdre-duramen.

On trouve des résultats similaires au mélange peuplier – châtaignier, avec une corrélation un peu moins bonne (fig. 79).

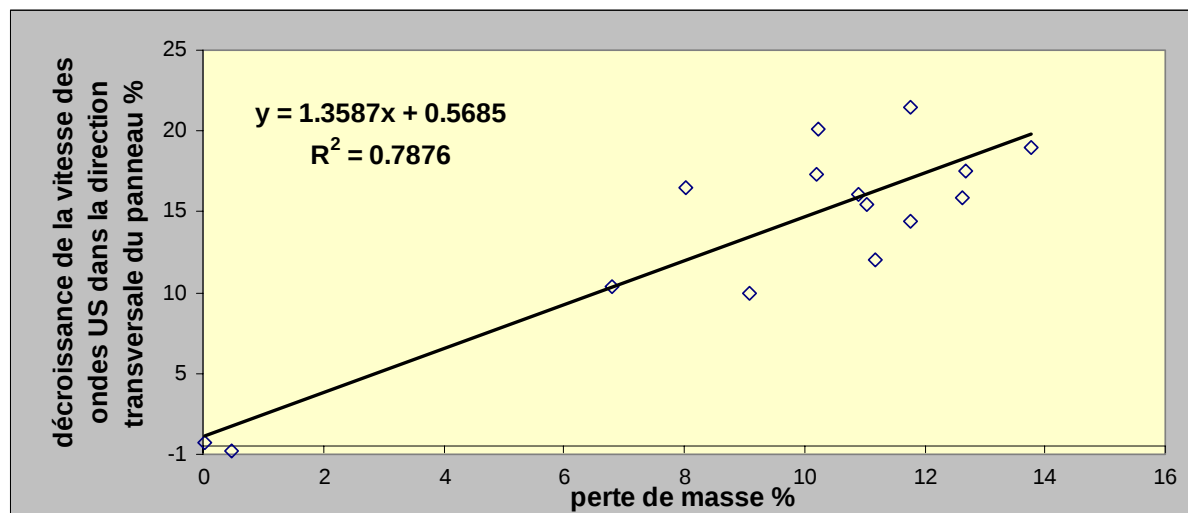


Figure 79. Comparaison entre la diminution de vitesse de propagation transversale des ondes US (avant et après dégradation) et la perte de masse causée par *C. versicolor* dans les contreplaqués purs et mélangés de cèdre-duramen et de peuplier (5 et 9 plis).

3.3.2.2.6 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de hêtre et de cèdre-duramen.

Les placages dans ce mélange se comportent de la même façon que dans les contreplaqués en mélange hêtre – châtaignier (fig. 80).

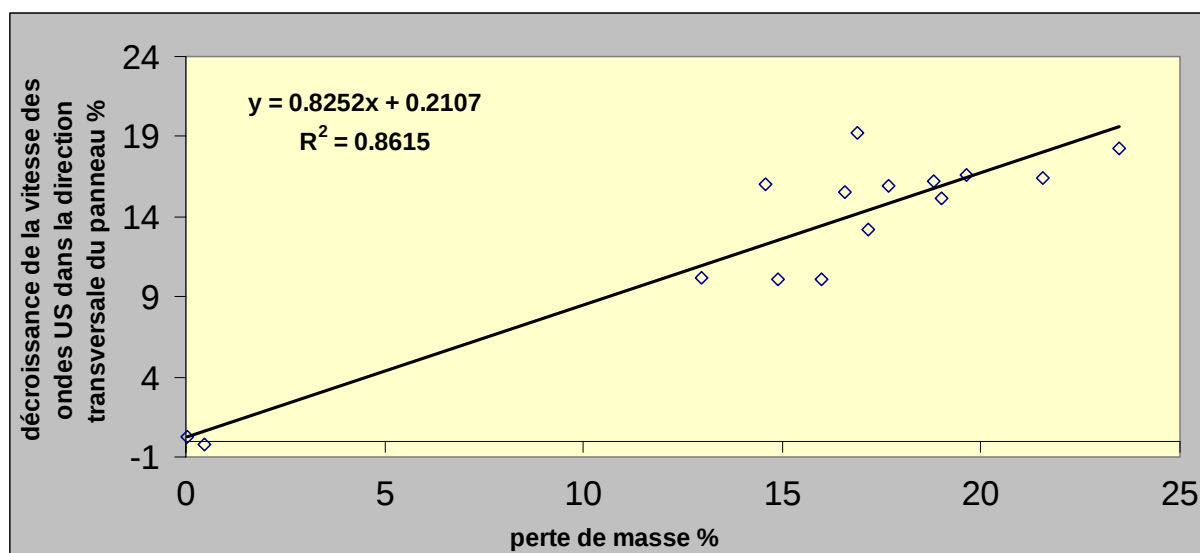


Figure 80. Comparaison entre la diminution de vitesse de propagation transversale des ondes US (avant et après dégradation) et la perte de masse causée par *C. versicolor* dans les contreplaqués purs et mélangés de cèdre-duramen et de hêtre (5et9 plis).

3.3.2.2.7 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores des contreplaqués en mélange de cyprès-aubier et de cyprès-duramen.

Comme pour les mélanges d'aubier et de duramen de cèdre, le plus faible niveau de perte de masse se traduit par un niveau plus bas de la corrélation (fig. 81), qui est cependant nettement meilleure dans ce cas. La meilleure sensibilité de la diminution de vitesse par rapport à la perte de masse est conforme au résultat sur les contreplaqués purs d'aubier de cyprès.

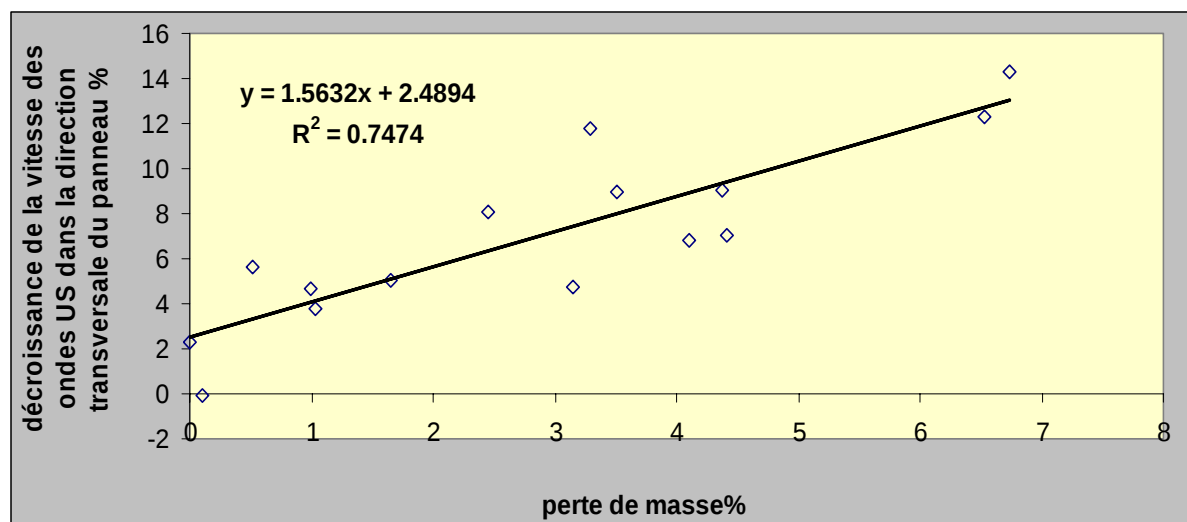


Figure 81. Comparaison entre la diminution de vitesse de propagation transversale des ondes US (avant et après dégradation) et la perte de masse causée par *C. versicolor* dans les contreplaqués purs et mélangés de cyprès duramen et de cyprès aubier (5 et 9 plis).

3.3.2.3 La diminution de la vitesse des ondes ultrasonores pour tous les contreplaqués réalisés purs ou mélange.

La figure 82 présente les résultats observés sur tous les panneaux réalisés dans cette étude, purs ou mélangés. La corrélation entre diminution de la vitesse des ondes ultrasonores et la perte de masse est très significative, mais la régression ne permet d'expliquer que les deux tiers des variations d'un critère par les variations de l'autre. Cela est dû notamment aux différences de comportement assez nettes entre le groupe hêtre, aubier de cèdre d'un côté et le groupe peuplier, aubier de cyprès de l'autre. Globalement, les deux critères présentent la même sensibilité pour décrire la dégradation.

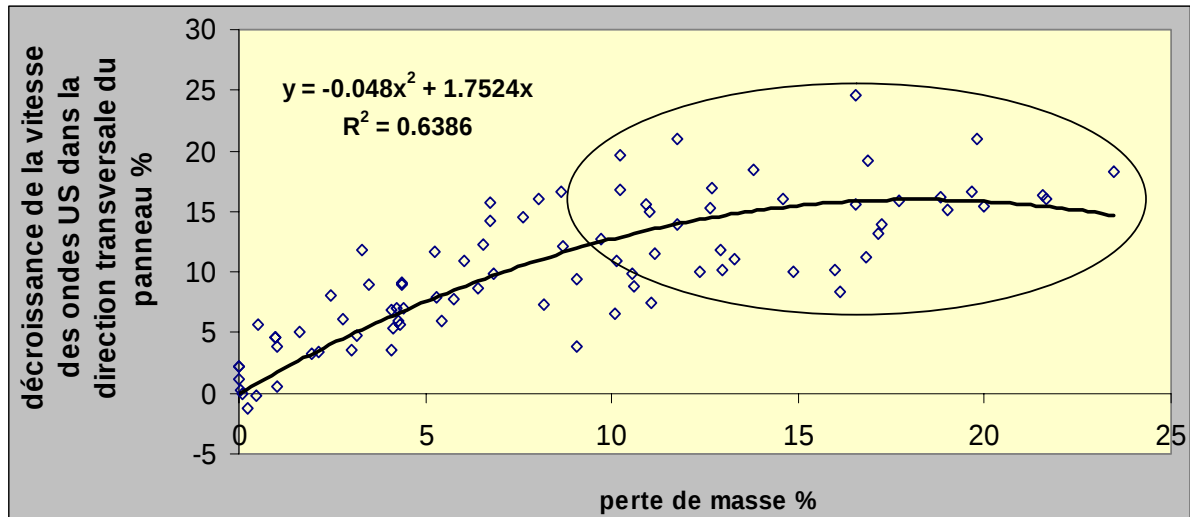


Figure 82. Comparaison entre la perte de masse et la diminution de la vitesse de propagation transversale des ondes US avant et après la dégradation causée par *C. versicolor* dans tous les contreplaqués purs et mélangés, en 5 et 9 plis.

D'autre remarque dans cette relation entre la perte de masse et la diminution de la vitesse des ondes ultrasonores est l'influence du niveau de la perte de masse sur la sensibilité de cette méthode à la détection de la présence de la pourriture. Il paraît qu'après une perte de masse de 12%-14% dans les contreplaqués mélangés la sensibilité de cette méthode pour déterminer le niveau de perte de masse diminue.

En effet la présence de couche dégradée dans un mélange diminue la vitesse des ondes ultrasonore et à cet égard en fonction de niveau de perte de masse locale (que dans les couches non durables) les mélanges ayant 40% et 60% des plis non durables présentent des diminutions non significatives de la vitesse entre eux.

Cet essai est adapté uniquement à la détection de la présence de la pourriture dans l'épaisseur des contreplaqués et nous ne pouvons pas répondre à la question de gradient de la pourriture dans l'épaisseur du panneau.

3.4 Résultats de mini indentation des contreplaqués purs et des mélanges d'essences durables et non durables

Nous présentons les résultats obtenus par cette méthode selon deux indicateurs:

- L'énergie dépensée lors de l'indentation
- Les types de courbes effort / déplacement de l'indenteur

3.4.1 L'énergie d'indentation

Nous avons enregistré l'énergie nécessaire pour la pénétration d'un mini cylindre dans les couches successives, depuis le contact de la première couche, jusqu'à 70% de profondeur de

pénétration dans l'épaisseur du panneau (après avoir dépassé l'axe de symétrie du panneau). Chaque point présenté dans les figures suivantes est la différence relative (en % rapporté au panneau sain) entre la médiane de 12 mesures sur les éprouvettes de contreplaqués ayant subi une attaque de *Coriolus versicolor* et la médiane de 12 mesures sur les éprouvettes de contreplaqué sain correspondantes. Les résultats sont présentés pour les 6 groupes de mélanges réalisés.

3.4.1.1 L'énergie d'indentation des contreplaqués purs

Dans la figure 83 nous présentons la décroissance de l'énergie d'indentation pour les contreplaqués réalisés uniquement dans la même essence durable ou non durable. La relation entre les deux critères de dégradation : perte relative d'énergie d'indentation ou de masse, est très bonne. Elle peut être considérée comme une courbe de calage de la méthode d'indentation. La perte d'énergie est 2,4 fois plus forte que la perte de masse. L'indentation est donc une méthode plus sensible qui pourrait être utilisée dans l'avenir pour des essais de laboratoire, en diminuant la durée de test, à sensibilité égale.

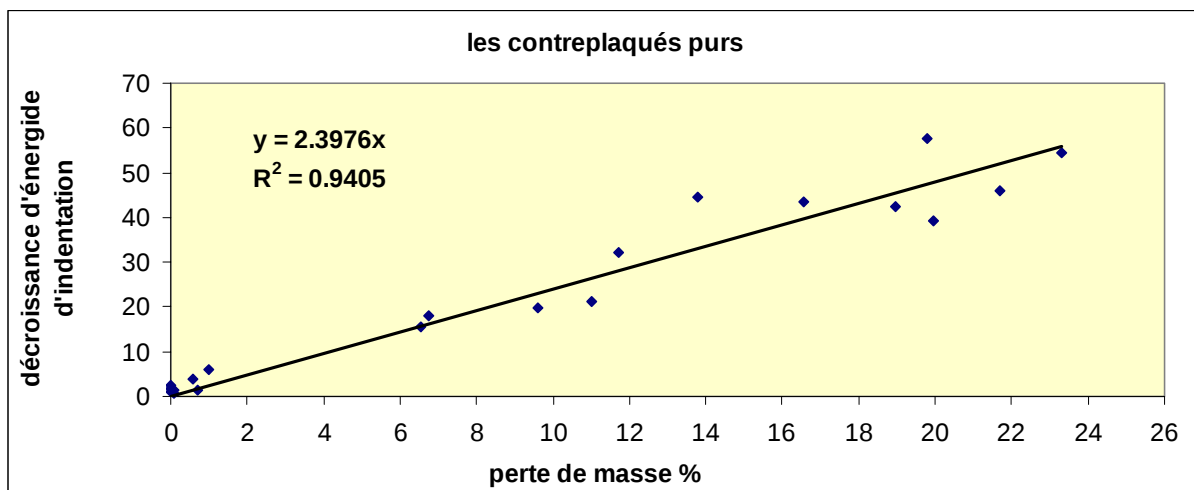


Figure 83. Relation entre la perte de masse et la décroissance d'énergie d'indentation de 20 contreplaqués purs exposés au *C. versicolor*.

3.4.1.2 L'énergie d'indentation des contreplaqués en mélange d'essences durable et non durable .

Les figures 84 à 88 présentent la relation entre la perte de masse et la décroissance de l'énergie d'indentation pour 2 contreplaqués purs en 5 et en 9 plis, pour l'essence durable et non durable respectivement, ainsi que les 11 mélanges réalisés (15 points chaque fois), pour chaque couple durable / non durable testé : châtaignier/peuplier, châtaignier/hêtre, cèdre duramen/cèdre aubier, cèdre duramen/hêtre, cèdre duramen/peuplier.

Les détails des mesures d'énergie d'indentation sur ces contreplaqués sont présentés en annexe F (tableaux 21 à 27).

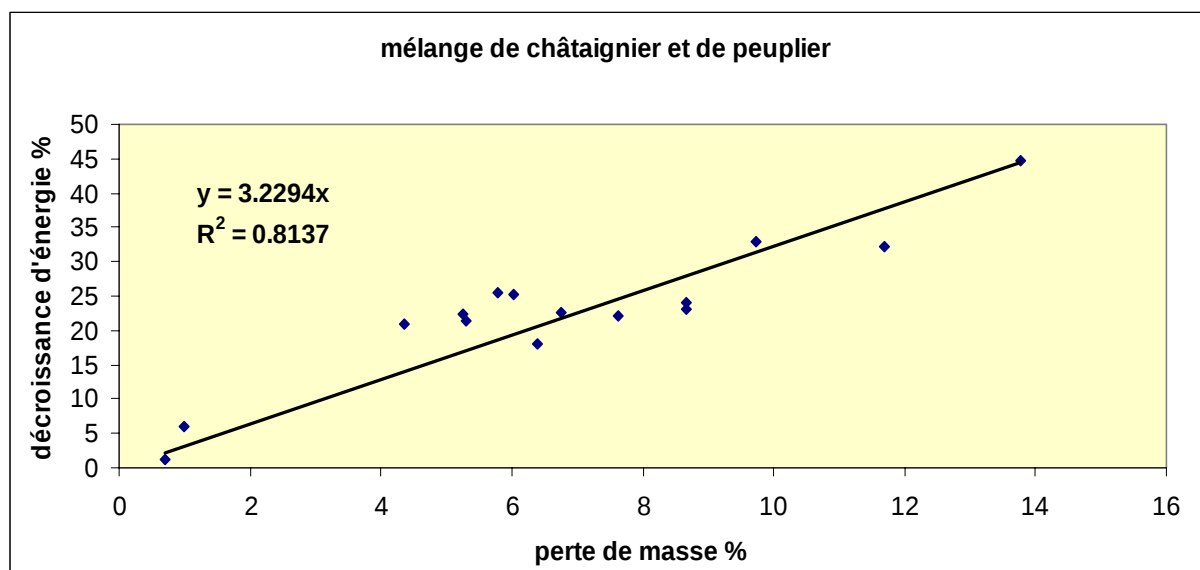


Figure 84. Relation entre la décroissance d'énergie d'indentation des contreplaqués dégradés et la perte de masse (valeur médiane pour chaque contreplaqué).

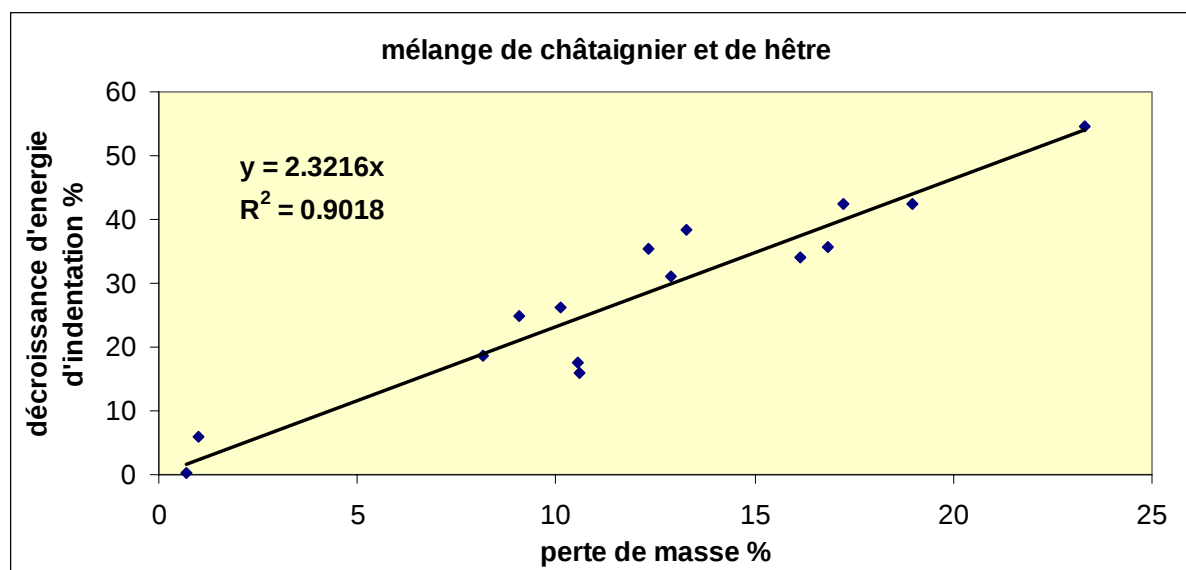


Figure 85. Relation entre la décroissance d'énergie d'indentation des contreplaqués dégradés et la perte de masse (valeur médiane pour chaque contreplaqué).

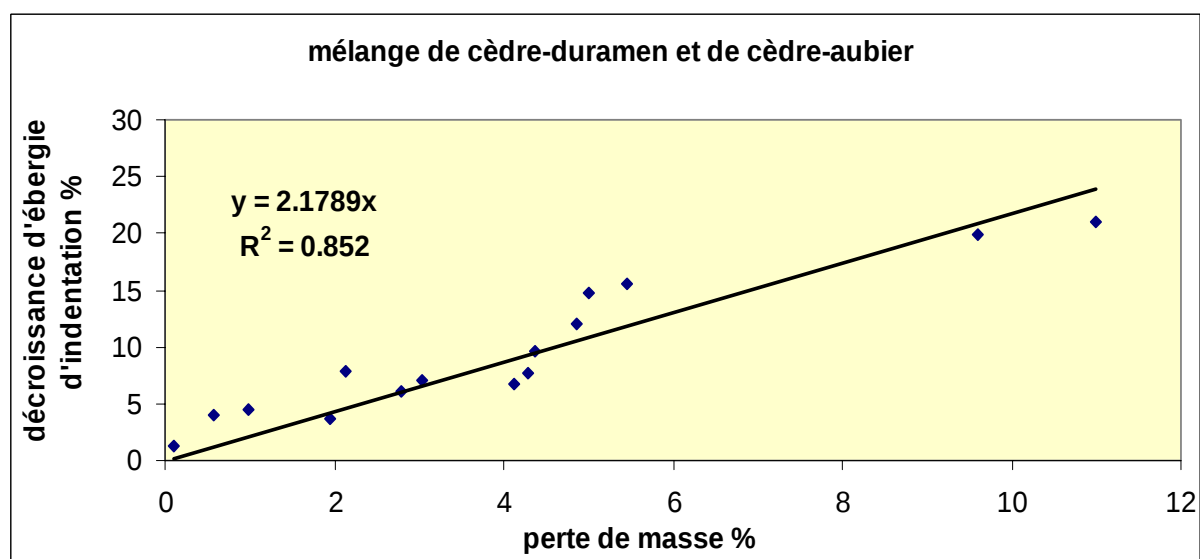


Figure 86. Relation entre la décroissance d'énergie d'indentation des contreplaqués dégradés et la perte de masse (valeur médiane pour chaque contreplaqué).

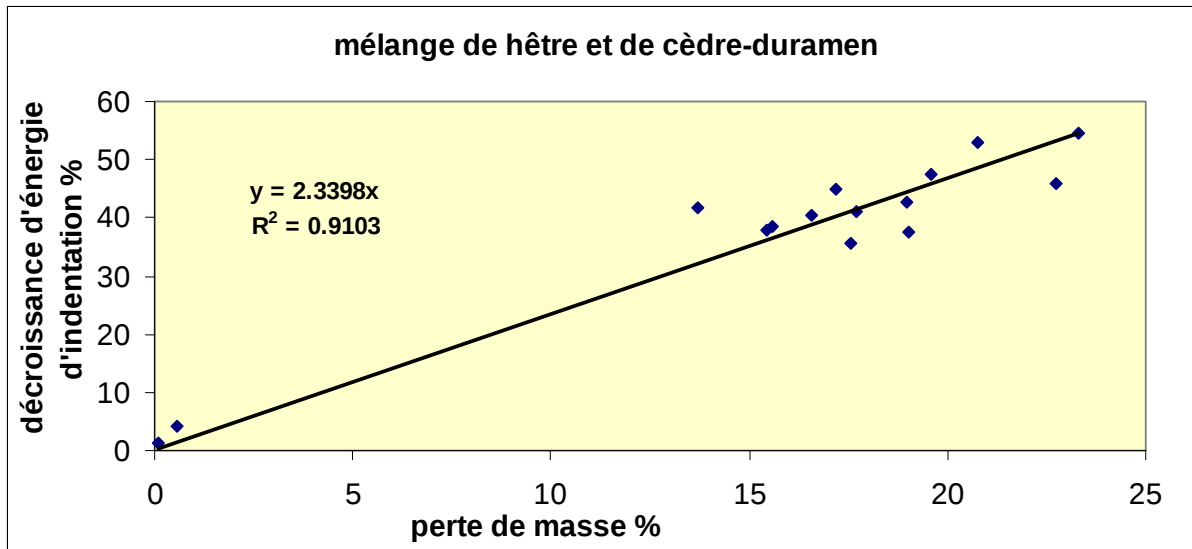


Figure 87. Relation entre la décroissance d'énergie d'indentation des contreplaqués dégradés et la perte de masse (valeur médiane pour chaque contreplaqué).

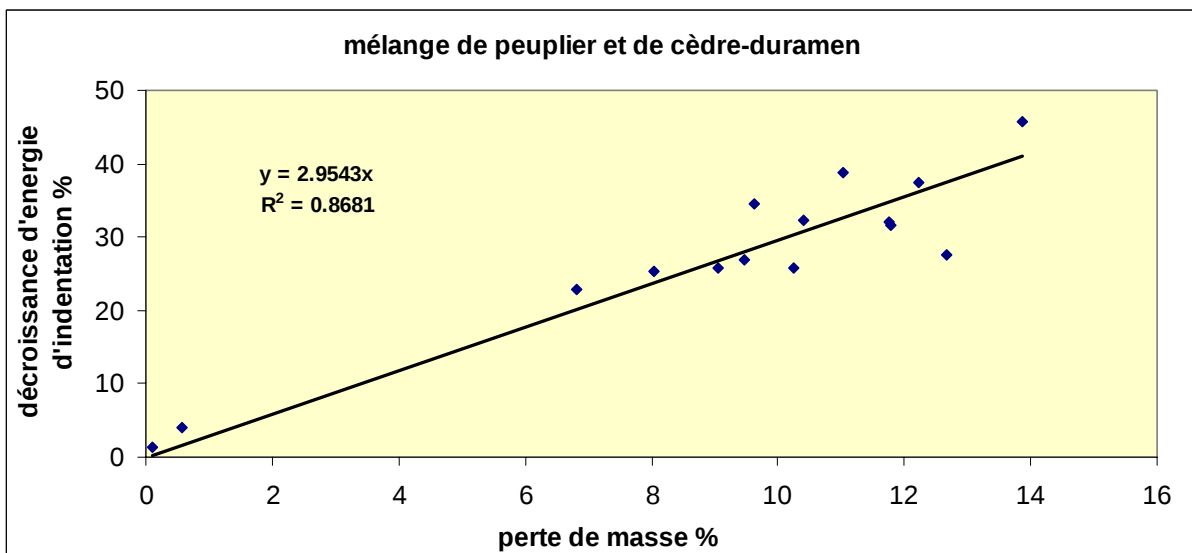


Figure 88. Relation entre la décroissance d'énergie d'indentation des contreplaqués dégradés et la perte de masse (valeur médiane pour chaque contreplaqué).

Les résultats présentent une corrélation très significative entre les deux indicateurs de dégradation dans tous les cas. L'essai d'indentation, pour les mélanges est donc aussi tout à fait utilisable en substitution à la perte de masse, avec une durée de test plus courte envisageable.

3.4.1.3 L'énergie d'indentation de l'ensemble des contreplaqués

La figure 89 présente la relation entre la perte de masse et la décroissance d'énergie d'indentation après une attaque de 16 semaines par *C. versicolor* pour tous contreplaqués purs et mélangés confondus.

La corrélation reste très significative et un paramètre explique 85% des variations de l'autre c'est un peu moins bon que pour les contreplaqués purs, où l'on avait trouvé 94%.

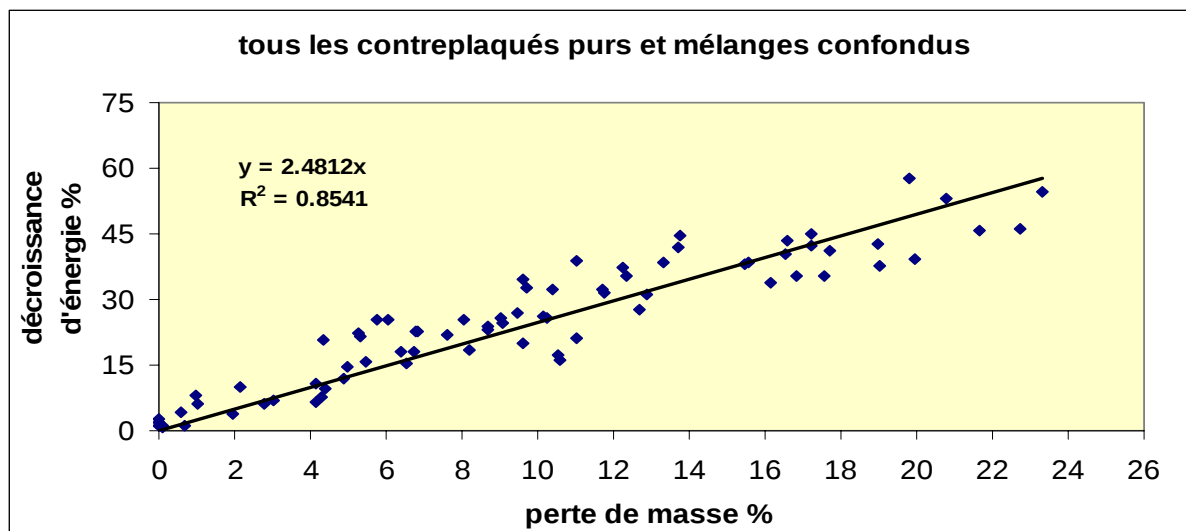


Figure 89. Relation entre la décroissance d'énergie d'indentation des contreplaqués dégradés et la perte de masse (valeur médiane pour chaque contreplaqué).

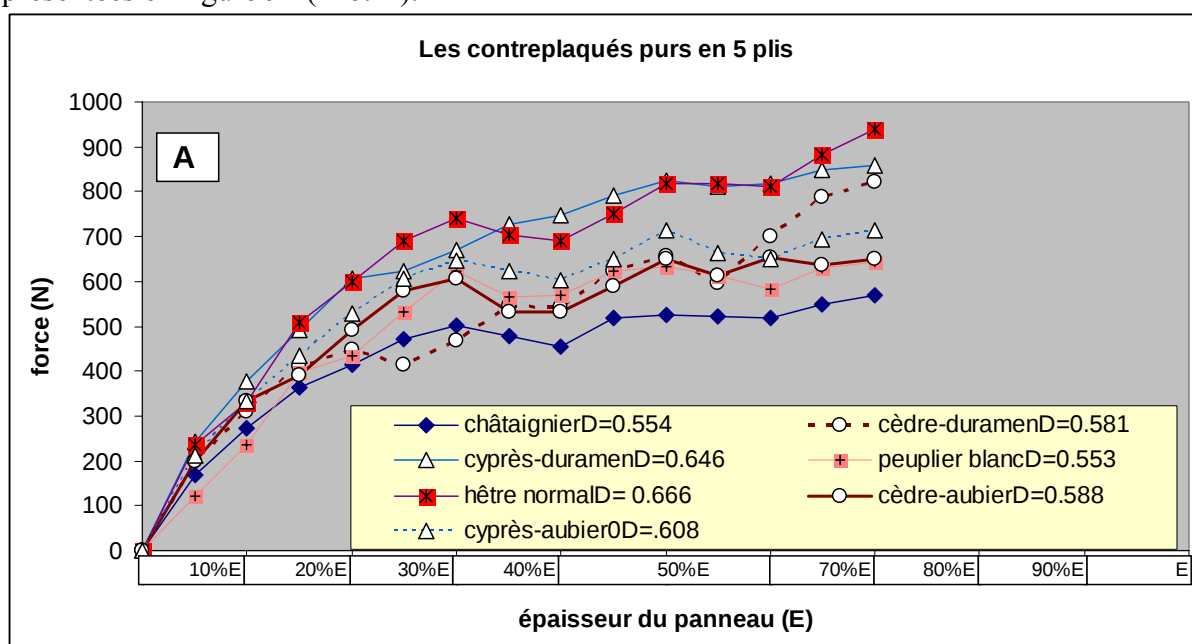
Globalement, on peut retenir comme valide une relation générale de proportionnalité entre perte de masse et d'énergie d'indentation, cette dernière étant deux fois et demi plus sensible que la perte de masse.

3.4.2 Les courbes de la force d'indentation

L'examen des courbes effort déplacement enregistrées lors de l'indentation est utile pour essayer de déterminer la localisation de la dégradation à l'intérieur du contreplaqué.

La courbe typique de la force d'indentation des contreplaqués

Les courbes effort / déplacement de l'indenteur pour les contreplaqués purs sains sont présentées en figure 91 (A et B).



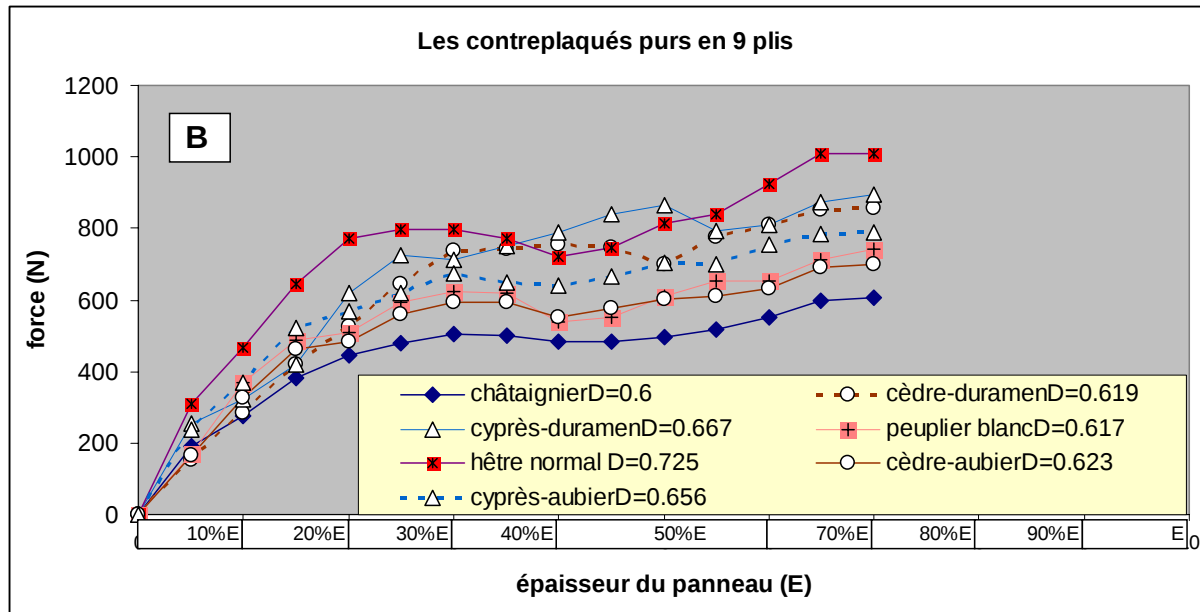


Figure 91. Les courbes d'effort / déplacement de l'indentation des contreplaqués purs en 5 plis (A) et en 9 plis (B) avant exposition, D = densité du panneau.

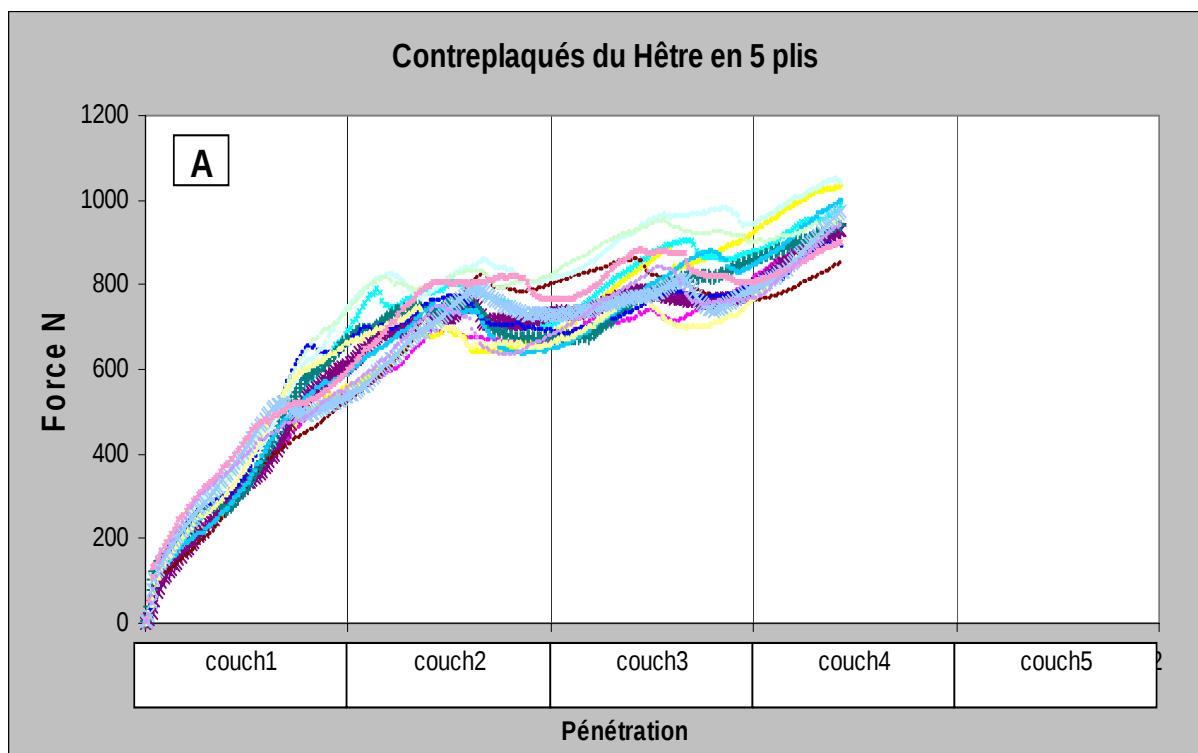
Chaque point est la moyenne pour les 3 poinçonnements réalisés sur le spécimen considéré, calculée tous les vingtièmes de l'épaisseur.

On peut diviser la courbe typique en 3 parties :

- Dès le contact de la tige d'indentation, la force commence à augmenter et sa variation avec la pénétration est quasiment linéaire. Dans cette phase 1, la surface du bois s'enfonce sous l'indenteur, sans qu'il y ait percement de la première couche.
- Après une pénétration moyenne de 30% de l'épaisseur du panneau on observe une légère chute de la force due à la rupture des fibres accompagnée d'un léger retour élastique de la surface enfoncée par l'indenteur.
- L'augmentation reprend après cette chute de la force, mais avec une pente beaucoup plus faible et de légères ondulations. On peut considérer que dans cette phase 3 il y a une succession de ruptures et, qu'en moyenne, l'augmentation est liée aux forces de frottement de la tige d'acier sur le bois.

Les différences entre panneaux testés, traduisent à la fois les différences de densité, de comportement élastique, et de comportement à la rupture des placages de bois. Dans la première phase, tous les placages contribuent au comportement en déflexion localisée de la première couche appuyée sur toutes les autres, mais il est certain que les premières couches jouent un rôle plus important dans les premières parties de la courbe.

Lors du percement accompagné de la rupture des fibres, les à coups constatés sur la courbe sont très différents d'une espèce à l'autre. Les figures 92 et 93 reproduisent les courbes complètes pour les contreplaqués de hêtre et de peuplier en 5 puis 9 plis. Le peuplier possède une résistance à la rupture des fibres particulièrement forte comparée à sa résistance à l'écrasement, ce qui donne des courbes en dents de scie caractéristiques alors que dans le cas du hêtre la chute d'effort après percement est beaucoup moins nette. La longueur de la première phase est sensiblement la même en 5 plis et en 9 plis, les courbes sont moins irrégulières dans ce dernier cas.



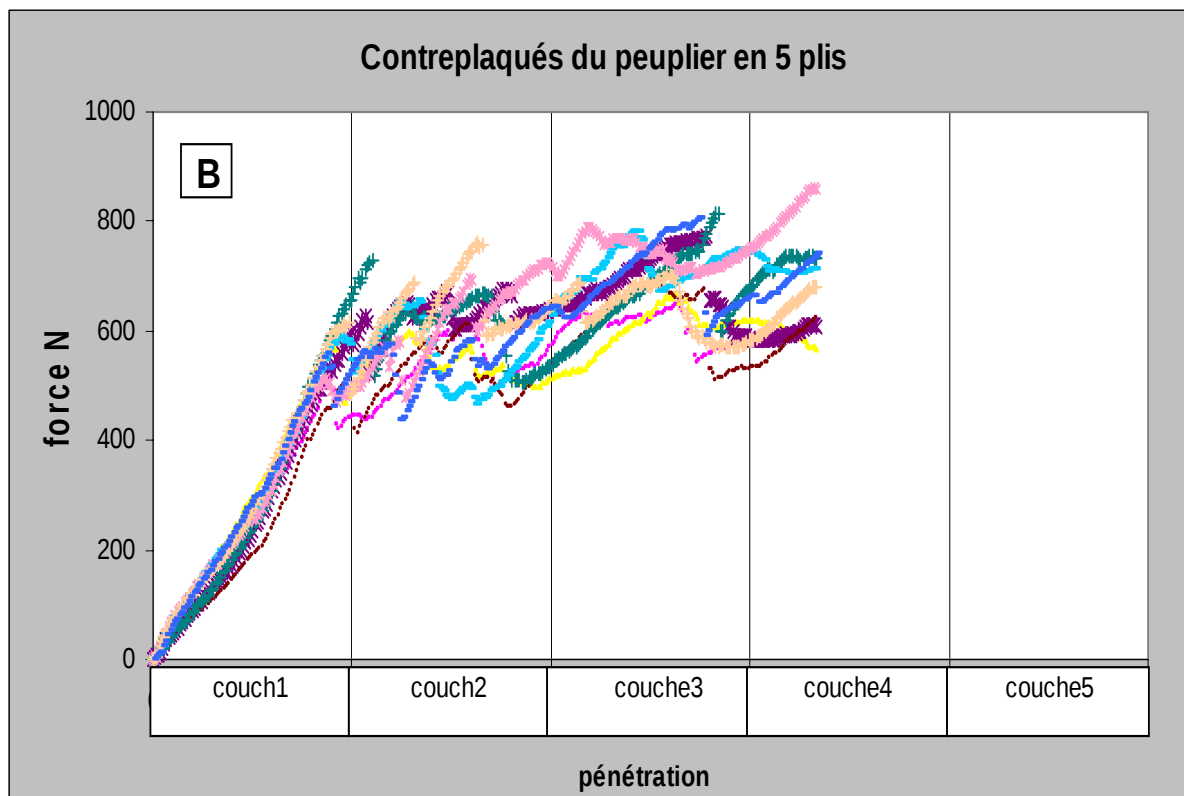
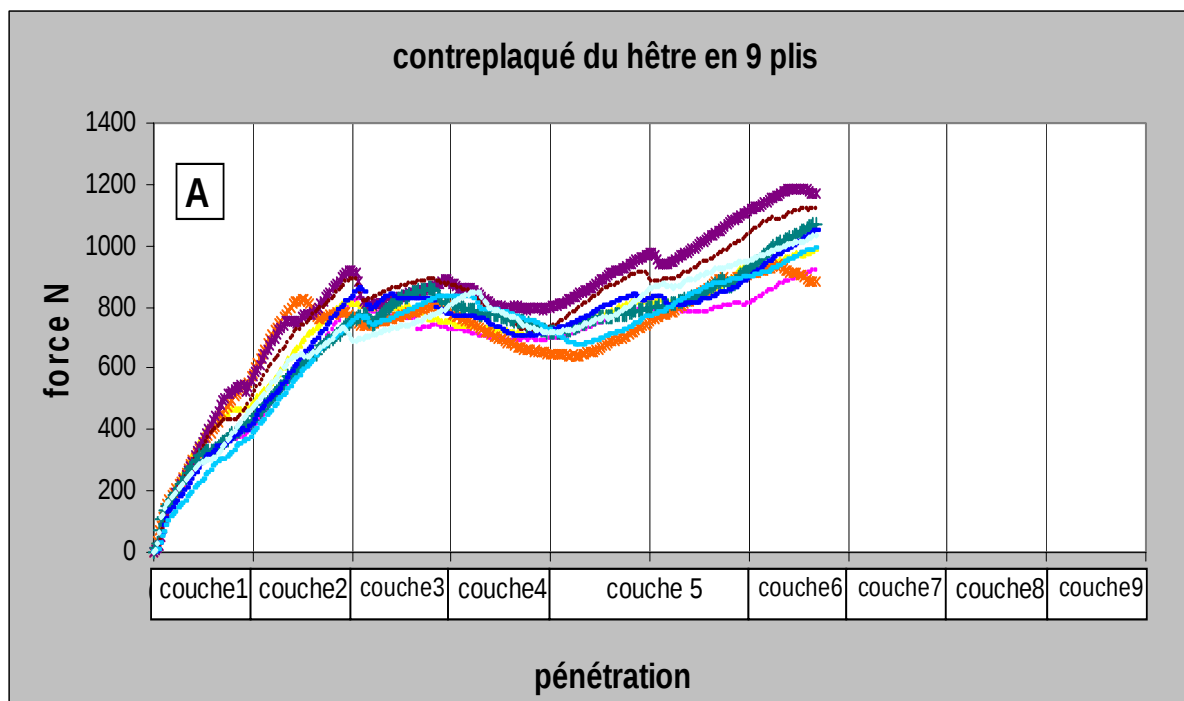
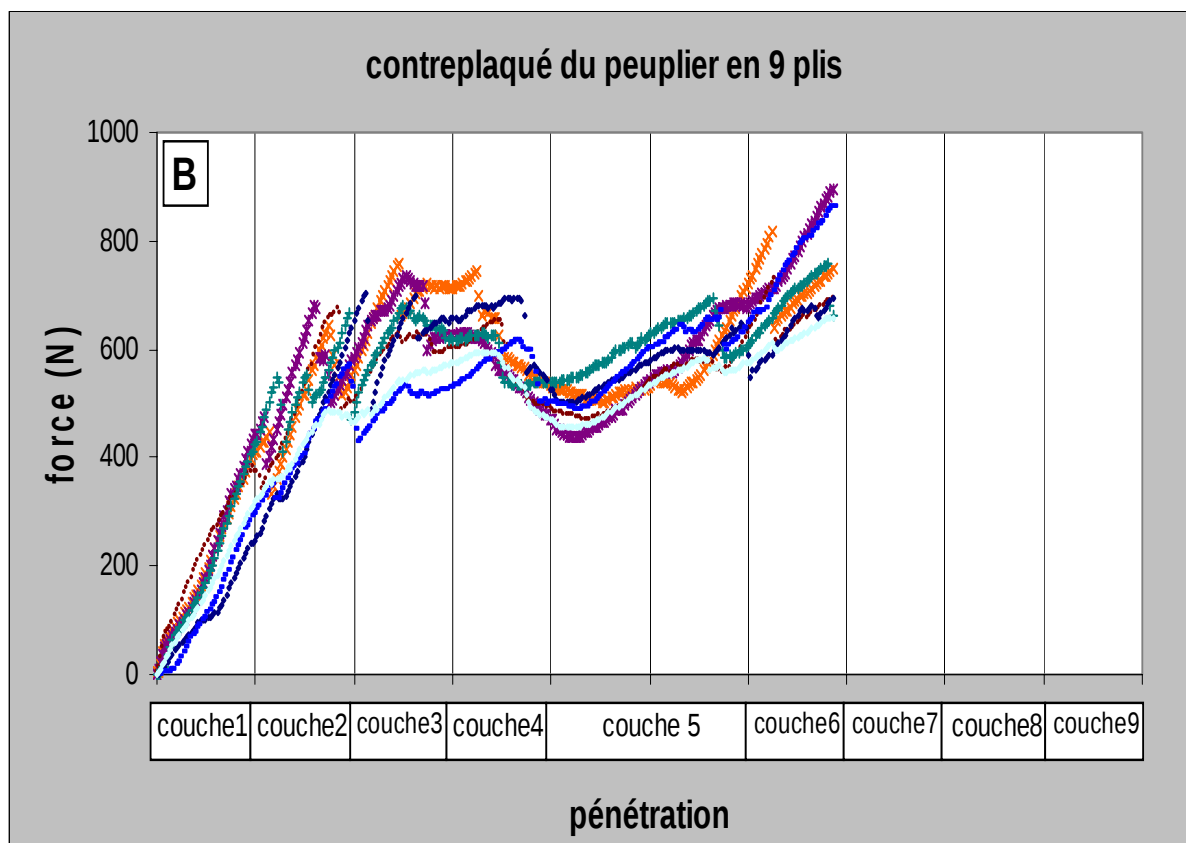


Figure 92. Présentation des courbes d'effort/déplacement de l'indentation de contreplaqués de hêtre (A) et de peuplier (B) en 5 plis.





La figure 93. Présentation des courbes d'effort/déplacement de l'indentation de contreplaqués de hêtre (A) et de peuplier (B) en 9 plis.

La figure 94 présente la forme générale des courbes de la force d'indentation pour tous les contreplaqués purs et tous les contreplaqués réalisés en mélange respectivement. Ces courbes sont obtenues en faisant la moyenne des courbes normées à 1 pour chaque essai, chaque valeur d'une courbe étant divisée par le maximum observé sur cette courbe. Les deux courbes moyennes sont identiques, ce qui signifie que l'échantillonnage est bien équilibré.

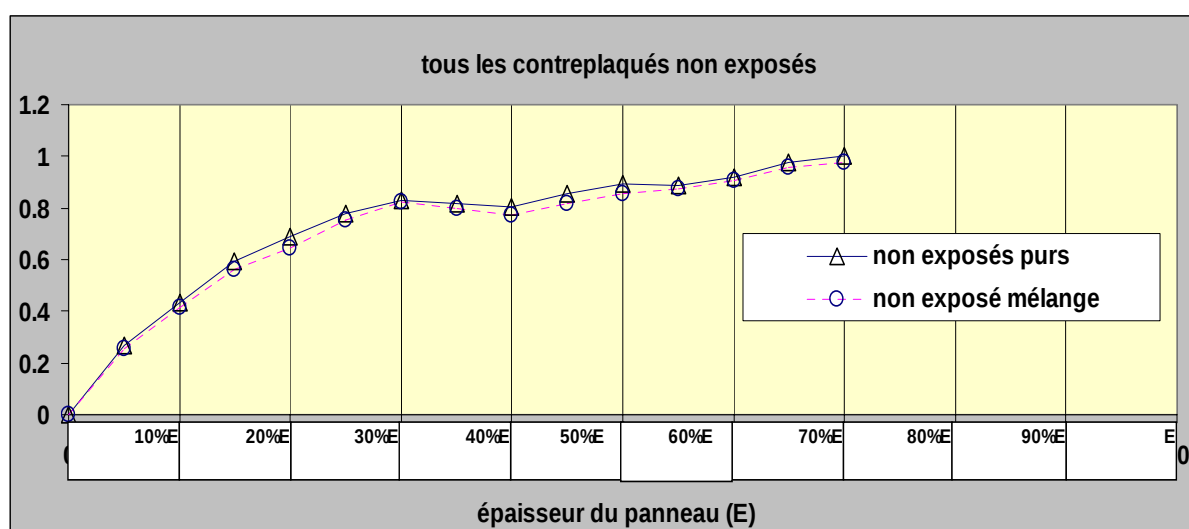


Figure 94. Forme générale des courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués purs et

les contreplaqués mélangés.

3.4.2.1 Force d'indentation pour les contreplaqués purs, sains ou attequés

Nous présentons les courbes effort / déplacement moyennes de l'indenteur pour les contreplaqués purs en trois groupes. Deux courbes sont présentées pour chaque groupe. L'une représente l'indentation d'un contreplaqué sain, et l'autre celle du même contreplaqué après l'attaque de *C. versicolor*.

Les contreplaqués purs de feuillus non durables

Les courbes moyennes normées, pour l'ensemble des contreplaqués purs de hêtre et de peuplier sont présentées en figure 95.

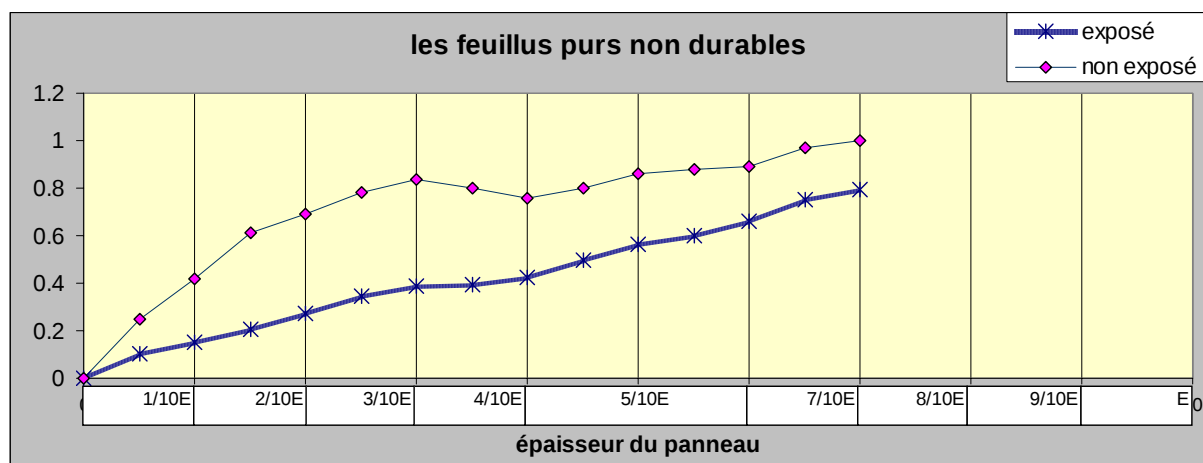


Figure 95. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués purs de peuplier et de hêtre en 5 et en 9 plis, sains et dégradés.

Cette figure révèle la présence de la pourriture pour ces contreplaqués, dans toutes les couches jouant un rôle dans la première phase. La pente dans cette phase est nettement plus faible pour les panneaux attequés. Ceci est confirmé par l'absence de rebond après la première rupture des fibres, caractéristique des contreplaqués sains.

Les contreplaqués purs d'aulx de résineux

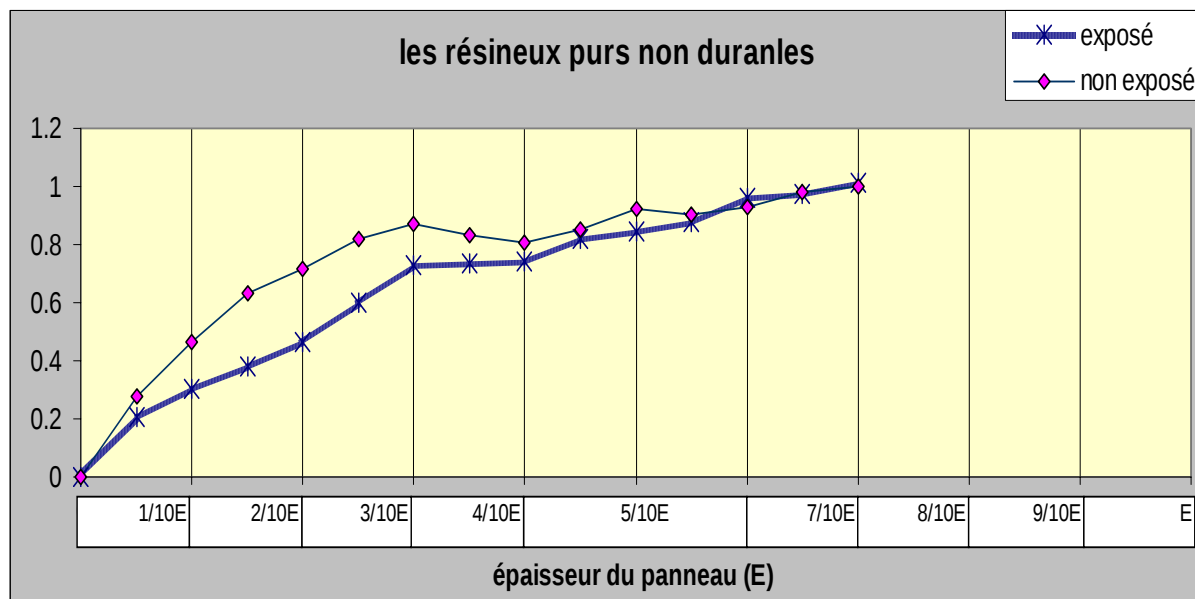


Figure 96. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués purs d'aubier de cèdre et de cyprès en 5 et en 9 plis, sains et dégradés.

La figure 96 est similaire à la précédente, mais la perte de résistance mécanique est nettement moins prononcée que pour les feuillus non durables. Cela correspond à la meilleure résistance des résineux à *Coriolus*. Il est même probable que les couches centrales soient peu dégradées.

Les contreplaqués purs en essences durables

La figure 97 montre que les contreplaqués purs en duramen de châtaignier, de cèdre et de cyprès sont très similaires avant et après attaque. La légère chute de pente en tout début de courbe révèle un début d'attaque des couches externes.

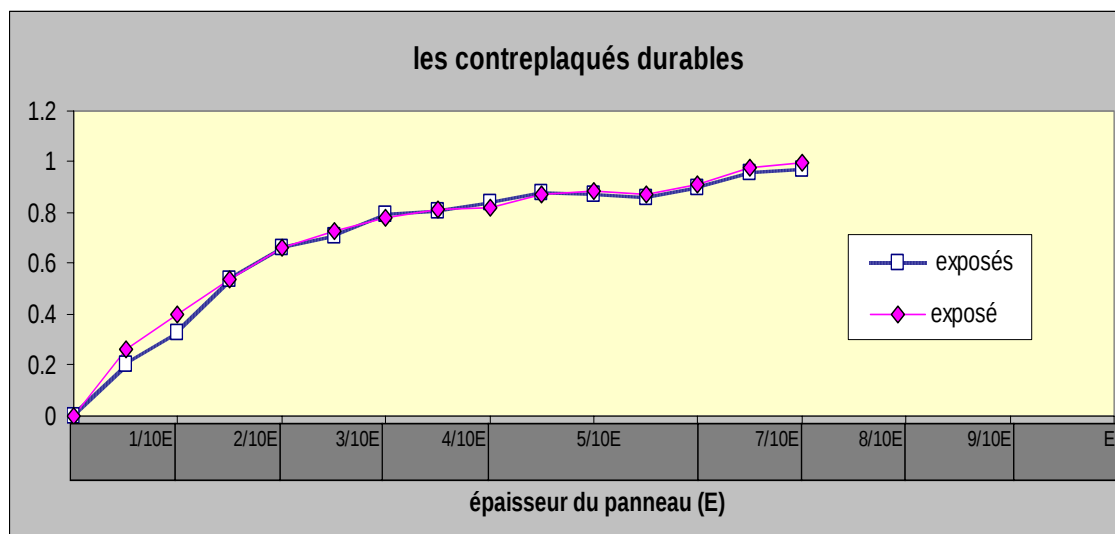


Figure 97. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués purs de duramen de châtaignier, de cèdre et de cyprès en 5 et en 9 plis, sains et dégradés.

3.4.2.2 Force d'indentation pour les contreplaqués en mélange d'essences durables et non durables

Nous présentons pour chaque modèle de 1 à 11 (pour tous les mélanges confondus) les deux courbes descriptives moyennes de la force avant et après exposition au *C. versicolor*.

Modèle 1 :

Pour une perte de masse moyenne de 10% de tous les mélanges confondus, on remarque les détails suivants :

- Un démarrage identique pour les contreplaqués sains et les contreplaqués dégradés jusqu'à $\frac{1}{4}$ (0.65mm) de l'épaisseur du premier pli durable. C'est l'élasticité de ce pli qui explique la pente au démarrage et elle n'a pas été modifiée par l'action du champignon.
- Une forte chute de la pente dans toute la fin de la phase 1 due à la dégradation forte des couches internes qui ne supportent plus la flexion de la couche durable (Fig. 98-99).

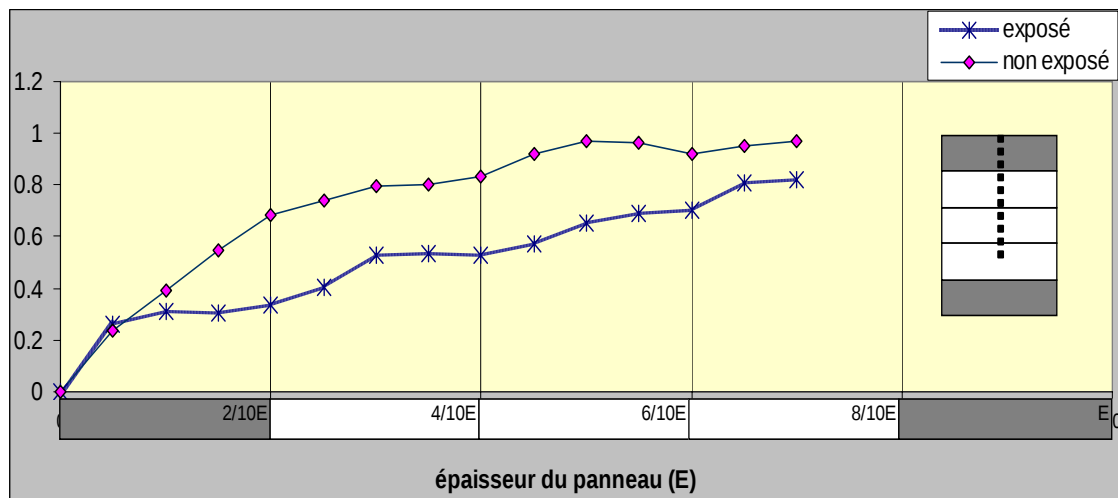


Figure 98. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués mélangés selon le modèle 1 (valeur moyenne pour tous les mélanges réalisés).

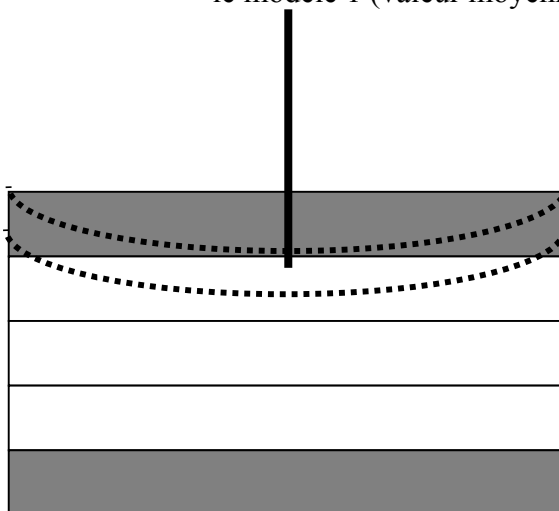


Figure 99. Déplacement de la première couche durable non supportée par les couches dégradées.

- Après percement de la première couche, l'augmentation de la force due au frottement de l'indenteur est assez similaire pour les contreplaqués sains ou dégradés.

Modèle 2 :

Pour une perte de masse moyenne de 11.4% de tous les mélanges confondus, on remarque les détails suivants :

-Dès le contact, la pente initiale dans la phase 1 est nettement inférieure pour le panneau attaqué ce qui signifie la présence de pourriture dans la première couche non durable. La pente redevient similaire à celle du panneau sain à l'approche et au contact de la deuxième couche durable

-Une deuxième chute marquée apparaît à l'approche de la troisième couche non durable qui ne soutient pas la couche 2.

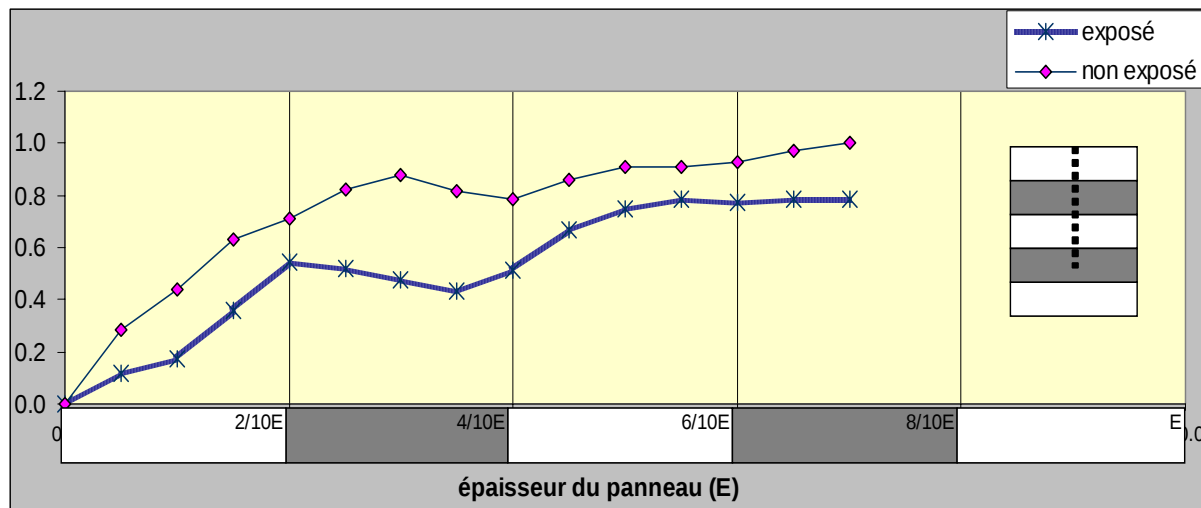


Figure 100. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués mélangés selon le modèle 2 (valeur moyenne pour tous les mélanges réalisés).

-La différence des valeurs de la force à la fin d'essai entre la courbe saine et la courbe exposée confirme la présence de la pourriture dans la couche 5 de ce modèle.

Modèle3 :

Pour une perte de masse moyenne de 7.2% de tous les mélanges confondus, on remarque les détails suivants :

- Le début de la phase 1 est quasiment identique pour les panneaux sains ou attaqués pendant une période bien plus longue que pour le modèle 1. La première couche intacte est mieux soutenue par la couche 2 non durable, elle-même bien soutenue par la couche 3 durable. En fin de phase 1, à l'approche de cette couche 2 dégradée, la diminution de pente est très sensible, un décrochement net signale l'approche de cette couche.

- dans la troisième phase, l'approche de la couche 4 dégradée est signalée de façon assez discrète par un léger décrochement.

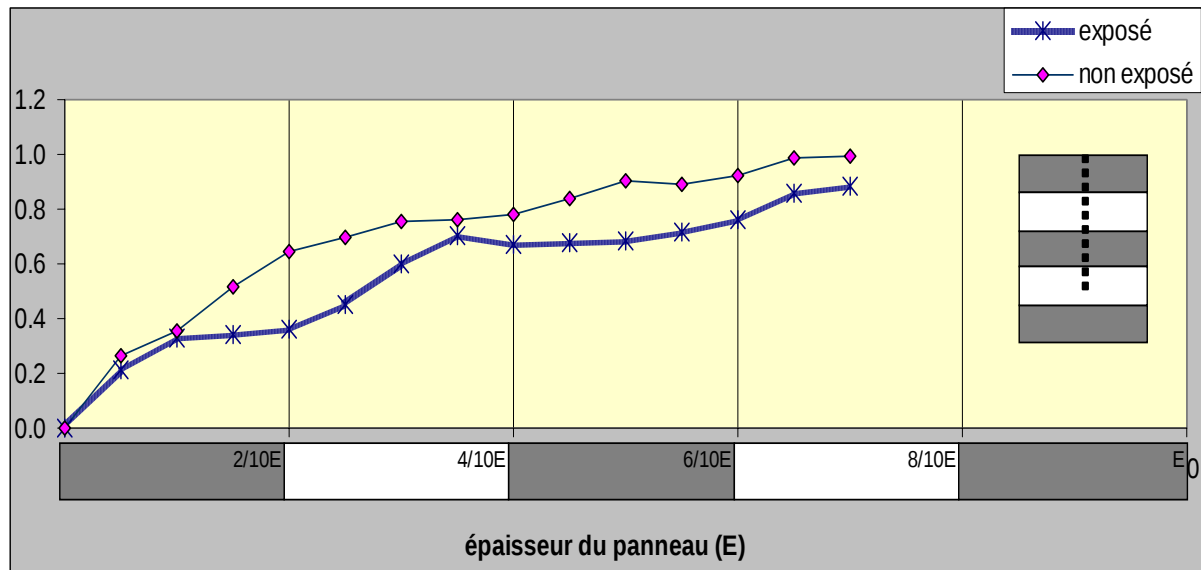


Figure 101. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués mélangés selon le modèle 3 (valeur moyenne pour tous les mélanges réalisés).

Modèle 4 :

Pour une perte de masse moyenne de 11.2% de tous les mélanges confondus, on remarque les détails suivants :

- Comme dans le modèle 2, la pente initiale de la phase 1 est nettement plus faible pendant une moitié de l'épaisseur de la première couche non durable, donc très dégradée. A l'approche des couches 2, 3 et 4 durables, la pente remonte au même niveau que pour le panneau sain.
- Dans la phase 2, les deux courbes se rejoignent et un nouveau décrochement, moins sensible, est observé à l'approche de la couche 5 non durable.

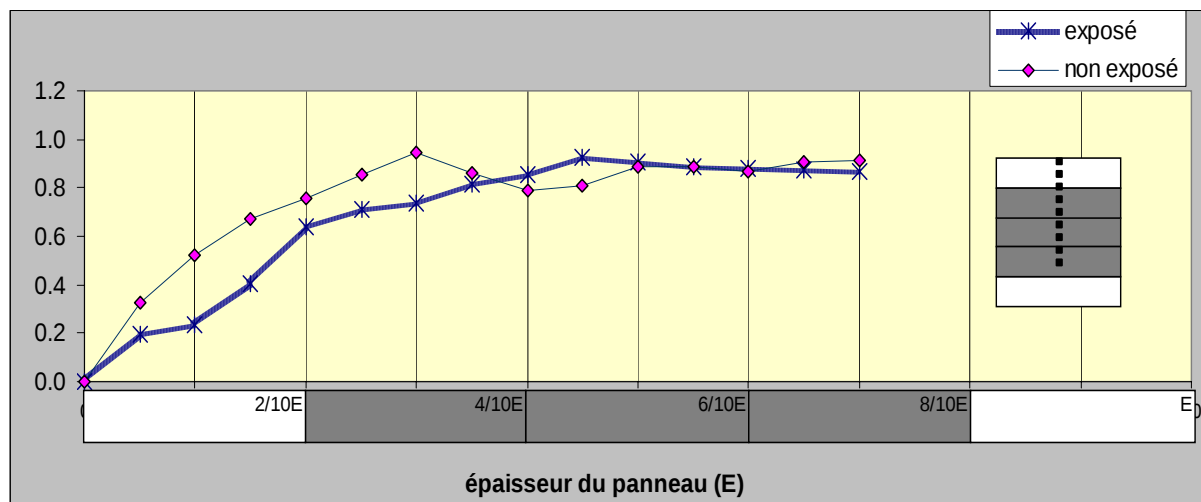


Figure 102. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués mélangés selon le modèle 4 (valeur moyenne pour tous les mélanges réalisés).

Modèle 5 :

Pour une perte de masse moyenne de 8.6% de tous les mélanges confondus, on retrouve des courbes très similaires à celles du modèle 1. La seule différence entre les deux modèles est le nombre de plis, donc de joints de colle, ce qui augmente légèrement la résistance à Coriolus.

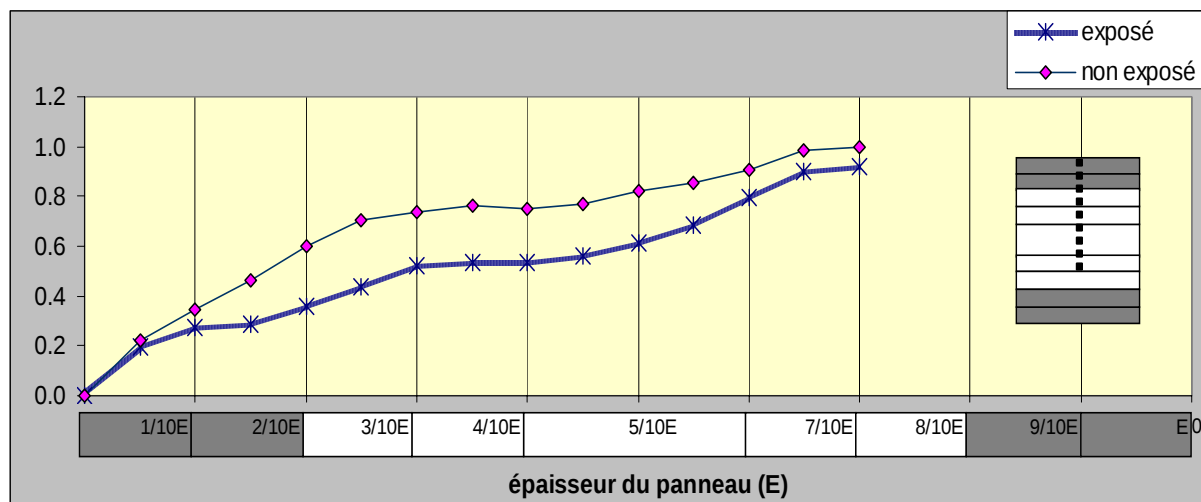


Figure 103. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués mélangés selon le modèle 5 (valeur moyenne pour tous les mélanges réalisés).

Modèle 6 :

Pour une perte de masse moyenne de 10.8 % de tous les mélanges confondus, on trouve des courbes semblables à celles du modèle 4 sauf que l'épaisseur de la partie externe non durable est 50% plus élevée. La diminution de la pente initiale dure donc plus longtemps et l'effet des couches inférieures non durables est plus net, ce qui empêche la jonction des courbes dans la phase 2.

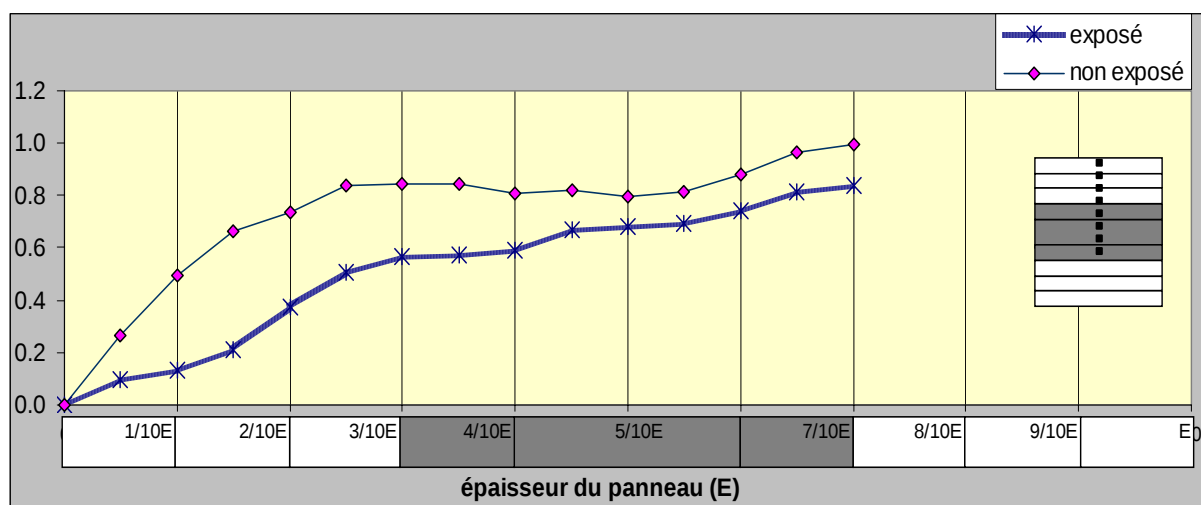


Figure 104. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués mélangés selon le modèle 6 (valeur moyenne pour tous les mélanges réalisés).

Modèle 7 :

Pour une perte de masse moyenne de 8.9 % de tous les mélanges confondus, on remarque les détails suivants :

- Bien que la première couche soit durable, on observe une diminution de la pente initiale. Cette première couche est deux fois plus mince que dans le modèle 2 et son comportement en flexion est immédiatement sensible à l'absence de support par la couche 2 dégradée.
- La présence de la couche 3 durable fait un peu remonter la pente à son approche. Mais cette couche 3 repose sur trois couches successives non durables, ce qui limite son efficacité.

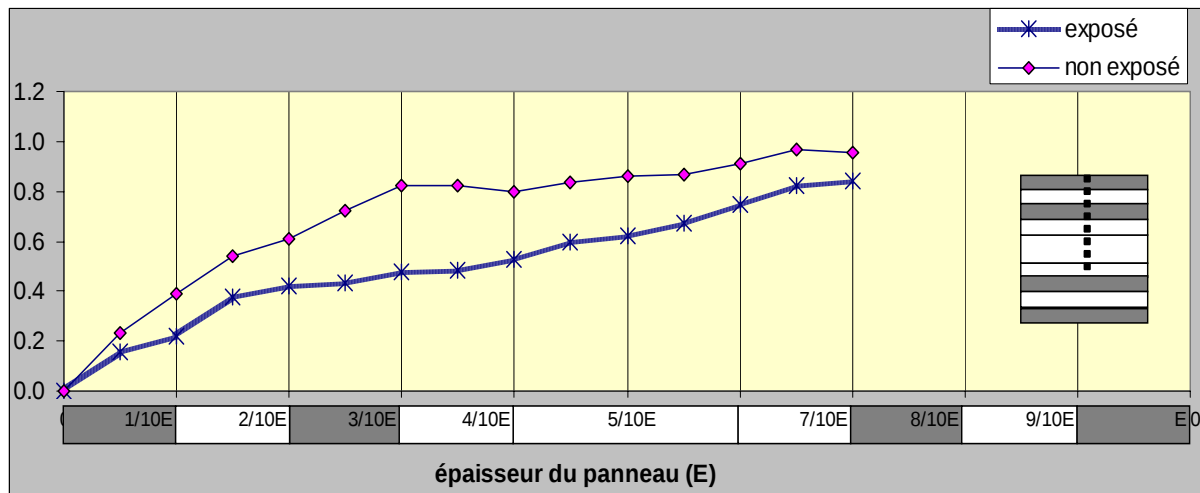


Figure 105. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués mélangés selon le modèle 7 (valeur moyenne pour tous les mélanges réalisés).

- Vers la fin de l'essai, la présence des couches 7 et 9 durables provoque une augmentation de la pente et un rapprochement des courbes.

Modèle 8 :

Pour une perte de masse moyenne de 10.2% de tous les mélanges confondus, on remarque les détails suivants :

- Dans la phase 1, la succession rapprochée de couches minces non durables et durables se traduit par un comportement équivalent à un matériau globalement plus souple, sans que les transitions de couches soient marquées, contrairement à la succession de couches épaisses.

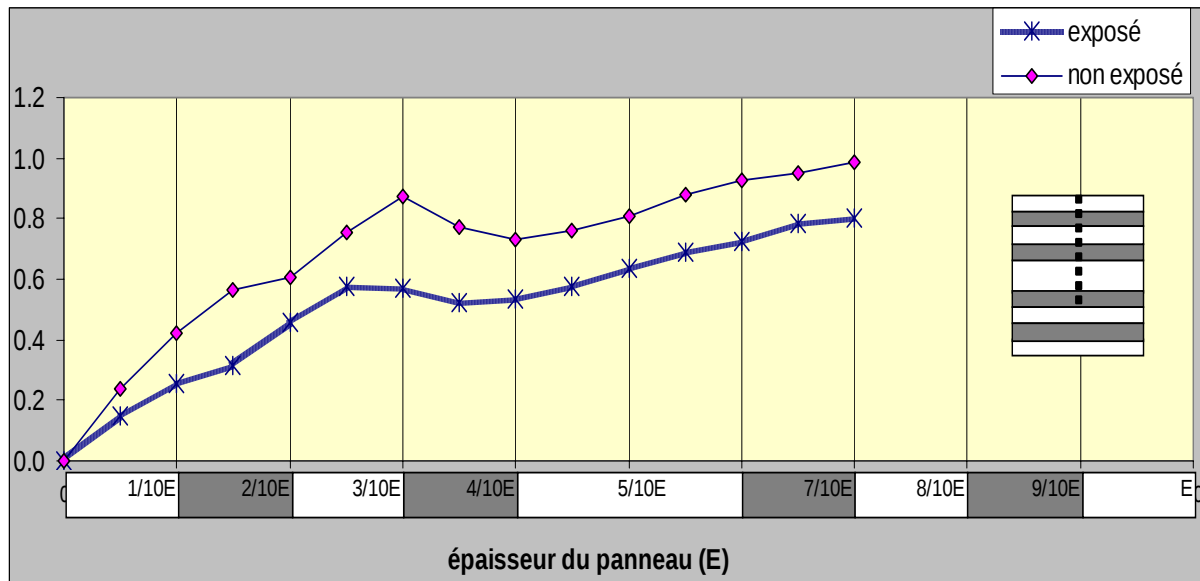


Figure 106. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués mélangés selon le modèle 8 (valeur moyenne pour tous les mélanges réalisés).

Modèle 9 :

Pour une perte de masse moyenne de 5.7 % de tous les mélanges confondus, on remarque les détails suivants :

- Dans la première phase, la pente reste élevée presque aussi longtemps pour le panneau dégradé que pour le panneau sain. La forte épaisseur des 3 couches durables explique que le comportement élastique global de ces 3 couches soit très dominant. La chute de pente ne se produit, de manière durable qu'à l'approche du groupe de couches 4, 5 et 6 non durables.
- Dès le milieu de ce groupe de couches non durables, la proximité des 3 dernières couches durables fait remonter la pente et les courbes vont se rejoindre.

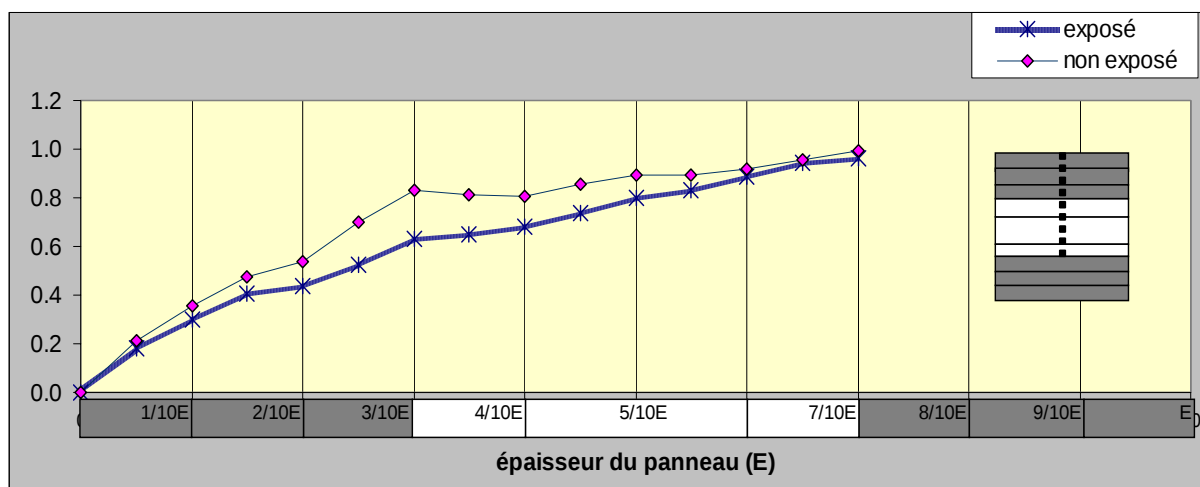


Figure 107. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués mélangés selon le modèle 9 (valeur moyenne pour tous les mélanges réalisés).

Modèle 10 :

Pour une perte de masse moyenne de 7.7% de tous les mélanges confondus, on remarque les détails suivants :

- La pente initiale de la phase 1 est nettement diminuée pour le panneau attaqué, preuve que les 2 premières couches non durables sont très dégradées. La présence des 5 couches suivantes durables explique le redressement de la pente qui reste longtemps similaire pour les panneaux sains et attaqués.

-La raideur du groupe de plis durables au centre explique que les courbes se rejoignent un moment, mais rapidement, le manque de support des deux derniers plis dégradés, provoque un nouveau décrochement de la courbe pour le panneau dégradé.

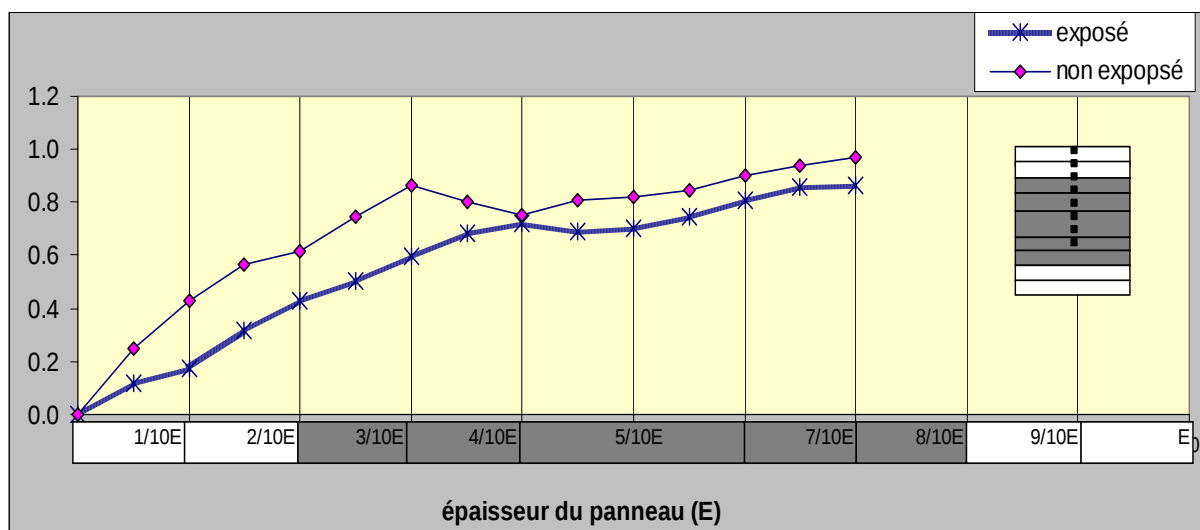


Figure 108. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués mélangés selon le modèle 10 (valeur moyenne pour tous les mélanges réalisés).

Modèle 11:

Pour une perte de masse moyenne de 6.9 % de tous les mélanges confondus, ce panneau constitué d'une succession de couches minces alternativement durables et non durables, se comporte comme le modèle 8. Le panneau attaqué est similaire à un panneau pur constitué d'une essence plus souple que dans le panneau sain.

Comme le pourcentage de plis durables est plus élevé que dans le modèle 8, la différence entre panneau sain et attaqué est plus faible et les courbes sont plus proches. La différence un peu plus prononcée de la pente initiale entre panneau sain et attaqué, pour le modèle 8 permettrait peut-être de distinguer la présence d'un pli de face non durable dans ce cas alors que c'est l'inverse pour le modèle 11.

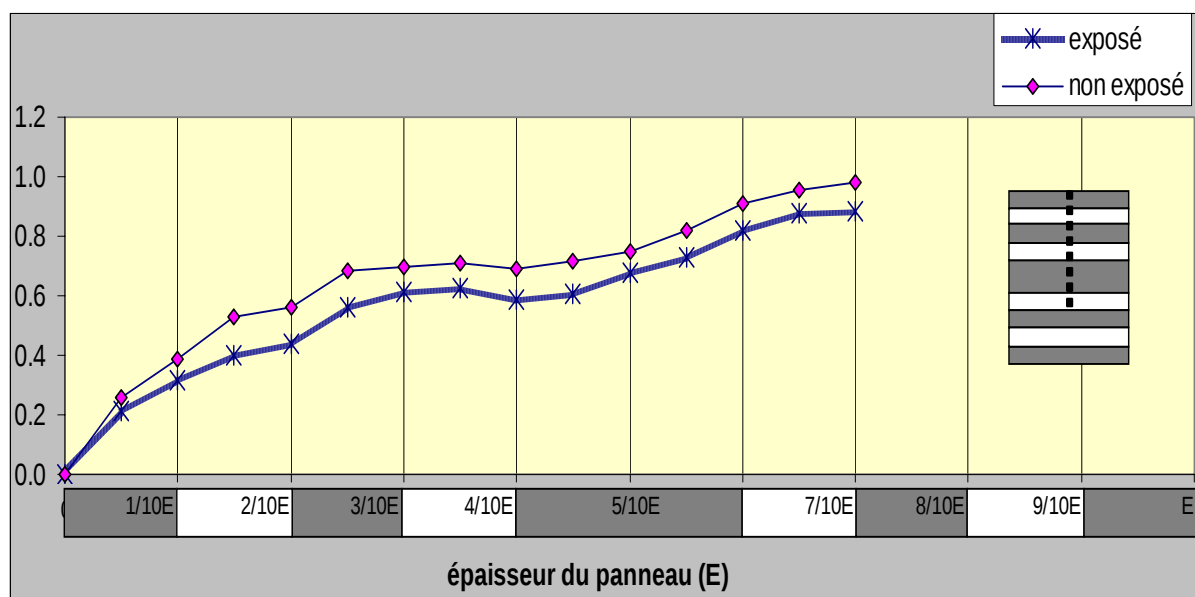
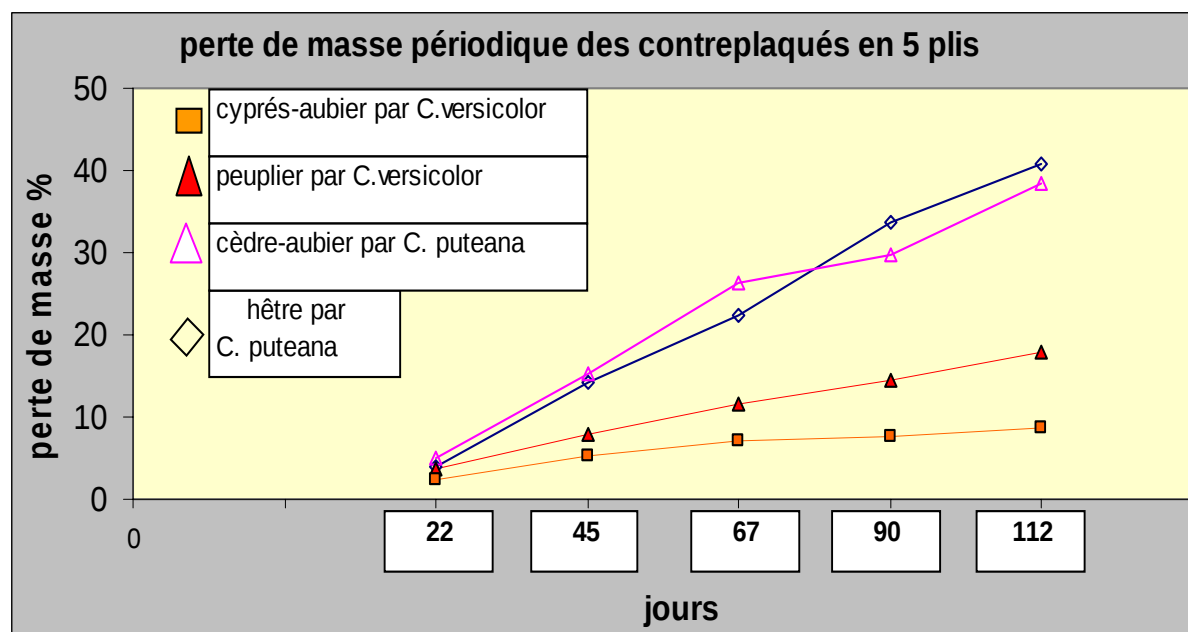


Figure 109. Les courbes de la force d'indentation pour les contreplaqués mélangés selon le modèle 11 (valeur moyenne pour tous les mélanges réalisés).

3.4.3 Les essais périodiques d'indentation

Après la détermination de perte de masse périodique, nous avons testé l'énergie d'indentation de 4 différents contreplaqués purs en 5 plis vis-à-vis des deux types d'agent de pourriture utilisés dans cette étude, blanche ou fibreuse (*C. versicolor*) et brune ou cubique (*C. puteana*). L'intervalle entre les mesures a été de 22 jours $\pm$ 1/2jour, nous avons arrêté l'exposition respectivement à 22 jours, à 45 jours, à 67 jours, à 90 jours et à 112 jours. La figure 110 présente 4 séries de pertes de masse engendrées par les deux champignons d'essai.

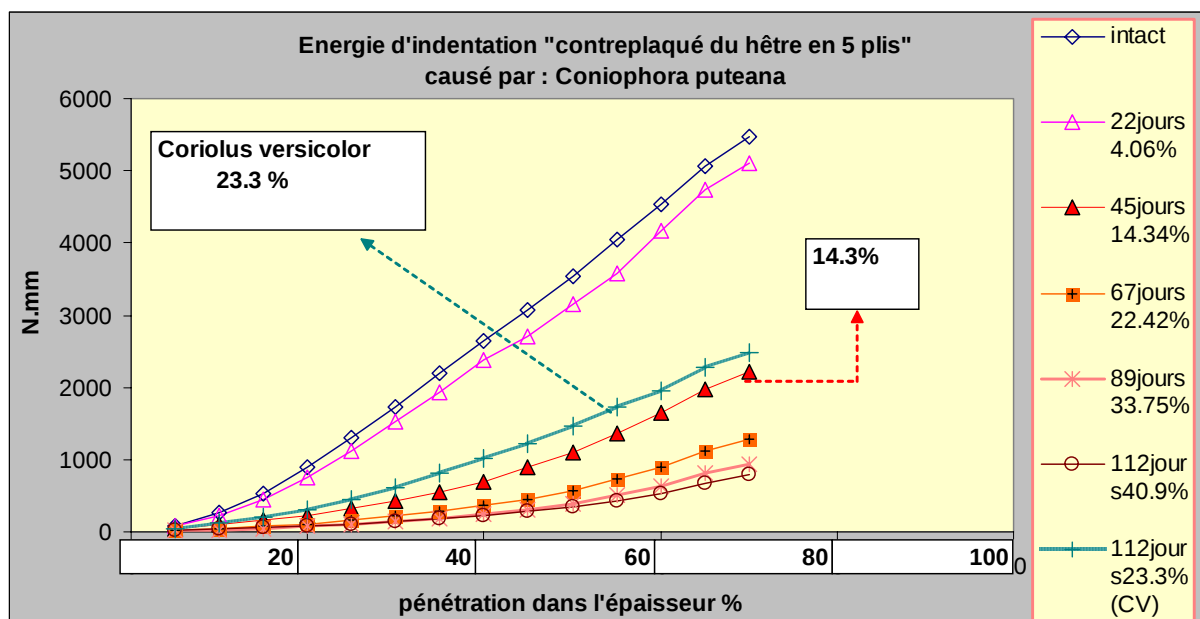


La figure 110. Les pertes de masse engendrées pour différents contreplaqués feuillus et résineux par *Coriolus versicolor* et *coniophora puteana*.

Les résultats présentent différentes activités de chaque champignon sur les différents types de contreplaqués. Cet essai périodique confirme les résultats obtenus pour les essais normalisés : l'attaque plus forte de *C. puteana*, pour les deux groupes de feuillus et de résineux de cette étude, que celle de *C. versicolor* et la meilleure résistance des aubiers de cyprès et de cèdre.

Dans les figures suivantes nous présentons les courbes de l'énergie d'indentation cumulée pour les états intact et exposé aux champignons pour chaque panneau cité ci-dessus.

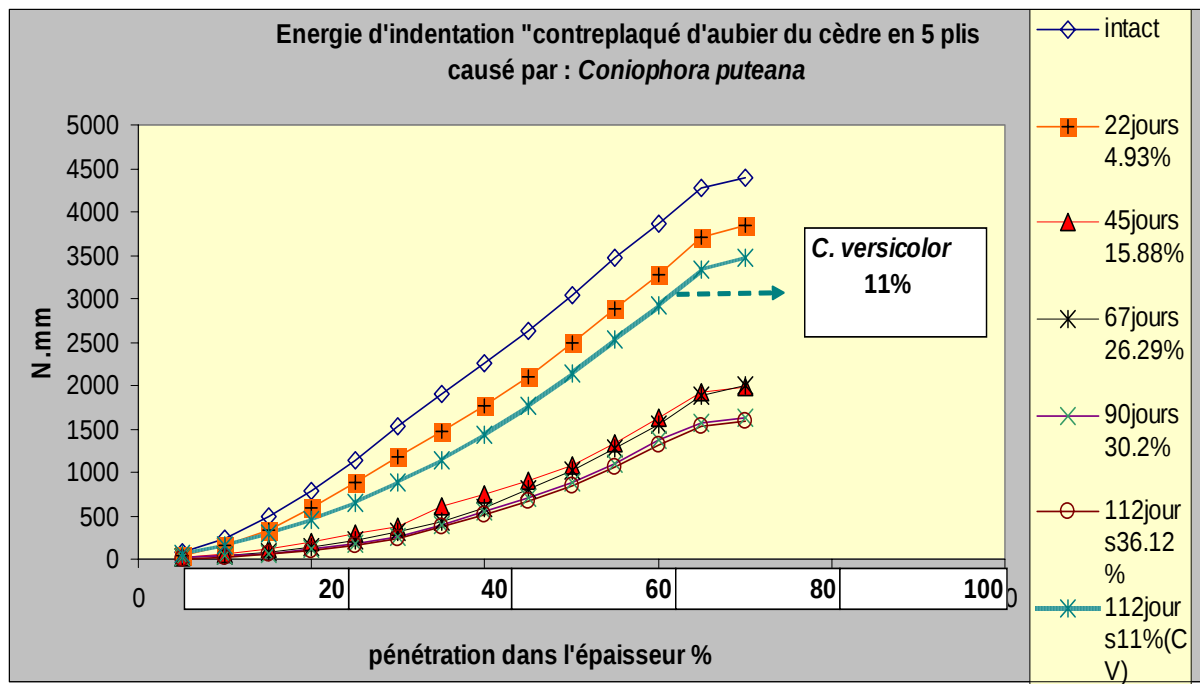
La figure 111 présente l'énergie d'indentation de l'état sain et des états dégradés (périodiquement) du panneau de hêtre en 5 plis exposé à *Coniophora puteana*. La courbe moyenne de la première sortie des éprouvettes de contreplaqué de hêtre avec une perte de masse de 4.1% présente une diminution de l'énergie d'indentation de 6.8 % mais après 45 jours en arrivant à une perte de masse de 14.3 % on observe une chute assez remarquable de l'énergie d'indentation dans les éprouvettes de deuxième sortie, il s'agit d'une chute de 59.6% d'énergie dans le cas d'une pourriture brune, qui est environ 4 fois plus sensible que le critère de perte de masse.



La figure 111. Les courbes d'énergie d'indentation de l'état sain et l'état exposé à *Coniophora puteana* en intervalle de 22 jours.

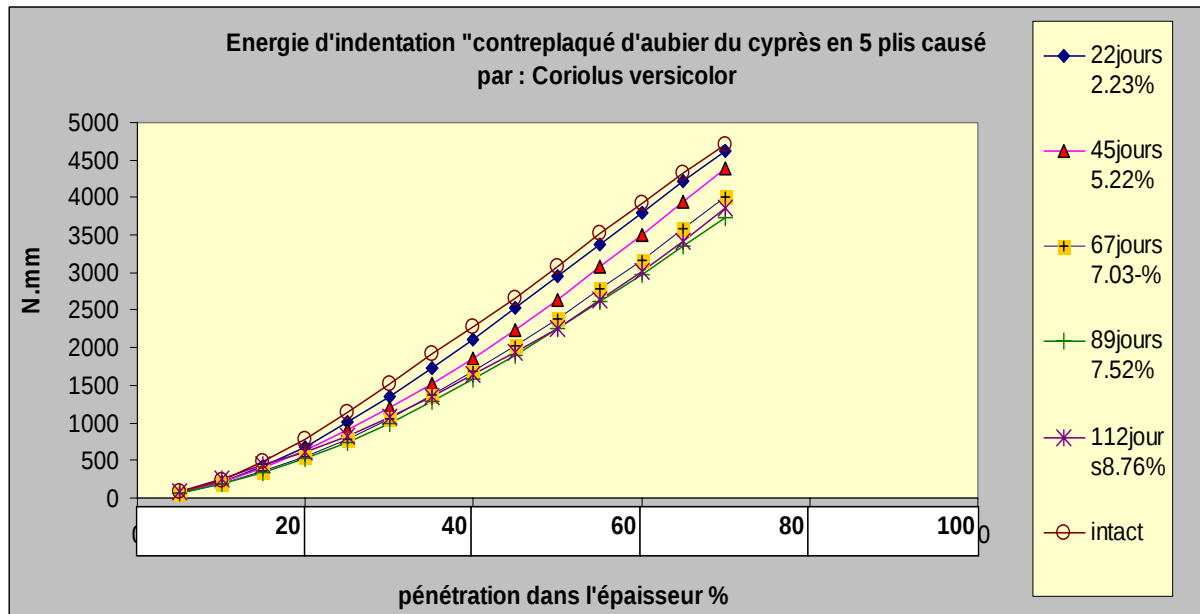
La courbe d'énergie d'indentation du hêtre en 5 plis dégradé par *C. versicolor* (pourriture blanche), à 23,3 % de perte de masse se situe à une position supérieure à la courbe de perte de masse à 14,3 % engendrée par *C. puteana* (pourriture brune), ce qui confirme une plus forte perte de résistance mécanique dans le cas de la pourriture cubique par rapport à la pourriture blanche.

La figure 112 présente l'énergie d'indentation de l'état sain et des états dégradés (périodiquement) du panneau d'aubier de cèdre en 5 plis exposé à *Coniophora puteana*. Une décroissance de l'énergie d'indentation après une perte de masse de 4.93% causée par *C. puteana* cause une diminution de l'énergie d'indentation de 12.6%. Après 45 jours d'exposition, on observe une chute de l'énergie d'indentation de 54.8% pour 15.3 % de perte de masse. La diminution de l'énergie dans ce panneau après 11% perte de masse causée par *C. versicolor* est plus proche de la diminution observée pour une perte de masse de 4.9% que pour la perte de 15.9 % avec *Coniophora*.



La figure 112. Les courbes d'énergie d'indentation de l'état sain et l'état exposé à *Coniophora puteana* en intervalle de 22 jours.

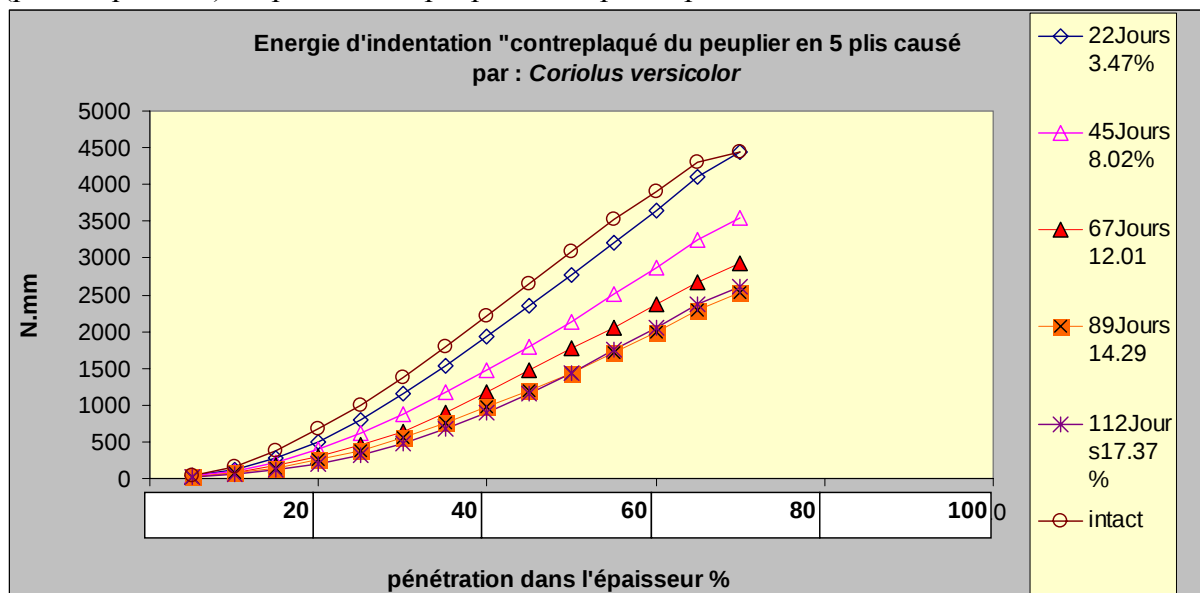
La figure 113 présente les courbes de l'énergie de l'état intact et des états exposés à *C. versicolor* provenant de l'indentation d'un panneau de 5 plis en aubier de cèdre. La perte de masse obtenue en fin d'essai (8.8 %) est relativement faible par rapport aux deux dernières séries de courbes présentées (figures 111 et 112).



La figure 113. Les courbes d'énergie d'indentation de l'état sain et l'état exposé à *Coriolus versicolor* en intervalle de 22 jours.

Pour une perte de masse de 5.2 % (de type de pourriture blanche) nous trouvons 6.3% de décroissance d'énergie et pour une perte de masse de 7 %, la diminution de l'énergie d'indentation a été de 14.3%.

La figure 114 présente l'énergie d'indentation de l'état sain et des différents états dégradés (périodiquement) du panneau de peuplier en 5 plis exposés à *Coriolus versicolor*.



La figure 114. Les courbes d'énergie d'indentation de l'état sain et l'état exposé à *Coriolus versicolor* en intervalle de 22 jours.

Pour une perte de masse de 8% nous avons trouvé 20.1% de diminution de l'énergie d'indentation et pour une perte de masse de 12%, 34.3% de diminution.

Une comparaison générale des 4 séries d'essai périodique donne les résultats suivants :

- Pour une perte de masse donnée, la diminution de l'énergie d'indentation de la pourriture brune (*C. puteana*) et plus importante que pour la pourriture blanche (*C. versicolor*). Donc

l'estimation du niveau de la perte de masse à partir de la diminution de l'énergie d'indentation doit être adapté en fonction du type de pourriture. Il faut pondérer cette analyse par la dégradation constatée du plan de colle lui-même, ce qui peut affecter notablement la mesure d'indentation.

-La diminution de l'énergie d'indentation en fonction de la perte de masse est plus importante dans les premiers stades de la dégradation.

3.4.4 Indentation par l'autre face

L'étude de la force d'indentation nous a révélé un éventuel gradient de perte de résistance dans certains contreplaqués. Dans un flacon de test, l'activité des champignons commence par le côté en face du milieu de culture (figure 115). Il nous a paru intéressant de réaliser une série de mesures pour lesquelles l'indenteur attaque d'abord la face du panneau opposée au milieu de culture pour évaluer une influence éventuelle de la face indentée.

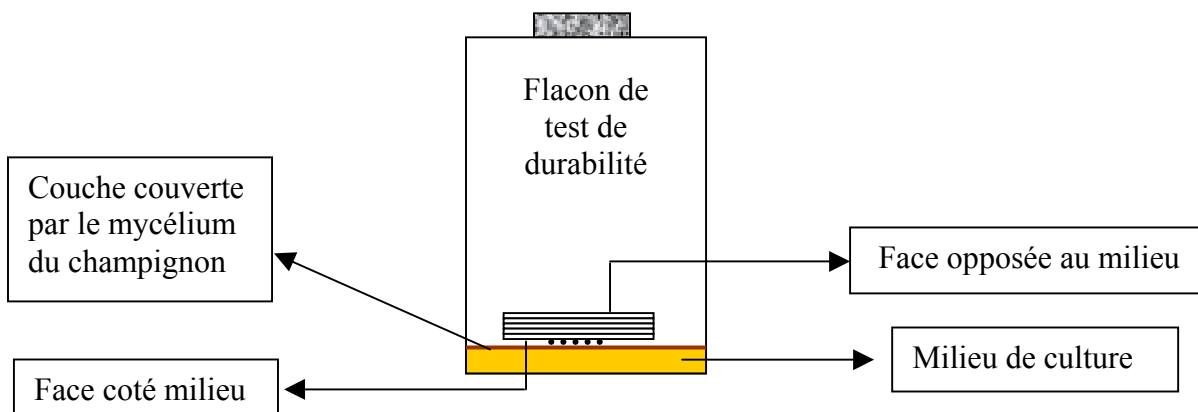


Figure 115. Les deux faces de l'éprouvette par rapport au milieu de culture.

La figure 116 présente l'énergie d'indentation mesurée pour huit contreplaqués purs et mélangés de peuplier et de châtaignier en attaquant par chacune des deux faces pour le panneau dégradé.

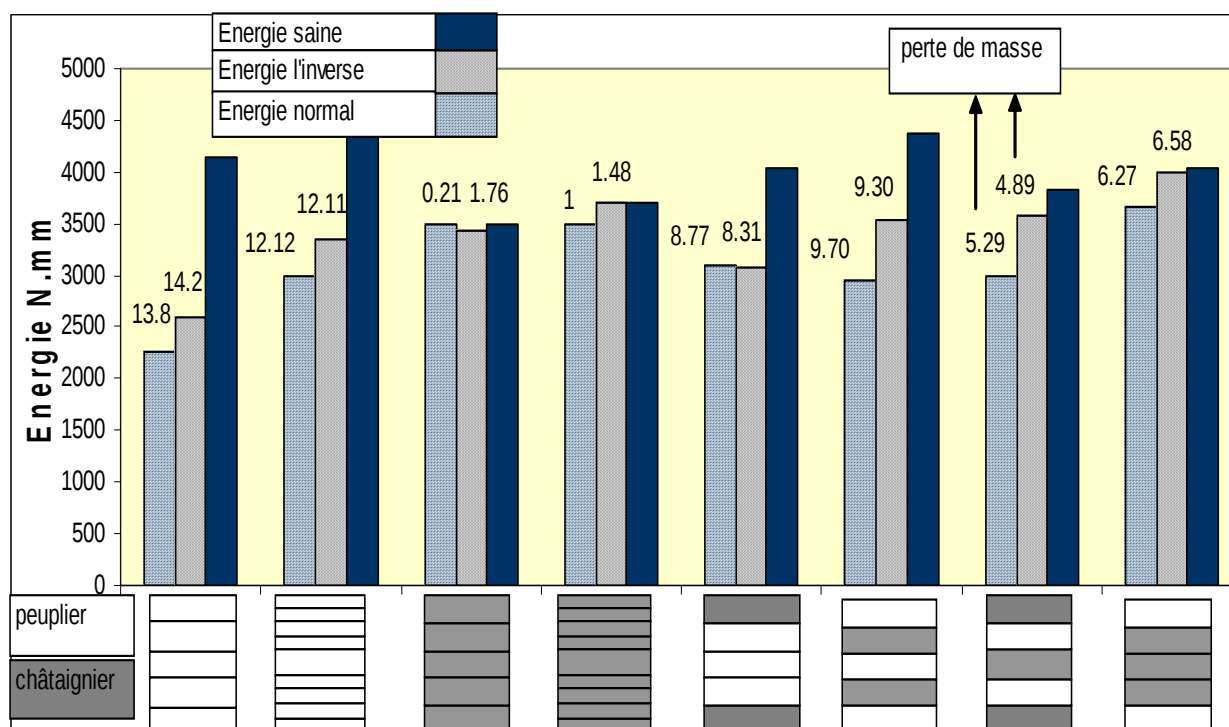


Figure 116. La mesure de l'énergie d'indentation par la surface d'éprouvette opposée au milieu de culture (l'inverse), ou du côté de celui-ci (normal). Les chiffres représentent la perte de masse des contreplaqués testés.

La différence est statistiquement significative entre la pénétration par la face opposée au milieu de culture et par la face du côté de celui-ci. Les différences sont évidemment plus sensibles pour les panneaux contenant des plis non durables. Il vaut mieux, comme cela fut le cas dans cette étude, faire l'essai d'indentation toujours sur la face du côté du milieu de culture.

3.4.5 Discussion

L'essai d'indentation est un essai rapide et facile à mettre en œuvre. L'estimation de la chute relative de l'énergie dépensée pour la pénétration d'au moins une demi épaisseur de panneau est très bien corrélée à la perte de masse de l'essai de référence. Elle a l'avantage d'être deux fois et demi plus sensible. Il serait donc tout à fait possible de l'utiliser en routine, en réduisant le temps d'essai pour les contreplaqués purs (ou les bois massifs, bien que cela n'ait pas été testé ici).

Pour les contreplaqués mélangés, le type de mélange modifie légèrement la relation entre perte de masse de l'essai normalisé et diminution de l'énergie d'indentation. L'examen de la courbe force / déplacement de l'indenteur, par comparaison entre un panneau mélangé sain et attaqué, permet d'obtenir des renseignements plus précis sur la distribution interne de l'attaque.

Cette courbe est fortement dépendante du comportement en déflexion sous une charge concentrée d'un multicouche comportant des plis de raideurs très contrastées. La signature

obtenue par cet essai n'est donc pas liée d'une manière évidente à la succession des couches dures et molles. Pour être capable de détecter et de positionner les couches dégradées avec une certitude et une précision suffisante, il faudra un travail préalable de modélisation de l'indentation qui n'est pas réalisé dans cette thèse.

Par contre, le grand nombre de données expérimentales acquises dans ce travail devrait permettre de tester et valider un modèle par éléments finis pertinent. Il faudra ensuite en tirer un outil numérique utile pour décoder le signal d'indentation dans une configuration a priori inconnue.

Il faudrait aussi examiner l'influence d'une variation d'humidité seule, sans processus de dégradation. Les variations d'humidité du bois ont une influence limitée sur le module d'élasticité axiale (chute de 10 à 20% entre le bois sec à 12% et le bois vert) mais plus importante sur la « portance » (résistance en compression transverse) des couches inférieures (chute de 30 à 40% dans les mêmes conditions).

Par ailleurs il y a une corrélation significative entre la réhumidification d'une pièce de bois et son attaque par les champignons. La décroissance d'énergie en conditions réelles in situ, sans séchage préalable comme dans ces essais, sera plus importante et certainement aussi fortement corrélée à l'état de dégradation de la pièce.

3.5 Résultats des essais de cisaillement des contreplaqués purs et mélangés

Nous présentons les résultats de cisaillement des panneaux de contreplaqué d'abord pour les contreplaqués purs et ensuite pour les contreplaqués en mélanges d'essences durables et non durables. Les résultats sont exprimés en % pour la perte de résistance au cisaillement entre l'état sain (non exposé) et l'état dégradé des éprouvettes d'un panneau exposé à *C. versicolor*.

3.5.1 Perte de résistance au cisaillement de contreplaqués purs

La rupture dans les éprouvettes exposées au champignon s'est toujours produite du côté du milieu de culture, ce qui confirme l'existence d'un gradient de dégradation dans l'épaisseur du contreplaqué (voir la différence de perte d'énergie d'indentation entre l'enfoncement du côté du milieu de culture ou du côté opposé).

Les figures 117 et 118 comparent le niveau de résistance au cisaillement avant et après l'exposition à *C. versicolor*. Le tableau 7 de l'annexe présente les valeurs moyennes de perte de résistance au cisaillement des contreplaqués purs, durables et non durables, en 5 et en 9 plis.

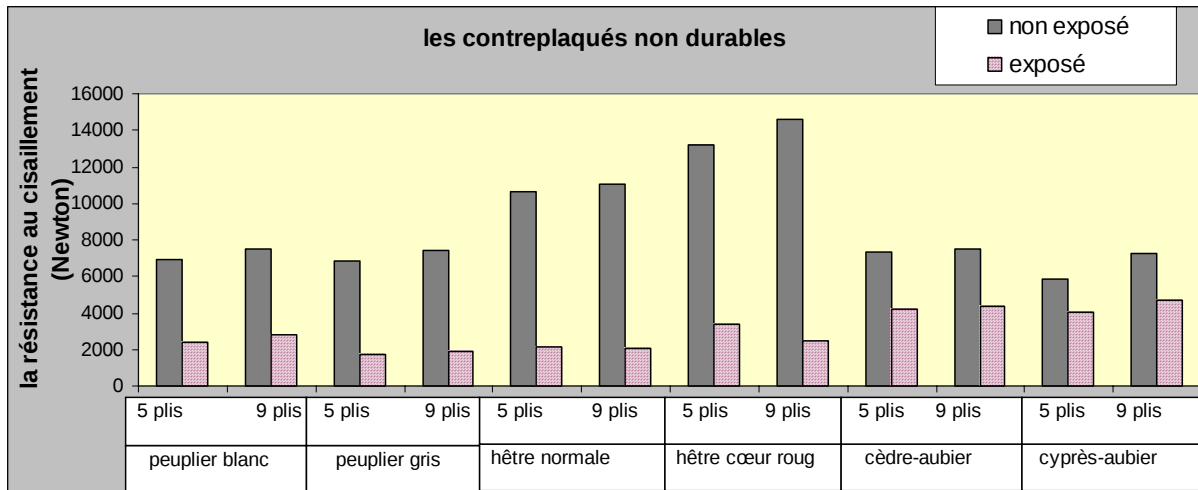


Figure 117. La perte de résistance au cisaillement dans les contreplaqués non durables due à l'exposition à *C. versicolor*.

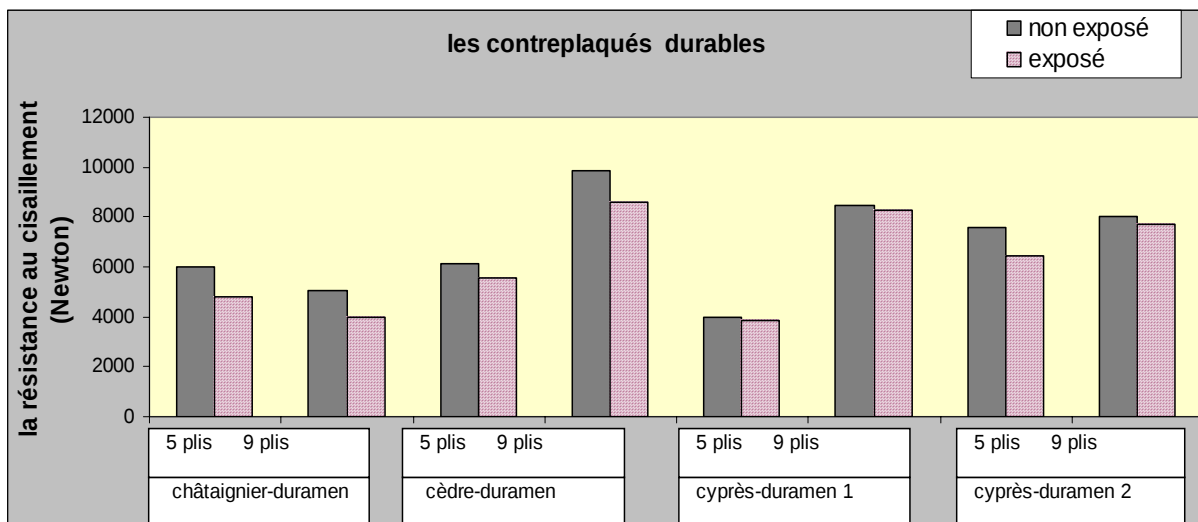


Figure 118. La perte de résistance au cisaillement dans les contreplaqués durables due à l'exposition à *C. versicolor*.

La figure 119 présente la corrélation entre la perte de masse et la perte de résistance au cisaillement dans les contreplaqués purs.

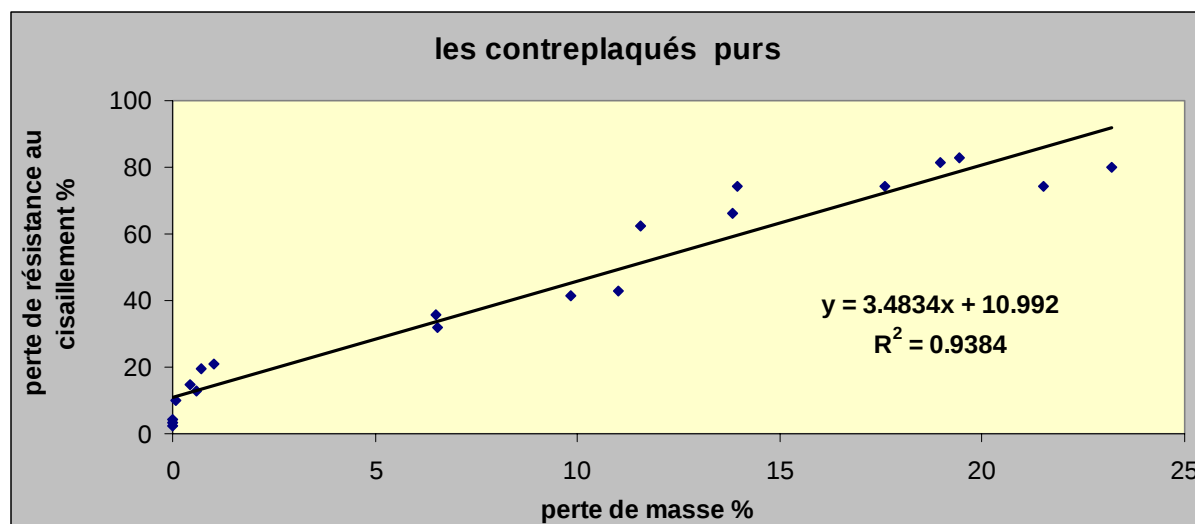


Figure 119. La corrélation entre la perte de masse et la perte de résistance au cisaillement dans les contreplaqués purs.

Les résultats présentent une forte corrélation entre la perte de masse et la perte de résistance au cisaillement dans les contreplaqués purs, les variations de l'un des paramètres expliquent 94% des variations de l'autre. Dans ce cas, la perte de masse est un bon estimateur de la perte de résistance mécanique du panneau. Cet essai est beaucoup plus sensible que la perte de masse (chute de 80% environ de la résistance au cisaillement pour 20% de perte de masse). C'est le plus sensible de tous les tests utilisés, mais il est relativement lourd pour la mise en œuvre.

La droite de régression ne passe pas par l'origine, ce qui signifierait qu'en l'absence de perte de masse, il y a une chute de résistance au cisaillement de 10%. En réalité, les contreplaqués non exposés n'ont subi aucun choc hygrothermique contrairement aux contreplaqués exposés au champignon qui ont été un peu ré humidifiés par celui-ci puis déshydratés par passage à l'étuve à 103°C pour la mesure de perte de masse et ré équilibrés à 12% dans la chambre conditionnée. Sous réserve de vérification (qui n'a pas été faite), on peut considérer que ce traitement hygrothermique est responsable d'une chute de 10% de résistance au cisaillement, indépendamment de toute action du champignon. Une fois enlevée cette perte due à la méthode, la chute de résistance au cisaillement peut être considérés comme trois fois et demi plus forte que la perte de masse (contre deux fois et demi pour l'indentation).

3.5.2 Perte de résistance au cisaillement des contreplaqués en mélange d'essences durables et non durables

Dans le cas des contreplaqués en mélange d'essences exposés au champignon, la rupture en cisaillement se produit toujours dans les plis non durables, plutôt du côté du milieu de culture, ce qui était prévisible.

Perte de masse locale et perte de masse générale.

En déterminant la perte de masse selon la norme (dite générale dans la suite) nous prenons en compte l'ensemble des couches du panneau. Mais les essais sur bois massif et contreplaqués purs en essences durables ont montré que la perte de masse est quasiment nulle dans ces cas. Il nous a paru intéressant de prendre en compte la perte de masse des seuls plis non durables,

en considérant que toute la perte de masse était localisée dans ces plis (dite perte de masse locale ci après), en pondérant simplement la perte de masse générale par le pourcentage de plis non durables. On pourrait raffiner la méthode en essayant de tenir compte, en plus, de la densité de chaque pli. Dans les figures suivantes nous avons présenté les relations pour chaque mélange réalisé entre la perte de résistance au cisaillement et la perte de masse générale d'une part, et la perte de masse locale d'autre part.

Mélange de châtaignier et de peuplier

Les contreplaqués purs de peuplier en 5 plis et en 9 plis avaient perdu respectivement 66 % et 62% de la résistance au cisaillement après l'exposition au *C.versicolor*. La figure 120 montre l'effet positif du mélange sur la résistance au cisaillement mais dans ce mélange la perte de masse des couches de peuplier est quand même assez importante pour que cette résistance soit insuffisante dans la pratique.

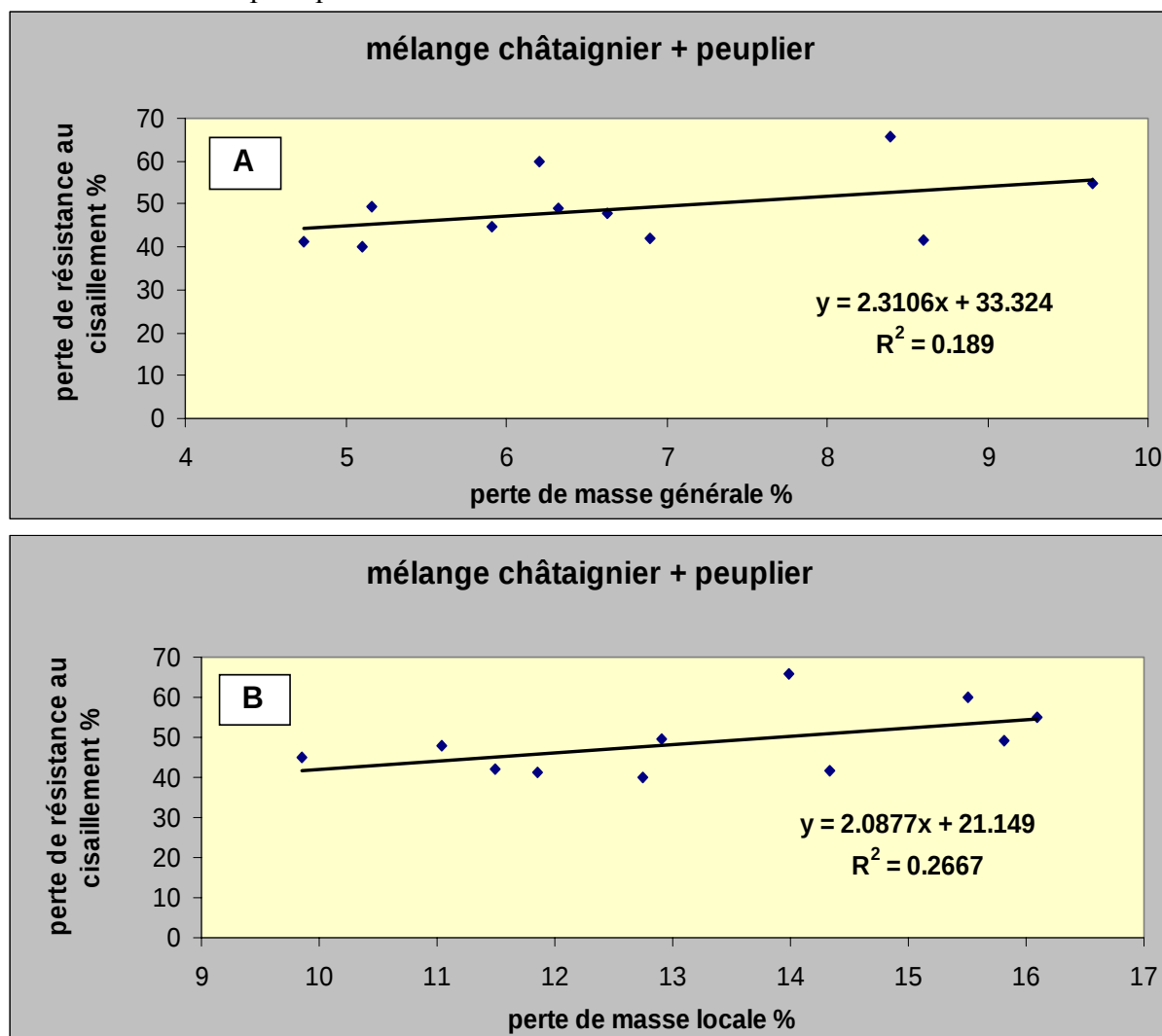


Figure 120. Les corrélations entre les pertes de masse générale (A) et locale (B) des panneaux en mélange de châtaignier et de peuplier avec la perte de résistance au cisaillement

Les meilleurs contreplaqués dans ce mélange ont été les modèles 3 et 9 ayant des couches durables en extérieur et 60 % des plis durables.

Mélange de châtaignier et de hêtre

Les contreplaqués purs du hêtre en 5 plis et en 9 plis avaient perdu respectivement 79 % et 81% de la résistance au cisaillement après l'exposition au *C.versicolor*.

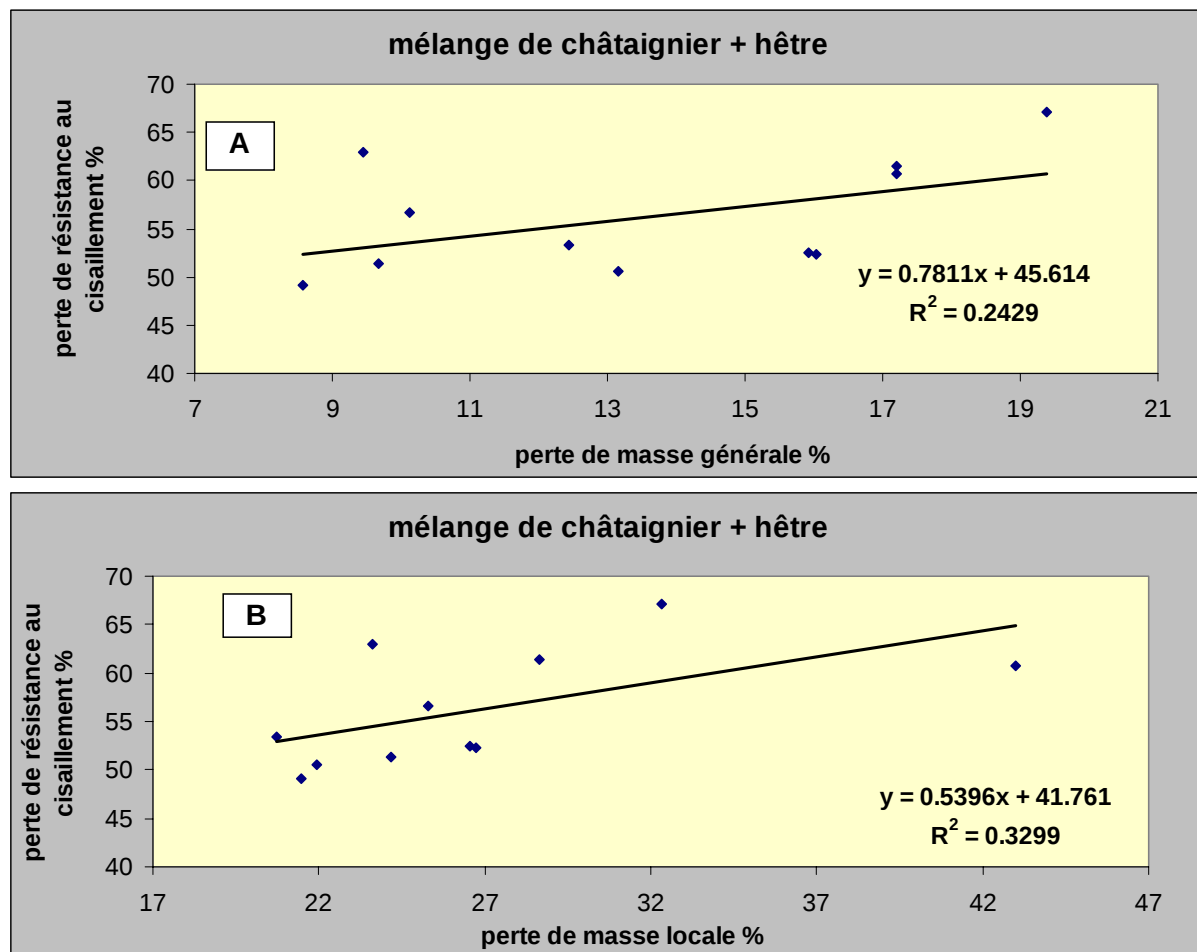


Figure 121. Les corrélations entre les pertes de masse générale (A) et locale (B) des panneaux en mélange de châtaignier et de hêtre avec la perte de résistance au cisaillement.

En comparant les résultats avec ceux du mélange de châtaignier et de peuplier nous constatons le niveau plus élevé de la perte de masse qui vient de la moindre résistance du hêtre. Les meilleurs contreplaqués dans ce mélange ont été les modèles 1 et 5 ayant des couches durables en extérieur et 40 % des plis durables.

Mélange de cèdre-duramen et de cèdre-aubier

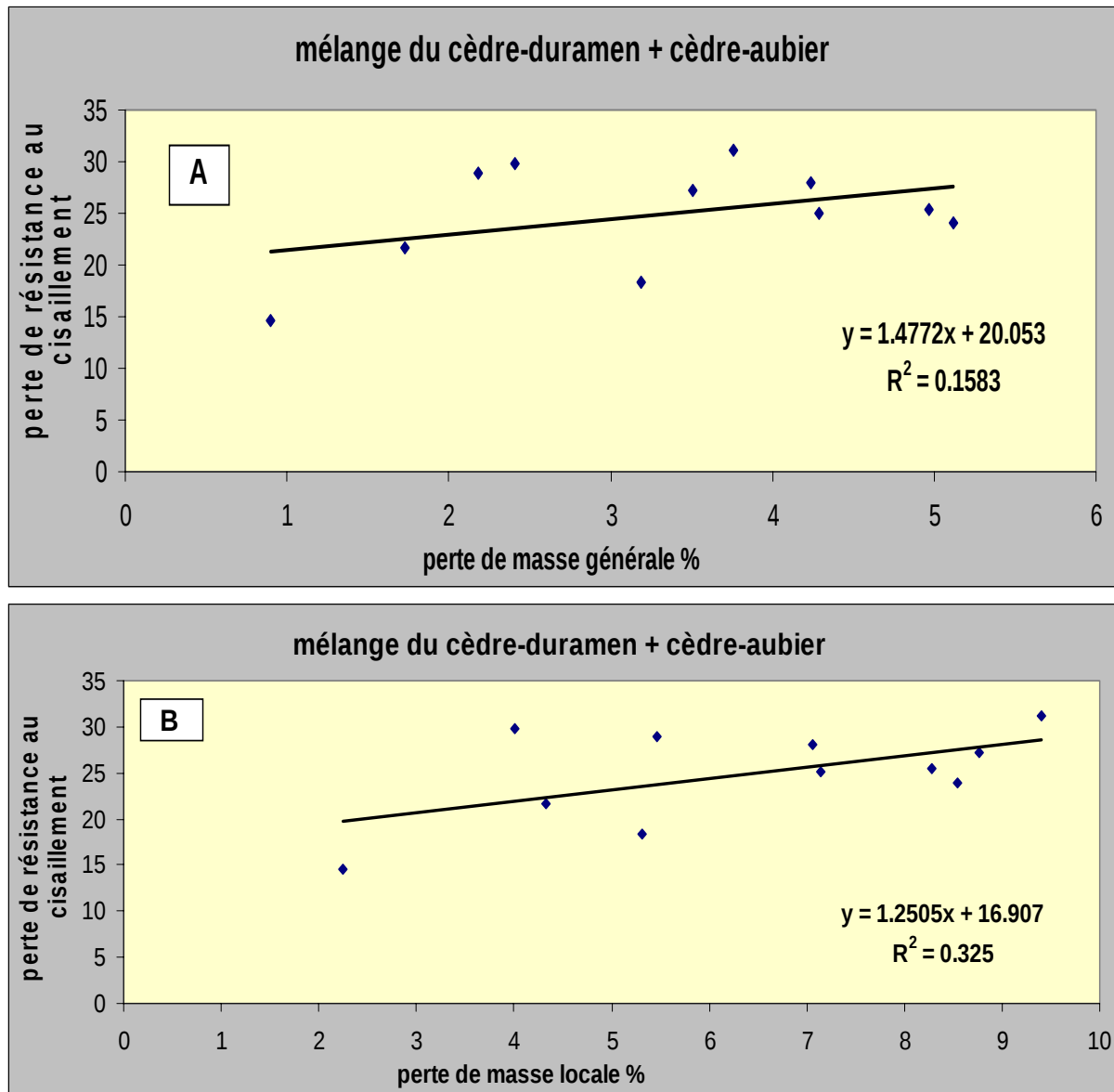


Figure 122. Les corrélations entre les pertes de masse générale (A) et locale (B) des panneaux en mélange de cèdre-duramen et de cèdre-aubier avec la perte de résistance au cisaillement.

Les contreplaqués purs de cèdre-aubier en 5 plis et en 9 plis avaient perdu respectivement 43% et 41% de la résistance au cisaillement après l'exposition au *C.versicolor*. La figure 122 prouve une amélioration de la perte de résistance au cisaillement dans les mélanges réalisés par rapport aux contreplaqués purs non durables. Les meilleurs contreplaqués dans ce mélange ont été les modèles 5 et 9 ayant respectivement 40 % et 60 % des couches durables en extérieur.

Mélange de cèdre-duramen et de hêtre

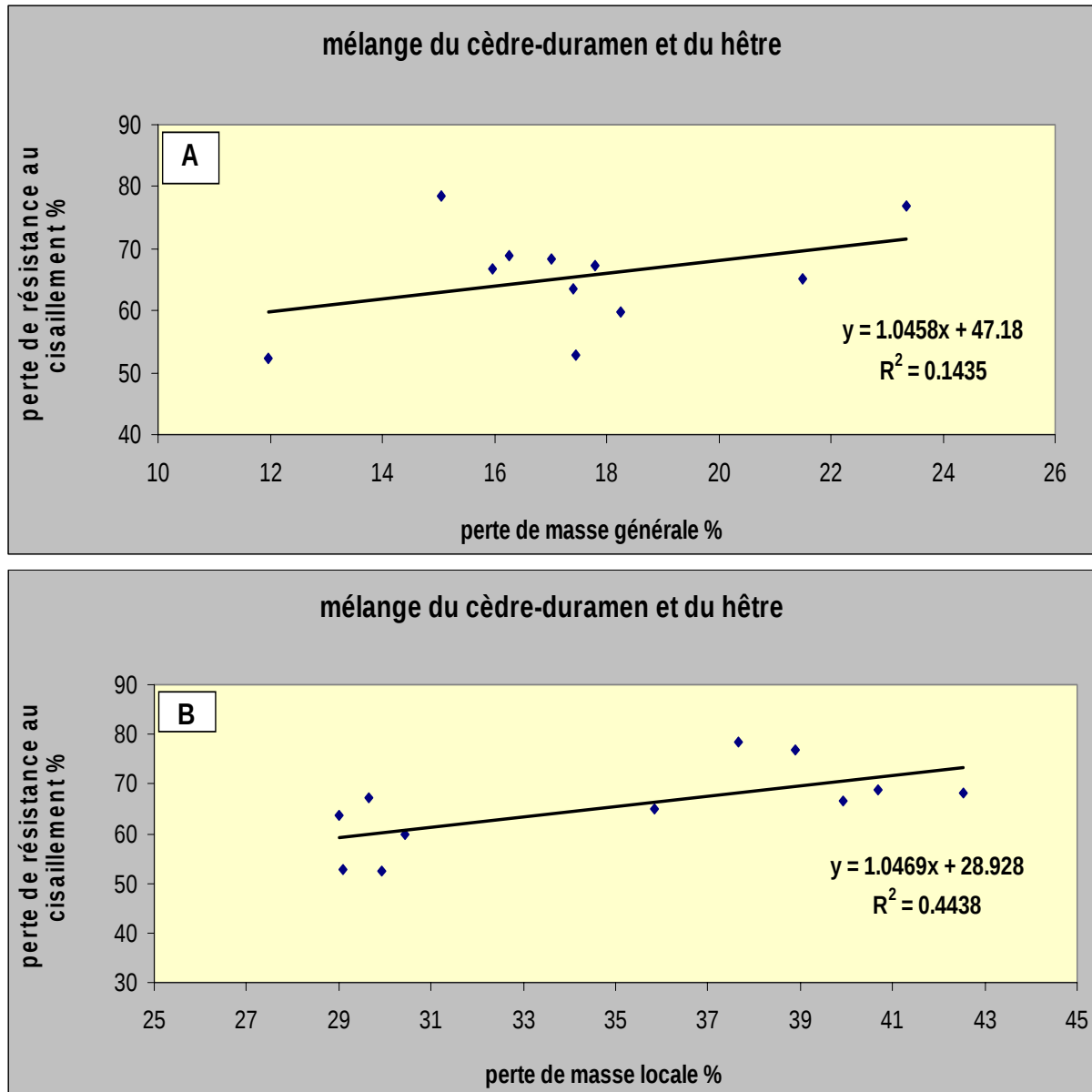


Figure 123. Les corrélations entre les pertes de masse générale (A) et locale (B) des panneaux en mélanges de cèdre-duramen et de hêtre avec la perte de résistance au cisaillement.

Les meilleurs contreplaqués dans ce mélange ont été les modèles 7 et 9 ayant respectivement 40 % et 60 % des couches durables en extérieur.

Mélange de cyprès-duramen et de cyprès-aubier

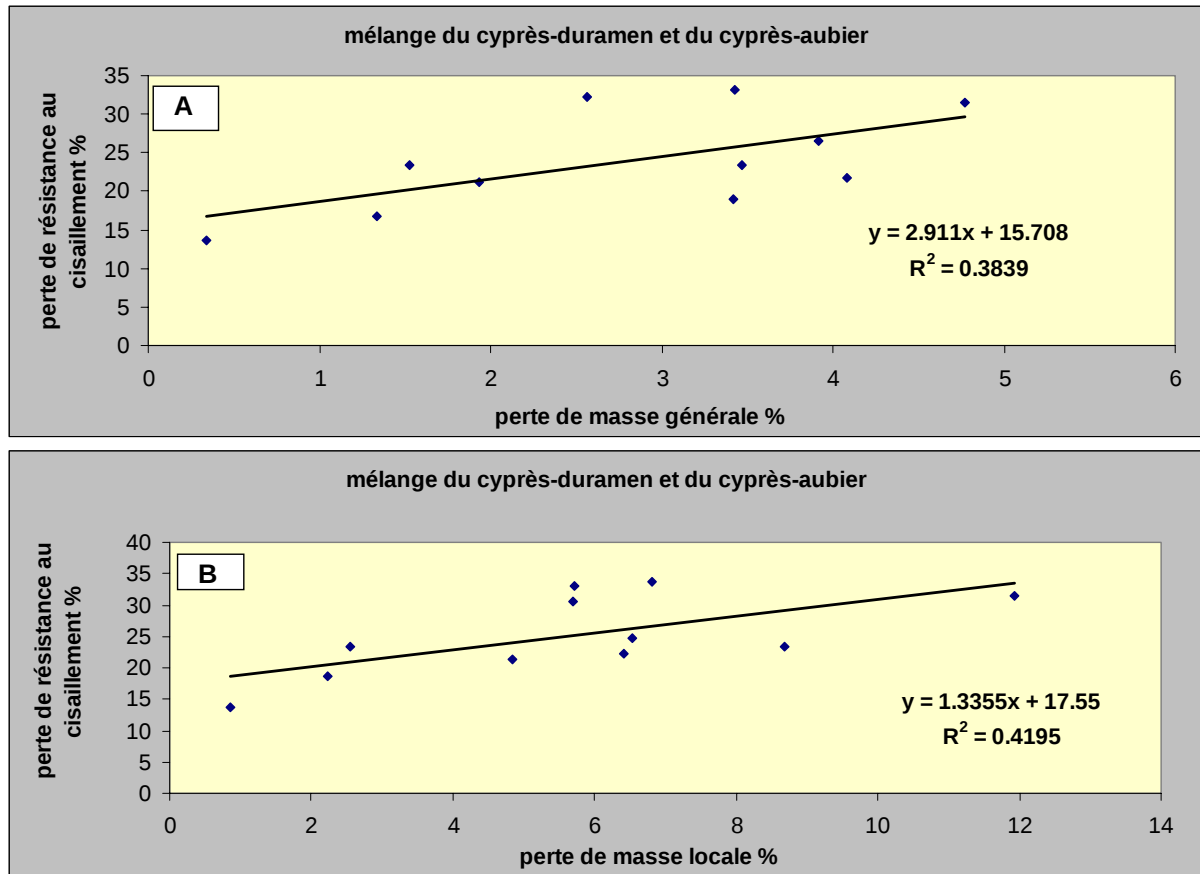


Figure 124. Les corrélations entre les pertes de masse générale (A) et locale (B) des panneaux en mélanges de cyprès-duramen et de cyprès-aulis avec la perte de résistance au cisaillement.

Les contreplaqués purs de cyprès-aulis en 5 plis et en 9 plis ont perdu respectivement 32 % et 35.5 % de la résistance au cisaillement après l'exposition au *C.versicolor*. La figure 124 présente une amélioration après l'intégration des couches durables de duramen aux couches d'aulis de cyprès. Les meilleurs contreplaqués dans ce mélange ont été les modèles 5 et 9 ayant respectivement 40 % et 60 % des couches durables en extérieur.

Mélange de cyprès-duramen et de peuplier

Pour ce mélange nous n'avons fait l'essai de cisaillement que pour les 5 plis. Les valeurs moyennes et les écarts types pour ces panneaux sont présentés dans le tableau 12 de l'annexe.

Les corrélations et la valeur explicative des droites de régression sont nettement plus faibles que pour la relation entre la perte de masse et les paramètres mesurés dans les tests d'indentation ou d'ultrasonore. En général, par ailleurs, la chute de résistance au cisaillement est forte pour la majorité des contreplaqués mélangés. Seuls les mélanges entre aulis et duramen de cèdre et de cyprès présentent une assez bonne résistance après attaque.

La relation est toujours meilleure avec la perte de masse locale, ce qui, combiné à la remarque précédente, montre que les plis non durables jouent un rôle plus important que les plis durables concernant la tenue mécanique après attaque. La résistance finale du mélange est plus proche de celle du contreplaqué pur de l'essence non durable que de celle de l'essence durable correspondantes.

3.5.3 Perte de résistance au cisaillement de tous les contreplaqués confondus, en mélange

La figure 125 (A et B) présente la relation entre les pertes de masse générale et locale, et la perte de résistance au cisaillement de tous les mélanges confondus. Le niveau de corrélation est cette fois bien meilleur, avec toujours un léger avantage à la perte de masse locale. L'examen des courbes montre aussi qu'une relation linéaire ne peut pas représenter la liaison entre les deux paramètres. Au-delà de 10 à 12% de perte de masse générale, 18 à 20% de perte de masse locale, la résistance au cisaillement a chuté de plus de la moitié.

Par comparaison aux contreplaqués purs, les mélanges augmentent toujours la résistance au cisaillement comparativement à celui des essences non durables utilisées.

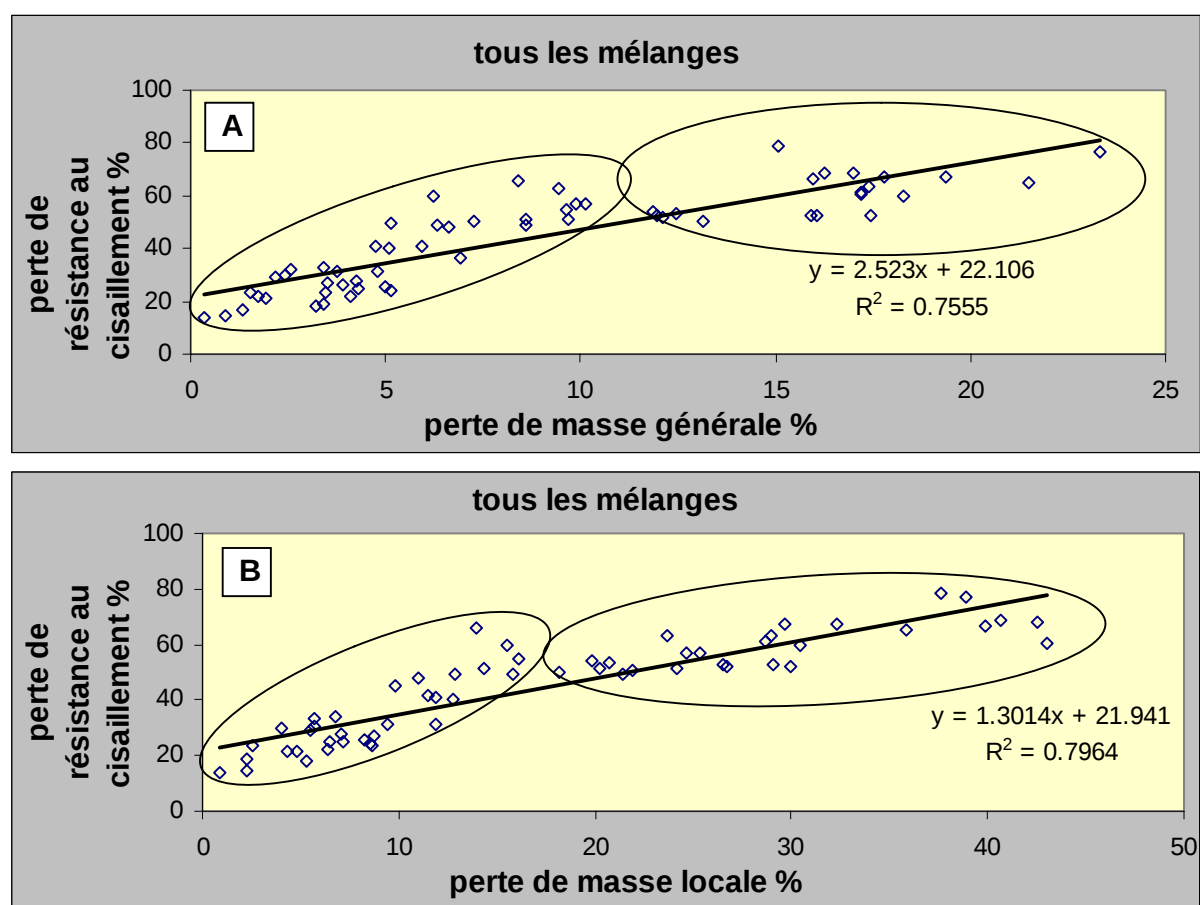


Figure 125. Les corrélations entre les pertes de masse générale (A) et locale (B) et la perte de résistance au cisaillement de tous les contreplaqués mélangés confondus.

La figure 126 regroupe tous les contreplaqués purs et mélangés. La relation entre les paramètres est très similaire pour les contreplaqués purs et les contreplaqués mélangés, surtout en utilisant la perte de masse locale. Une régression polynomiale donne un coefficient de régression plus important ; elle pourrait être utilisée comme moyen d'estimer la perte de résistance mécanique à partir de la perte de masse pour l'ensemble des essais de cette thèse.

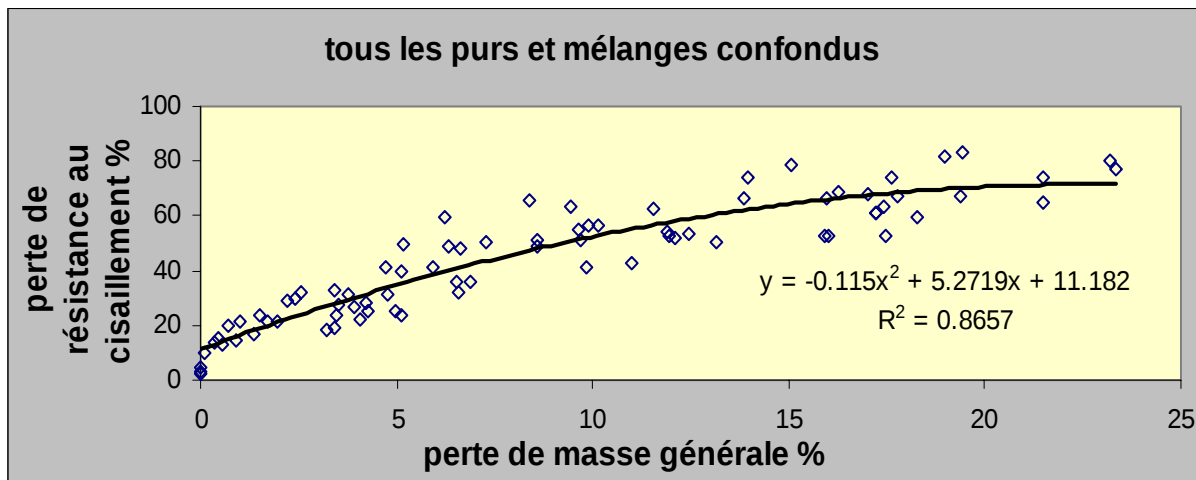


Figure 126. Les corrélations entre la perte de masse générale (A) et locale (B) et la perte de résistance au cisaillement de tous les contreplaqués purs et mélangés confondus.

En conclusion de cette partie, il faut d'abord souligner que l'essai de cisaillement est le plus pertinent pour estimer la perte d'intégrité mécanique du contreplaqué en mélange d'essences. Les ruptures se produisent toujours dans les plis non durables et il paraît préférable de considérer la perte de résistance de ces plis qui est mieux représentée par la perte de masse rapportée à ces seuls plis non durables.

Cet essai est aussi le plus sensible, avec une perte de résistance trois fois et demi plus forte que la perte de masse. Mais, la relation entre perte de masse et perte de résistance au cisaillement n'est pas linéaire (sauf peut-être pour les dégradations faibles et moyennes). Au-delà d'une perte de masse des plis non durables de 20% environ, la résistance mécanique devient faible et ne varie plus beaucoup. La courbe de régression, non linéaire trouvée dans ce cas offre un niveau d'explication aussi élevé que pour les autres critères mécaniques mais c'est un essai bien plus lourd que l'essai d'indentation (ou la mesure de perte de masse). Il doit donc être réservé à des campagnes de mise au point ou de compréhension de mécanismes.

La très bonne relation confirme que la perte de masse (locale de préférence) est un bon estimateur de la durabilité et que le seuil de 20% est assez pertinent pour délimiter les contreplaqués non résistants.

Ces essais confirment l'intérêt du mélange d'essences durables aux essences non durables pour augmenter la résistance de contreplaqués purs non durables. Néanmoins ils montrent que

la perte de masse globale donne une vision trop optimiste du gain, le mélange est un peu plus proche du contreplaqué pur non durable que du contreplaqué pur durable.

Les meilleurs résultats obtenus pour les contreplaqués ayant les plis durables en extérieur ne sont pas surprenants, ils laissent penser qu'une protection latérale des chants conduirait à des résultats bien plus intéressants, ces contreplaqués se rapprochant cette fois plus des contreplaqués purs d'essence durable. L'étude reste à faire.

Ils confirment aussi l'intérêt des contreplaqués en mélange d'aubier et de duramen de cyprès et de cèdre, résultat trouvé pour la résistance aux termites dans le cas du cyprès (le seul étudié).

3.6 Résultats de module d'élasticité des contreplaqués en mélange d'essences

En première étape, Nous avons déterminé la densité, le module d'élasticité et le module de cisaillement de tous les bois massif utilisés à la fabrication des panneaux de contreplaqué (tableau 1).

On peut remarquer des différences très sensibles de module spécifique entre essences. Les peupliers ont des valeurs remarquablement élevées de 30 000 MPa, alors que le hêtre et le châtaignier sont voisins de 20 000 MPa. Pour les deux résineux, la faible valeur de ce module spécifique dans le duramen (moins de 15 000 MPa) est certainement imputable au bois juvénile, les arbres de ces essences étant jeunes et à croissance rapide.

Bois	Densité gr/cm³	Module d'élasticité GPa	Module de cisaillement GPa
<i>peuplier blanc arbre 1</i>	0.50	15.78	0.61
<i>peuplier gris arbre 1</i>	0.49	14.67	0.58
<i>peuplier blanc arbre 2</i>	0.53	15.28	0.74
<i>peuplier gris arbre2</i>	0.49	14.40	0.67
<i>hêtre normal arbre1</i>	0.68	12.33	0.98
<i>hêtre coeur rouge arbre1</i>	0.69	13.60	0.88
<i>châtaignier duramen arbre 1</i>	0.54	12.28	0.97
<i>châtaignier duramen arbre 2</i>	0.55	13.23	0.88
<i>cyprès aubier 1</i>	0.57	10.31	1.21
<i>cyprès duramen 1</i>	0.55	7.98	1.22
<i>cyprès aubier 2</i>	0.66	10.27	1.73
<i>cyprès duramen 2</i>	0.61	9.07	1.14

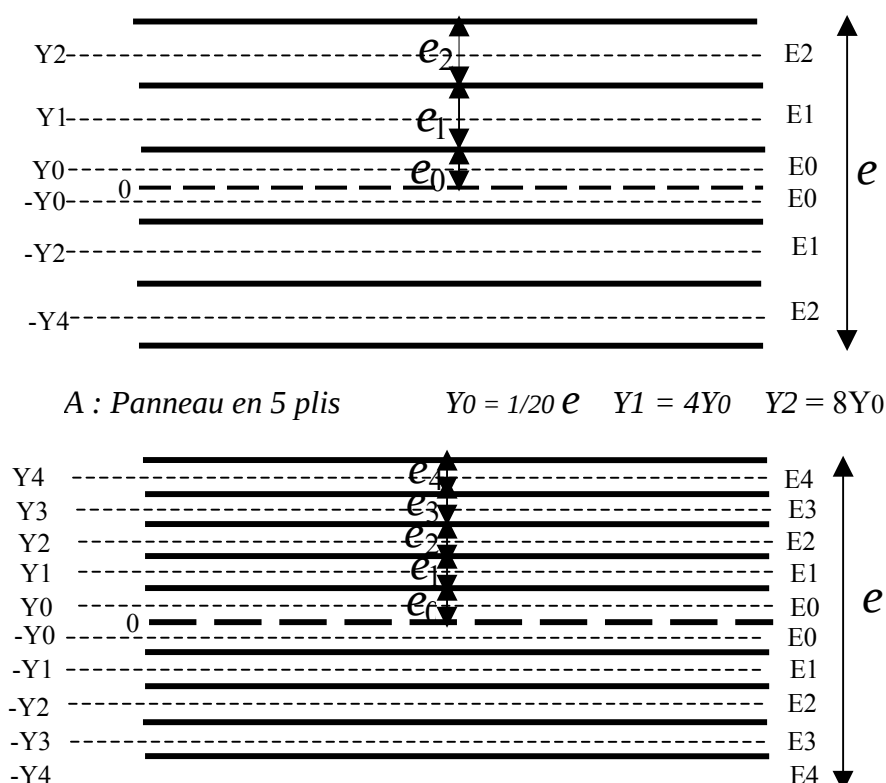
<i>cèdre aubier 1</i>	0.51	10.80	0.92
<i>cèdre duramen 1</i>	0.52	8.83	1.14
<i>cèdre aubier 2</i>	0.52	10.05	1.12
<i>cèdre duramen 2</i>	0.51	7.31	-
<i>cèdre aubier 3</i>	0.50	11.24	0.86
<i>cèdre duramen 3</i>	0.49	8.446	1.061

Tableau 37. Densité, module d'élasticité, et module de cisaillement de bois massif utilisé.
Après réalisation des différents panneaux de contreplaqué pur ou mélangés des différentes essences, nous avons également mesuré le module d'élasticité de tous les contreplaqués selon les trois directions du fil des couches extérieures du panneau :

- la direction du fil perpendiculaire à la longueur de l'éprouvette
- la direction du fil parallèle à la longueur de l'éprouvette
- la direction du fil à 45° par rapport à la longueur de l'éprouvette

Il est possible de prédire les caractéristiques élastiques d'un contreplaqué, en connaissant celles des bois massifs qui le constituent et la géométrie des plis, en utilisant notamment les outils et modèles proposés par Guitard 1987 décrits ci après grâce à l'aide de Joseph Gril.

Les caractéristiques des deux types généraux de panneaux réalisés, en 5 et 9 plis, ainsi que la méthode de calcul sont les suivantes :



B : Panneau en 9 plis $Y_0 = 1/20 e$ $Y_1 = 3Y_0$ $Y_2 = 5Y_0$ $Y_3 = 7Y_0$ $Y_4 = 9Y_0$

Figure 127. Schéma de profil d'épaisseur des contreplaqués en 5 plis (A) et en 9 plis (B)
 E = module d'élasticité, e = épaisseur du panneau, Y = distance à la ligne moyenne

1 : Calcul Multicouche

$$E \approx \frac{E_0 y_0^2 e_0 + E_1 y_1^2 e_1 + \dots + E_n y_n^2 e_n}{y_0^2 e_0 + y_1^2 e_1 + \dots + y_n^2 e_n}$$

A : Dans le cas de 5 plis :

$$e_2 = e_1 = 2e_0 = \frac{e}{5}$$

$$E \approx \frac{e_0 E_0 y_0^2 + 2e_0 E_1 y_1^2 + 2e_0 E_2 y_2^2}{e_0 y_0^2 + 2e_0 y_1^2 + 2e_0 y_2^2}$$

Et $Y_0 = 1/20 e$, $Y_1 = 4Y_0$ et $Y_2 = 8Y_0$

$$E \approx \frac{E_0 y_0^2 + E_1 (4y_0)^2 + E_2 (8y_0)^2}{y_0^2 + (4y_0)^2 + (8y_0)^2} \approx \frac{1E_0 + 16E_1 + 64E_2}{81}$$

B : Dans le cas de 9 plis

$$e_0 = e_1 = e_2 = e_3 = e_4$$

$$E \approx \frac{E_0 y_0^2 + E_1 y_1^2 + E_2 y_2^2 + E_3 y_3^2 + E_4 y_4^2}{y_0^2 + y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + y_4^2}$$

.....Résultas-prédiction de module d'élasticité de contreplaqué.....

Et $Y_0 = 1/20 \mathbf{e}$ $Y_1 = 3Y_0$ $Y_2 = 5Y_0$ $Y_3 = 7Y_0$ $Y_4 = 9Y_0$

$$E \approx \frac{E_0 y_0^2 + E_1 (3y_0)^2 + E_2 (5y_0)^2 + E_3 (7y_0)^2 + E_4 (9y_0)^2}{y_0^2 + 2y_0^2 + 3y_0^2 + 4y_0^2 + 5y_0^2}$$

$$E \approx \frac{1E_0 + 9E_1 + 25E_2 + 49E_3 + 81E_4}{165}$$

$$E \approx a_0 E_0 + \dots a_N E_N$$

Evaluation plus exacte au moyen de calculs d'intégrales est utilisée dans une macro Excel. Les coefficients a_0 à a_N sont comparés dans le tableau 2.

Calcul	Les contreplaqués en 5 plis			Les contreplaqués en 9 plis				
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
approché	1/81	16/81	64/81	1/165	9/165	25/165	49/165	81/165
exact	1/125	26/125	98/125	1/125	7/125	19/125	37/125	61/125

Tableau 38. Comparaison des coefficients a_0 à a_N appliqués dans le calcul du module d'élasticité.

2 : Le calcul du module d'élasticité

Une première approche consiste à utiliser les valeurs des modules à partir de la densité des essences en utilisant les régressions proposées par Guitard et El Amri (tableau 2).

a : Prédiction Guitard

	Feuillus	Résineux
$E_L^G =$	$14400\left(\frac{\rho}{0.65}\right)^{1.03}$	$13100 + 41700(\rho - 0.45)$
$E_T^G =$	$1030\left(\frac{\rho}{0.65}\right)^{1.74}$	$636 + 1910(\rho - 0.45)$
$G_{LT}^G =$	$971\left(\frac{\rho}{0.65}\right)^{1.26}$	$745 + 989(\rho - 0.45)$
$\frac{E_T^G}{\nu_{TL}^G}$	$31200\left(\frac{\rho}{0.65}\right)^{1.09}$	$30800 + 101000(\rho - 0.45)$

Tableau 39. Modèles prévisionnels du comportement tridimensionnel élastique de Guirard (1987).

Pour les 45° :

$$E_{TL}^G = 4 \left[\frac{1}{E_L^G} + \frac{1}{E_T^G} + \frac{1}{G_{TL}^G} - \frac{2\nu_{TL}^G}{E_T^G} \right]^{-1}$$

Une deuxième approche consiste à tenir compte des valeurs mesurées expérimentalement pour certains modules (El par exemple) pour introduire une correction sur les autres modules d'élasticité calculée sur la base des modèles prévisionnels de Guitard :

b : La correction sur les modules d'élasticités calculées à base des modèles prévisionnels du Guitard

G = Guitard, M = mesuré, C = corrigé.

$$x = \left(\frac{E_L^M}{E_L^G} \right)$$

$$x' = \left(\frac{G_{TL}^M}{G_{TL}^G} \right)$$

$$E_L^C = E_L^M = x E_L^G \quad \text{et} \quad E_T^C = E_T^G \quad \text{et}$$

$$E_{TL}^C = 4 \left[\frac{1}{x E_L^G} + \frac{1}{E_T^G} + \frac{1}{x' G_{TL}^G} - \frac{2\nu_{TL}}{\sqrt{x} E_T^G} \right]$$

La Figure128 montre une prédiction faible du module d'élasticité des contreplaqués, mesuré expérimentalement, dans le cas des modèles basés uniquement sur la densité du bois massif. Par contre en faisant intervenir le module d'élasticité du bois massif, nous avons trouvé une très bonne corrélation entre le module mesuré et le module calculé pour les éprouvettes à fil perpendiculaire sur les faces.

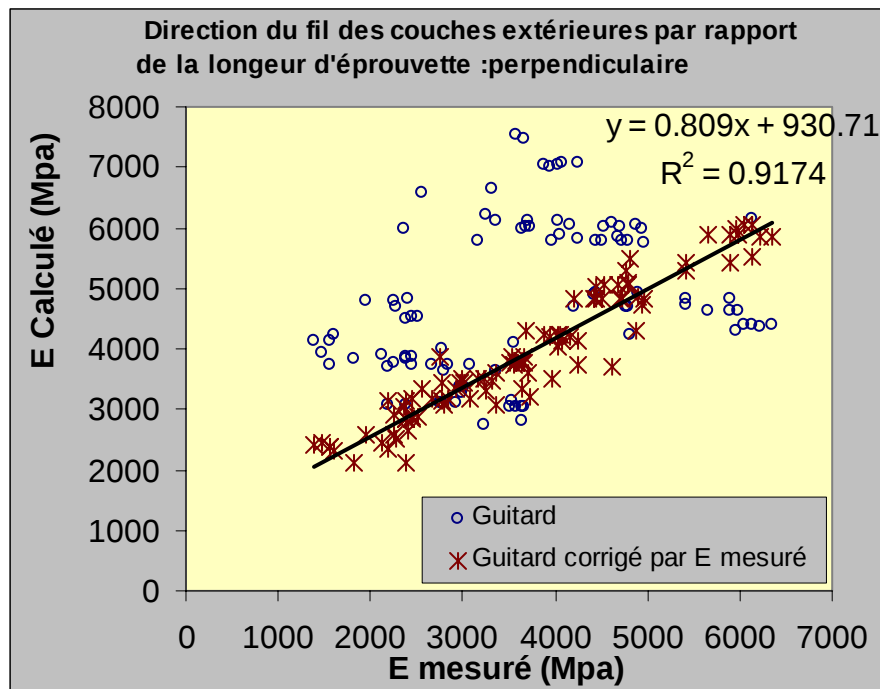


Figure 128. Relation entre module d'élasticité mesuré et module d'élasticité calculé, pour les contreplaqués selon la densité du bois massif seul (Guitard) ou en introduisant la correction par le MOE mesuré sur le bois massif (Guitard corrigé).

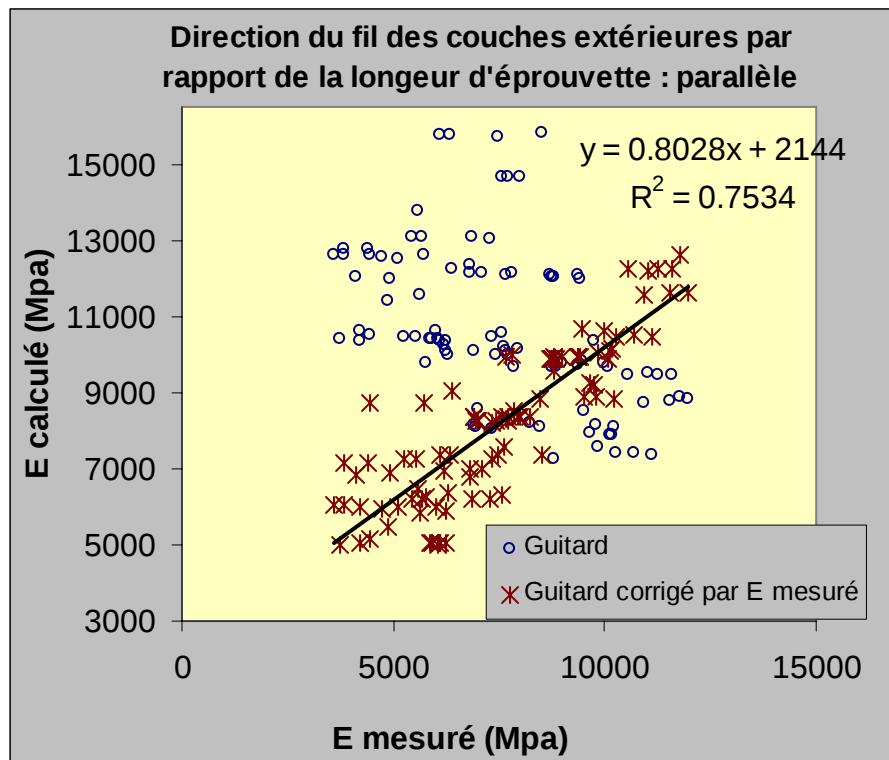


Figure 129. Relation entre module d'élasticité mesuré et module d'élasticité calculé, pour les contreplaqués selon la densité du bois massif seul (Guitard) ou en introduisant la correction par le MOE mesuré sur le bois massif (Guitard corrigé).

Cette corrélation (fig.129) est un peu moins bonne pour les éprouvettes au fil parallèle, sur les plis extérieurs. Elle est toujours mauvaise en ne tenant compte que de la densité.

Etant donné que nous n'avons pas de mesure de module d'élasticité du bois massif dans une direction orientée à 45° par rapport au fil, notre correction sur la calcul par la densité seule reste purement théorique. C'est sans doute pourquoi dans cette direction nous n'avons pas obtenu de corrélation entre modèle et expérience (fig. 130).

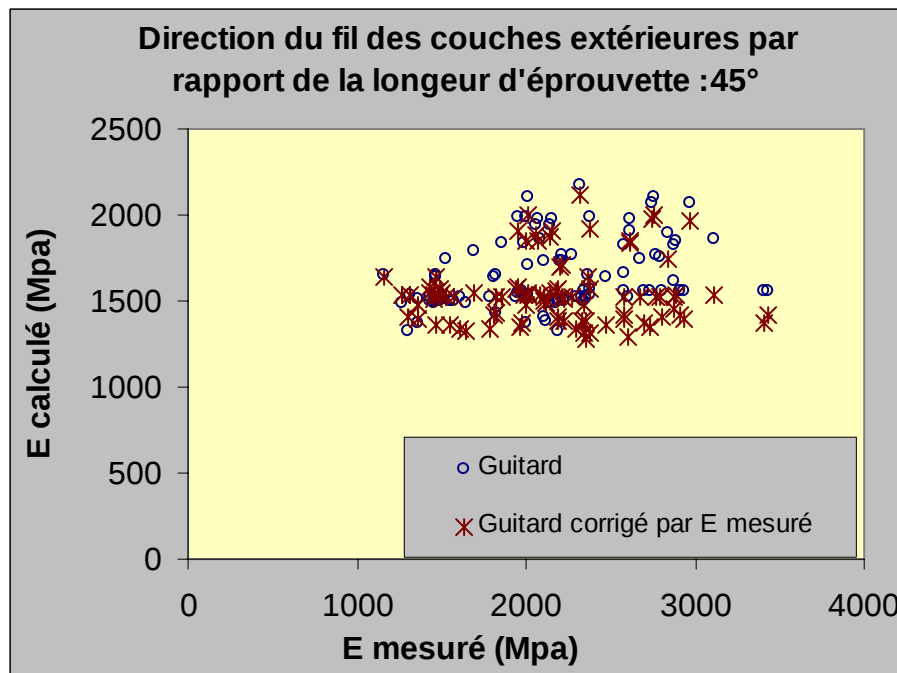


Figure 130. Relation entre module d'élasticité mesuré et module d'élasticité calculé, pour les contreplaqués selon la densité du bois massif seul (Guitard) ou en introduisant la correction par le MOE mesuré sur le bois massif (Guitard corrigé).

Les très fortes variations de module spécifique mesurés sur les essences utilisées dans ces essais explique que la densité ne soit pas un bon prédicteur. Par ailleurs beaucoup de placages étaient assez nouveaux, ce qui est évidemment un facteur de variabilité non négligeable.

Conclusion et perspectives

3.7 Conclusion et perspectives :

Objectifs et tests réalisés

L'objectif de ce travail était : i) de tester la durabilité de contreplaqués en mélange de plis durables et non durables, ii) d'examiner l'intérêt de méthodes alternatives, basées plutôt sur l'altération des propriétés mécaniques, pour estimer la résistance biologique de ces mélanges.

Afin de voir le plus possible l'influence de la durabilité naturelle des bois eux-mêmes, une colle mélanine urée formol (MUF) classique, résistante à l'action de l'humidité et supposée peu toxique pour les organismes vivants a été utilisée.

Tous les placages utilisés dans les contreplaqués provenaient de grumes dans lesquelles des échantillons de bois massif appariés (même position radiale dans les deux billons successifs d'une grume) ont été utilisés pour mesurer les propriétés de ce bois. Les essences retenues comportaient trois feuillus : le châtaignier (duramen seul supposé durable), le peuplier et le hêtre tous deux réputés non durables et deux résineux à duramen supposé durable : le cèdre et le cyprès. Dans ce cas les aubiers ont aussi été retenus comme exemple de plis supposés non durables.

Afin d'examiner un rôle éventuel des plans de colle, deux épaisseurs de placages ont été testées : 1,3mm et 2,6mm pour des contreplaqués respectivement de 5 et 9 plis de même épaisseur totale (13mm). Des contreplaqués purs ont été réalisés pour chaque type de placage. Pour les mélanges, deux proportions en volume ont été retenues : 40% et 60% et 11 compositions symétriques différentes ont été réalisées pour chaque mélange. En préalable de ce travail sur la durabilité, des mesures de module d'élasticité ont été réalisées sur les bois massifs et sur les contreplaqués, en utilisant des éprouvettes orientées dans le sens du fil pour le bois massif, les deux directions orthogonales privilégiées et la direction à 45° pour les contreplaqués.

Dans le cas du cyprès et des mélanges d'aubier et de duramen de cette essence réputée résistante aux termites, des tests de dégradation par les termites de Saintonge ont été réalisés sur bois massif et sur contreplaqués purs ou mélangés.

Tous les échantillons massifs et de contreplaqué ont été soumis à l'attaque de deux champignons de pourriture cubique ou fibreuse (*Coriolus versicolor* et *Coniophora puteana*) dans les conditions de la norme européenne en vigueur. La perte de masse mesurée en fin d'essai représente la valeur « légale » permettant de qualifier les échantillons.

Par ailleurs, un essai de cisaillement permettant de solliciter toutes les couches a été réalisé sur les échantillons après la mesure de perte de masse (après retour à l'humidité d'équilibre standard). Cela permet de tester réellement la perte de résistance mécanique du contreplaqué, qui peut se localiser dans un pli non durable.

Enfin un test d'enfoncement d'une tige cylindrique de diamètre 2,5mm dans plus de la moitié de l'épaisseur avec enregistrement de l'effort correspondant et calcul de l'énergie d'enfoncement, ainsi que la mesure de la vitesse de traversée du contreplaqué dans son épaisseur par un signal ultrasonore ont été réalisés avant l'essai de cisaillement afin de voir si ces tests simples et rapides pouvaient apporter des informations plus riches que la seule perte de masse après dégradation.

Résultats concernant la durabilité

Les tests sur bois massif ont confirmé le statut de durable pour les billons de châtaignier et les duramens de cèdre et de cyprès utilisés. A contrario le hêtre, le peuplier, l'aubier de cyprès et l'aubier de cèdre ne sont pas durables, ces derniers ayant une meilleure résistance que les premiers.

La colle MUF n'est pas neutre vis-à-vis de la durabilité. D'une part, elle joue un rôle partiellement inhibant pour les termites et *Coriolus*, ce qui se traduit par une diminution de la dégradation des contreplaqués d'autant plus marquée que le nombre de plans de colle est grand.

D'autre part elle favorise l'action de *Coniophora* de façon très spectaculaire : i) très forte augmentation relative de la perte de masse des contreplaqués purs en plis durables, ii) délamination de la plupart des contreplaqués mélangés après passage à l'étuve alors que cela ne se produit jamais avec *Coriolus*. Sous réserve d'expérimentations complémentaires, l'hypothèse la plus plausible, compte tenu de ces résultats, est la dégradation du plan de colle lui-même par *Coniophora*.

L'ensemble des essais mécaniques complémentaires n'a été réalisé que pour les contreplaqués soumis à *Coriolus*.

Pour tous les indicateurs, les contreplaqués mélangés ont une durabilité intermédiaire entre leurs composantes durable et non durable (par comparaison aux contreplaqués purs du même nombre de plis pour tenir compte du rôle de la colle).

Les indicateurs « globaux » comme la perte de masse ou l'énergie d'enfoncement de la tige d'acier donnent un résultat « plus optimiste » que l'indicateur local résistance au cisaillement du pli le plus faible. Néanmoins plusieurs types de contreplaqués, notamment des mélanges d'aubier et de duramen de cèdre ou de cyprès, présentent une bonne résistance à la pourriture attestée à la fois par la perte de masse et l'essai de cisaillement. Ceci est vrai aussi pour la résistance aux termites des mélanges d'aubier et de duramen de cyprès.

Dans tous les cas, la résistance des mélanges à 60% de plis durables est plus forte que celle des mélanges à 40% de plis durables.

La résistance est toujours nettement meilleure quand les plis extérieurs sont durables.

En moyenne, l'utilisation de plis minces (surtout pour les plis non durables) est plus favorable à l'augmentation de la durabilité.

Il n'apparaît pas de règle générale : les mélanges châtaignier – hêtre et châtaignier – peuplier se comportent comme la moyenne des comportements des contreplaqués purs correspondants (essence et nombre de plis), les mélanges aubier – duramen de cèdre et de cyprès se comportent mieux que la moyenne alors que les mélanges duramen de cèdre – hêtre ou peuplier se comportent moins bien (toujours vis-à-vis de *Coriolus*).

Résultats concernant les tests.

Les trois tests mécaniques utilisés présentent une corrélation très significative avec la perte de masse, plus forte pour les contreplaqués purs que pour les contreplaqués mélangés.

Tous contreplaqués confondus, la chute d'énergie d'enfoncement de la tige d'acier due à l'attaque de *Coriolus*, explique 85% des variations de perte de masse au travers d'une relation linéaire. Ce test rapide et peu onéreux est deux fois et demi plus sensible que la perte de masse, ce qui permettrait de diminuer la durée d'exposition pour une même précision. L'attaque par la face inférieure (au contact immédiat du champignon) ou supérieure, donne des résultats significativement différents ; il faut veiller à procéder toujours de la même façon.

La chute de résistance au cisaillement, dans les mêmes conditions, explique 86% des variations de perte de masse, dans une relation non linéaire. Dans les premiers stades de dégradation, ce test est 3,5 fois plus sensible que la perte de masse. C'est un bon test de référence, mais il est relativement long et fastidieux.

La chute de vitesse des ondes ultrasonores traversant l'épaisseur du panneau explique 64% des variations de perte de masse dans une relation linéaire. La sensibilité est la même que celle de la perte de masse. Le type de test qui a été utilisé dans ce travail ne se révèle pas intéressant dans ces conditions.

Seul le test de cisaillement permet vraiment de tester le pli fragilisé par l'attaque de champignon. Il semble que la prise en compte de la perte de masse rapportée à la masse des seuls plis non durables soit un moyen de mieux différencier les dégradations pas encore trop prononcées. Elle pourrait être préconisée pour les mélanges de ce type.

L'examen de la courbe effort/déplacement de l'essai d'enfoncement apporte des informations complémentaires intéressantes permettant dans beaucoup de cas de prédire l'existence d'une couche très dégradée sous une première couche durable, mais la localisation de cette couche n'est pas évidente a priori.

Perspectives

Une grande quantité de résultats ont été obtenus et sont disponibles sous forme numérique, ce qui permet des développements et des analyses ultérieurs qui n'ont pas été effectués dans ce travail.

C'est le cas notamment de l'essai d'enfoncement. Il serait d'abord intéressant d'examiner quelle est la meilleure distance de pénétration dans l'épaisseur du contreplaqué. Il faudrait ensuite réaliser une analyse mécanique de cet enfoncement dans un multicouche afin de voir s'il est possible de localiser les couches dégradées, et quelles informations sont nécessaires pour cela (connaissance a priori de la géométrie des plis par exemple).

Beaucoup de questions sont aussi soulevées auxquelles ce travail ne répond pas. Quelle est la nature des interactions colle – champignons (ou termites) ? *Coniophora* est-il réellement friand de la colle MUF utilisée ? Quelle est l'influence de la perte des molécules volatiles (présente dans le duramen) sur la durabilité des placages (contreplaqué) ? Que signifient les synergies positives ou négatives entre duramen et aubier des résineux testés d'une part, ces mêmes duramens et les feuillus non durables d'autre part ?

Pour compléter ce travail il serait intéressant de déterminer la durabilité des panneaux mélangés en situation (essai de champ). Les changements d'humidité et la diversité des agents de dégradation qui attaquent simultanément le panneau sont des paramètres à évaluer.

Nous n'avons pas utilisé de protection latérale des éprouvettes dans cette étude et les plis non durables étaient facilement accessibles, ce qui n'est souvent pas le cas, en usage, pour de grands panneaux. Il serait intéressant de déterminer le niveau de perte de masse et de chute de résistance au cisaillement en protégeant les 4 côtés du panneau ayant des plis durables en extérieur et des plis non durables en intérieur et déterminer l'épaisseur ou le nombre de plis durables nécessaires pour une protection efficace.

Il faudrait aussi étudier la durabilité naturelle du panneau mélangé en aubier et duramen de cèdre vis-à-vis des termites, et ainsi que celle du mélange de duramen de cyprès et de peuplier pour comparer ces résultats avec ceux du mélange de duramen et d'aubier de cyprès.

Une étude spécifique de l'influence du type de colle devrait être menée, en préalable à d'autres études en utilisant les alternatives de contreplaqués 5 et 9 plis en essences non durables (hêtre et ou peuplier) et durables (châtaignier et cèdre par exemple), sur un plus grand nombre de champignons, ou dans des tests de type « essais de sol » en laboratoire.

Concernant les types de tests il paraîtrait intéressant d'examiner la possibilité d'utiliser l'essai d'enfoncement pour des tests accélérés (1 à 2 mois de mise en contact par exemple) afin de trouver la période la plus courte permettant d'avoir une bonne corrélation avec la perte de masse à 4 mois de la norme.

Globalement, au contraire des estimations de propriétés mécaniques de contreplaqués en mélange, on ne voit pas du tout apparaître une modélisation possible de la résistance biologique de ces multicouches en partant des comportements des bois massifs correspondants. Les couplages complexes entre essences, colles et agents de biodégradation restent mystérieux, faute de modèles explicatifs de l'action de ces organismes.

Une des applications pratiques immédiates de ce travail, serait le développement de produits composites multicouches (contreplaqués, LVL) de bonnes propriétés mécaniques et de bonne durabilité en situation de risque termite et champignons, à partir de la ressource existante en cèdre et en cyprès, sans être obligé d'éliminer l'aubier, important en volume dans ces cas. Il suffirait de gérer correctement en amont et aval de la dérouleuse, l'épaisseur et le tri des plis par nature, ce qui est tout à fait faisable industriellement (après choix de la bonne colle).

Références Bibliographiques

Aloui, F.; Ayadi, N.; Charrier, F.; Charrier, B. (2004). "*Durability of European oak (Quercus petraea and Quercus robur) against white rot fungi (Coriolus versicolor): relations with phenol extractives.*" Holz Roh Werkst 62: 286-290.

Bailleres, H.; Calchera, G.; Demay, M.; Vernay, M. (1998). "*Comparison of three non-destructive techniques for mechanical grading of guianese structural timber.*" Bois et forêts des tropiques 257(3): 47-62.

Bauer, C. (1987). "*Etude des relations entre l'humidité du bois et l'attaque fongique.*" Deuxième Coll; Sci. Ind; du bois. Nancy: 22-24.

Bauer, C.; Kilbertus, G. (1991). "*Technique Ultrasonore de Caractérisation du Degré d'Altération des Bois de Hêtre et Pin Soumis à l'Attaque de Différents Champignons.*" *Holzforschung* 45: 41-46.

Beall, F. C.; Wilcox, W. W. (1987). "*Relationship of acoustic emission during radial compression to mass loss from decay*". *Forest. prod. J.* 37(4): 38-42.

Beall, F. C. (2002). "*Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties.*" *Wood Sci. Technol* 36: 197-212.

Becker, G. (1972). "*Protection of wood particle board against termites.*" *Wood Sci. Technol.* 6, 239-248.

Behr, E. A. (1972). "*Decay and termite resistance of medium-density fibreboards made from wood residue.*" *For. Prod. J.* 22(12), 48-51.

Bernabei, M. (1998). "*Facultative heartwood in beech trees (Fagus sylvatica L.).*" *Annali-Accademia italiana di Scienze forestali* 47: 105-131.

Biernacki, J. M.; Beall, F. C. (1993). "*Developement of an acousto - ultrasonic scanning system for nondestructive evaluation of wood and wood laminates.*" *Wood and fiber Science* 25(3): 289-297.

Blanchette, R.A. and Barnes, T.A. 1988. "*Selection of white-rot fungi for biopulping.*" *Biomass.* 15: 93-101.

Brunetti, M.; De capua, E. L.; Macchioni, N.; Monachello, S. (2001). "*Natural durability, physical and mechanical properties of Atlas cedar (Cedrus atlantica Manetti) wood from southern Italy.*" *Ann. For. Sci.* 58: 607-613

Bucur, V. (1984). "*Relationships between grain angle of wood specimens and ultrasonic velocity.*" *Catgut Acoustical Society newsletter* 41(1/5): 30-35.

Bucur, V.; Chivers, R. C. (1991). "*Acoustic properties and anisotropy of some Australian wood species.*" *Stuttgart : Acustica* 75: 69-74.

Bucur, V.; Feeney, F. (1992). "*Attenuation of Ultrasound in Solid Wood.*" *Ultrasonics* 30(2): 76-81.

Cave, I. D.; Lower, H. (1969). "*The longitudinal Young's modulus of pinus Radiata.*" *Wood science and technology* 3: 40-48.

Constant, T.; Badia, M. A.; Mothe, F. (2003). "*Dimensional stability of Douglas fir and mixed beech-poplar plywood: experimental measurements and simulations.*" *Wood Sci. Technol* 37: 11-28.

De Groot, R. C.; Ross, R. J.; Nelson, W. J.(1998). "*Non-Destructive Assessment of Wood Decay and Termite Attack in Southern Pine Sapwood.*" *Wood Protection* 2: 25-34.

Dirol, D.; Deglise, X. (2001). *"Durabilité des bois et problèmes associés."* Hermes Science Europe Ltd.(ISBN 2-7462-0139-9).

Dirol, D.; Ravilly, F. (1979). Les différentes formes d'altération de la paroi cellulaire par quelques champignons lignivores. *Ann. Biol.* XVII (11-12) : 477-492.

Eaton, R.A.; Hale, M.D.C. (1993). *Wood: Decay, Pests and Protection.* Chapman and Hall, London. 546p.

Efransjah, F.; Kilbertus, G.; Bucur, V. (1989). *"Impact of wood storage on mechanical properties of spruce as detected by ultrasonics."* *Wood Sci. Technol* 23: 35-42.

Efransjah, M. (1988). *"Contribution à l'Etude de la Préservation du Bois : Amélioration de l'Imprégnabilité de l'Epicea(picea sp) par un Pré-Traitement Bactérien et Caractérisation du Comportement du Bois par l'utilisation des Ultrasons."* Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, Ecole Supérieure des Sciences et des Techniques des Industries du Bois, U. E. R. Science de la Matière. 166p.

EN 113- NFX 41: 552. (1980). *"Détermination du seuil d'efficacité contre les champignons Basidiomycètes lignivores cultivés sur milieu gélosé."*

EN 350-1 (1994). *Durability of wood and wood-based materials, Natural durability of solid wood, Part 1: Guide to the principles of testing and classification of the natural durability of wood.*

Evans, P.D.; J. W. Creffield, J.S.G. Conroy and S.C. Barry. 1997. *Natural durability and physical properties of particleboard composed of white cypress pine and radiata pine.* *For. Prod. J.* 47(6), 87-94.

Evans, P.D.; Dimitriadis, S.; Cunningham, R.B.; Donnelly, C.F. (2000). *Medium density fibreboard manufactured from blends of white cypress pine and non-durable wood species.* *Holzforschung.* 54(6): 585-590.

Faraji, F.; Thévenon, M.F.; Thibaut, B. (2004). *Evaluation of the natural durability and ultrasonic method for decay detection of some European hardwood and softwood species.* IRG/WP 04-10537

Faraji, F.; Thévenon, M.F.; Grill, J.; Thibaut, B. (2004). *Evaluation de la durabilité naturelle des contreplaqués en mélange d'essences durables et non-durables et méthodes ultra-sonores pour détecter l'attaque fongique.* Colloque Sciences et Industries du Bois, Epinal, France.

Gambetta, A. (1995). *Assessing durability of L.V.L. compared with chestnut solid wood.* In EC Forest Project. Innovation in the chestnut timber processing. Final technical Report 107p.

Green, D. W.; McDonald, K. A. (1993). *"Investigation of the Mechanical Properties of Red OAK 2 by 4'S."* *Wood and fiber Science* 25(1): 35-45.

Groah, W. J.; Gramp, G. D.; Rudzinski, R. J. (1992). The Effect of surface Ply Thickness on Formaldehyde Emissions from a Diffuse porous Hardwood " *Forest products Journal* 42(7/8): 54-56.

- Harju, A.; Venalainen, M.; Anttonen, S.; Viitanen, H.; Kainulainen, P.; Saranpää, P. (2003). "*Chemical factors affecting the brown-rot decay resistance of Scots pine heartwood.*" *Trees: Structure and Function* 17(3): 263-268.
- Hiramatsu, Y.; Miyazaki, Y. (2004). "*Effective period of volatiles from softwood veneers embedded in tatami mats on the activity of house dust mites.*" *Wood Sci. Technol* 50: 217-222.
- Kabir, M. F. (2001). "*Prediction of ultrasonic properties from grain angle.*" *Journal of the Institute of Wood Science* 15(5): 235 – 246.
- Kamdern, D.P.; Sean, S.T. (1994). *The durability of phenolic bonded particleboard made of decay resistant black locust and nondurable aspen.* *Forest Product Journal*. Vol 44. N° 2. P 56-68.
- Kang, H.; Booker, R. E. (2002). "*Variation of stress wave velocity with MC and temperature*" *Wood Sci. Technol* 36: 41-54.
- Karsulovic, J. T.; Leon, L. A.; Gaete, L. (2000). "*Ultrasonic defect detection of knots and annual ring orientation in Pinus radiata lumber.*" *Wood and Fiber Science* 32(3): 278 - 286.
- Kucera, L. J.; Pöhler, E. (1998). "*Beech wood and coloured-heartwood formation.*" *Schweizerische Zeitschrift für Forestwesen* 149(12): 931-942.
- Leban, J. M.; Haines, D. W. (1999). "*The Modulus of Elasticity of Hybrid larch Predicted by Density, Rings per centimeter, and Age.*" *Wood and Fiber Science* 31(4): 394-402
- Levi, M.P. (1965). *The Fungal Degradation of Wood.* *Journal of the Institute of Wood Science*. 12:56-66.
- Ludders, P. (2004). "*Chestnut (Castanea sativa Mill.) botany, cultivation, and use of a traditional sort.*" *Erwerbsobstbau* 46(1): 7-12.
- Machek, L.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. (1998). "*A Dynamic Approach to Assess the Modulus of Elasticity in Wood Decay Testing.*" *IRG/ WP 98-20139*: 1-8.
- Machek, L.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. (2001). "*The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil - bed tests.*" *Wood Sci. Technol* 34(6): 467 - 472.
- Machek, L.; Edlund, R.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. (2004). "*A non-destructive approach for assessing decay in preservative treated wood.*" *Wood Sci. Technol* 37: 411-417.
- Mishiro, A. (1996). *Ultrasonic velocity and average moisture content below the fiber saturation point.* *Mokuzai Gakkaishi*. (42), 6, p 612-617.
- Mishiro, A. (1996) *Effect of density on ultrasonic velocity in wood.* *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.42, n° 9, p 887-894
- Mishiro, A. (1996) b. *Effects of grain and ring angles on ultrasonic velocity in wood.* *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.42, n° 2, p 211-215.

Monlar, S. (1997). Performance of preservative-treated wood exposed out of ground contact. Thèse, Spécialité : Biologie, Imperial College of Science, technology and Medecine, London, UK.

Nicholas, D. D.; Schultz, T. P. (1986). *Detection of incipient brown-rot decay in wood by Fourier Transform Infrared Spectrometry*. Doc; IRG/ WP/ 2275.

Niemz, P.; Kucera, L. J.; Scheffler, M. (1999). *Possibility of defects detection in wood with ultrasound*. Holz Roh Werkstoff. (57), 2, p96-102.

Nilsson, T. (1985). *Defining decay types: a proposal for discussion*. The international Research Group on Wood Preservation. Document N° IRG/WP/1264, 7 p.

Obuekwe, C.O.; Ejechi, B.O. (1998). *The decay of two tropical timbers by Plerotus sp. and Gloeophyllum sepiarium as monitored by microscopy and ultrasonic wave propagation*. Material und Organismen, Vol.32, n° 2, p 153-158.

Otjen, L.; Blanchette, R.; Effland, M.; Leathan, G. (1987). *Assessment of 30 White Rot Basidiomycetes for Selective Lignin Degradation*. Holzforchung, 41(6):343-349.

Ohkoshi, M.; Kato, A.; Suzuki, K.; Hayashi, N.; Ishihara, M. (1999). *Characterization of acetylated wood decayed by brown-rot and white-rot fungi*. Wood Sci. Technol. (46), p69-75.

Okino, E. Y. A.; Souza, M. R.; Santana, M. A. E.; Alves, M. V. S.; Sousa, M. E.; Teixeira, D. E. (2004). *Evaluation of the physical and biological properties of particleboard and flakeboard made from Cupressus*. International Biodeterioration and Biodegradation. (53), 1, p1-5.

Okuma, M. (1976). *Plywood Properties Influenced by the Glue Line*. Wood Sci. Technol. (10), p57-68.

Paes, J.B.; Limba, C. R. De.; Morais, V. De. M. (2003). Natural resistance op Piptadenia macrocarpa, Amburana cearensis and Aspiosperma pyrifolium woods to wood-destroying fungi and termites under labotaytory conditions. Brasil-Florestal. 21(75): 45-52.

Park, H. M.; Fushitani, M.; Sato, K.; Kuba, T.; Byeon, H. S. (2003). *Static bending strength performances of cross-laminated woods made with five species*. Wood Sci. Technol. (49), p411-417.

Patton-Mallory, M.; DE GROOT, R.C. (1989). *Acousto-Ultrasonic for evaluating decayed wood products*. Proceedings of the 2nd Pacific Timber Engineering Conference, 28-31/08, Auckland, New Zealand, 7 p.

Rayner, A.; Boddy, L. (1988). *Fungal decomposition of wood*. Its biology and ecology. John Wiley & Sons, 587 p.

Richards, D. B. (1954). *Physical changes in decaying wood*. Forestry. (52), p260-265.

- Ross, R. J.; Degroot, R. C.; Nelson, W. J.; Lebow, P. K. (1996). *Stress Wave NDE of Biologically Degraded Wood*. International Wood Engineering Conference. (3), p213-217.
- Ross, R. J.; Brashaw, B. K.; Pellerin, R. F. (1998). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Forest products Journal. (84), 1, p14-19.
- Sangsilk, J. (2000). *Effects of moisture content and slope of grain on ultrasonic transmission Speed of wood*. Journal of the Korean wood science and technology. (28), 2, p10-18.
- Shulka, K. S.; Joshi, H. C. (1992). Studies on the preservation of plywood: glue line treatment With arsenic trioxide. Journal of Indian Academy of Wood Science. 23(2) : 15-23.
- Schultz, T. P.; Nicholas, D. D. (2000). *Naturally durable heartwood: evidence for a proposed dual defensive function of the extractives*. Phytochemistry. (54), p47-52.
- Sun YuGuo, A. T. (1998). *Structural mechanics of wood composite materials I : ultrasonic evaluation of internal bond strength during an accelerated aging test*. Journal of wood science. (44), 5, p348-353.
- Sun YuGuo, A. T. (1999). *Structural mechanics of wood composite materials II : ultrasonic propagation mechanism and internal bonding of particleboard*. Journal of wood science. (45), 3, p221-226.
- Szabo, T. (1978). *Use of Ultrasonics to Evaluate or Characterize Wood Composites*. 4th, Nondestructive Testing of Wood Symposium. 239-260.
- Tanaka, C.; Nakao, T.; Takahashi, A. (1987). *Acoustic property of wood. I. Impact sound analysis of wood*. Mokuzai Gakkaishi. (33), 10, p811-817
- Uva, P.; Clément, J.L.; Austin, J.W.; Aubert, J.; Zaffagnini, V.; Quintana, A.; Bagnères, A.G. (2003). *Origin of a new reticulitermes termite (Isoptera, Rhinotermitida) inferres from mitochondrial and nuclear DNA data*. Molecular Phylogenetics and Evolution 30(2004)344-353.
- Van Acker, J. (2000). *Assessment of the biological performance of wood and wood-based panel products in relation to end-use*. PhD Thesis, University of Ghent, 332 p.
- Vieau, F. (1993). *Le Termite de saintonge Reticulitermes santonensis feytaud : termite urbain*. Bull. Soc. Zool. Fr, n° 1118(2), p.125-133.
- Vun, R. Y.; Wu, Q.; Manlezun, C. J. (2004). *Through - thickness ultrasonic characterisation of wood and agricultural fiber composites*. Forest products journal. (54), 12, p233-239.
- Vun, R. Y.; Wu, Q.; Bhardwaj, M. C.; Stead, G. (2003). *Ultrasonic characterization of structural properties of oriented strandboard: a comparison of direct-contact and non-contact methods*. Wood and fiber Science. (35), 3, p381-396.
- Wang, S. C.; Huffman, J. B.; Schmidt, R. A. (1977). *Evaluation of chlorosulfonyl pyridine for protecting wood from soft-rot fungi using a tensile strength test*. Wood Sci. Technol. (8), 4, p241-248

Wang, J.; Biernacki, J. M.; Lam, F. (2001). *Non destructive evaluation of veneer quality using acoustic wave measurements*. Wood Sci. Technol. (34), 6, p505-516

Wilcox, W.W. (1978). *Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength*. Wood and fibers. N° 9(4) p252-257. Ann. For. Sci. 60 p. 83-89.

Wilcox, W. W. (1988). *Detection of the early stages of wood decay with ultrasonic pulse velocity*. Forest. prod. J. (38), 5, p68-73

Wytwer, T. (1996). *Influence of wood species and sapwood and heartwood on the results of impregnation*. Sylwan. (140), N°10, p 27-34.

Yazaki, Y. (1983). Volatility of extractives components in White Cypress Pine (*Callitris Columellaris* F. Muell). Holzforschung 37/231-235.

Zanuttini, R.; Nicolotti, G.; Cremonini, C. (2003). *Poplar plywood resistance to wood decay agent: efficacy of some protective treatments in the light of the standard ENV 12038*. Ann.For.Sci. 60 83-89

Zombori, B. (2001). *In situ non destructive testing of built in wooden members*. Journal of non-destructive testing, Vol 6, n°3, 14 p.

Annexes

Annexe A : Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs calculées pour les contreplaqués en mélanges d'essences durables et non durables.

Les pertes de masse causées par C.versicolor

peuplier 40% châtaignier 60%

peuplier 60% châtaignier 40%

hêtre

40% châtaignier 60%

hêtre

60% châtaignier 40%

peuplier 60% cèdre 40%

peuplier 40% cèdre 60%

Prédiction de CP selon bois massif

7.41

10.98

9.77

14.52

11.01

16.32

Prédiction de CP selon CP pur-5plis

5.67

8.41

9.52

14.18

7.92

11.89

mesuré modèle 1

8.67

12.34

11.03

mesuré modèle 2

9.73

16.14

12.68

mesuré modèle 3

9.08
8.03
mesuré modèle 4
6.28

9.61

11.77

Prédiction de CP selon CP pur-9plis

5.31

8.72

8.13

11.69

6.91

10.14

mesuré modèle 5

5.78

12.9

10.91

mesuré modèle 6

8.66

17.23

12.64

mesuré modèle 7

6.76

13.3

8.98

mesuré modèle 8

	7.63
	16.82
	10.24
	mesuré modèle 9
	4.36
	8.17
	6.81
	mesuré modèle 10
	6.04
	10.56
	8.63
	mesuré modèle 11
5.26	
	10.13
	9.08

Tableau I. Les pertes de masse mesurées et calculées selon la perte de masse du bois massif ou la perte de masse des contreplaqués purs en 5 et en 9 plis causée par *C. versicolor*.

Les pertes de masse causées par C.versicolor

hêtre 40% cèdre 60%
 hêtre 60% cèdre 40%
 cèdre-aubier 60% cèdre-duramen 40%
 cèdre-aubier 40% cèdre-duramen 60%
 cyprès-aubier 40% cyprès-duramen 60%
 cyprès-aubier 60%
 cyprès-duramen 40%

Prédiction de CP selon bois massif

10.57
 15.67
 7.20
 10.54
 6.01
 8.34

Prédiction de CP selon CP pur-5plis

9.40
 14.09
 4.42
 6.64
 2.69
 4.04

mesuré modèle1

19.65
 4.31
 3.14

mesuré modèle2

21.56
 4.29
 4.38

mesuré modèle3

15.97

1.95

2.45

17.16

mesuré modèle4

2.68

4.42

Prédiction de CP selon CP pur-9plis

7.81

11.48

4.32

6.24

2.61

3.92

mesuré modèle5

16.89

4.13

1.65

mesuré modèle6

17.69

5.45

4.10

mesuré modèle7

16.56

4.09

1.03

mesuré modèle8

19.01

4.21

3.50
mesuré modèle9
12.98
0.98
0.51
mesuré modèle10
14.89
2.79
3.29
mesuré modèle11
14.59
2.13
0.99

Tableau II. Les pertes de masse mesurées et calculées selon la perte de masse du bois massif ou la perte de masse des contreplaqués purs en 5 et en 9 plis causée par *C. versicolor*.

Les pertes de masse causées par C. puteana

peuplier 40% châtaignier 60%
 peuplier 60% châtaignier 40%
 hêtre 40% châtaignier 60%
 hêtre 60% châtaignier 40%
 peuplier 60% cèdre 40%
 peuplier 40% cèdre 60%

Prédiction de CP selon bois massif

11.90
 17.58
 15.92
 23.6
 15.42
 22.94

Prédiction de CP selon CP pur-5plis

14.58
 21.11
 16.53
 24.03
 14.80
 21.26

mesuré modèle1

27.14
 28.68
 33.78

mesuré modèle2

29.36

27.7
 36.18

mesuré modèle3

17.78
 17.47
 19.85

mesuré modèle4

	21.41
	22.75
	30.65
16.11	Prédiction de CP selon CP pur-9plis
	22.9
	16.40
	23.33
	17.53
	23.84
	mesuré modèle5
	25.42
	25.15
	34.08
	mesuré modèle6
	28.40
	31.42
	39.88
	mesuré modèle7
	23.78
	27.45
	31.02
	mesuré modèle8
	25.26
	30.38

30.1

mesuré modèle9

17.5

18.9

20.24

mesuré modèle10

19.3

24.6

26.01

mesuré modèle11

18.12

23.82

21.68

Tableau III. Les pertes de masse mesurées, calculées selon la perte de masse de bois massif et la perte de masse des contreplaqués purs en 5 et en 9 plis causé par *C. puteana*.

Les pertes de masse causées par *C. puteana*
hêtre 40% cèdre-duramen 60%
hêtre 60% cèdre-duramen 40%

cèdre-aubier 60% cèdre-duramen 40%
cèdre-aubier 40% cèdre-duramen 60%
cypès-aubier 40% cypès-duramen 60%
cypès-aubier 60% cypès-duramen-40%

Prédiction de CP selon bois massif

15.82
 23.54
 13.52
 20.09
 9.98
 14.19

Prédiction de CP selon CP pur-5plis

16.75
 24.18
 16.15
 23.28
 18.82
 24.98

mesuré modèle1

32.78
 25.74
 17.57

mesuré modèle2

35.95
 29.38
 21.37

mesuré modèle3

23.62
 17.58
 9.47

mesuré modèle4

28.84

22.51

17.15

Prédiction de CP selon CP pur-9plis

17.82

24.27

18.98

26.03

16.33

20.91

mesuré modèle5

29.3

24.44

19.21

mesuré modèle6

37.99

27.68

21.38

mesuré modèle7

31.29

25.13

21.85

mesuré modèle8

31.38

23.58

24.39

28.59

mesuré modèle9

22.07

16.37

mesuré modèle10

31.38

26.03

17.47

mesuré modèle11

28.19

23.70

13.36

Tableau IV. Les pertes de masse mesurées et calculées selon la perte de masse du bois massif ou la perte de masse des contreplaqués purs en 5 et en 9 plis causée par *C. puteana*.

Annexe B : Pertes de masse des contreplaqués purs et mélange d'essences durables et non durables.

**Type de
Contreplaqué
Mélange du :
Peuplier
châtaignier**

Coriolus versicolor

Coniophora puteana

Perte de masse %

Perte de masse %

Moyenne

Médiane

Ecart type

Médiane

Moyenne

Ecart type

Peuplier pur 5 plis

14.05

13.87

1.22

34.25

34.18

1.64

Peuplier pur 9 plis

12.04

11.77

0.68

36.31

36.47

2.80

mélange 1

8.47

8.67

0.56

27.77

27.14

3.27

mélange 2

9.50

0.59

9.73

29.45

29.36

0.72

mélange 3

5.09

5.30

0.58

17.34

17.78

2.21

mélange 4

6.42

6.39

0.24

21.25

21.41

2.59

mélange 5

5.89

5.78

0.74

25.05

25.42

1.98

mélange 6

8.57

8.66

0.43

27.36

28.40

1.95

mélange 7

6.70

6.76

0.51

23.56

23.78

1.52

mélange 8

7.23
7.63
1.38

24.98

25.26
1.51

mélange 9

4.55

4.36
0.91

17.85

17.50
1.73

mélange 10

6.11

6.04
0.55

19.56

19.30
1.54

mélange 11

5.00

5.26
0.64

18.20

18.12
0.95

Châtaignier duramen pur 5 plis

1.02

0.21
1.56

1.61

	1.51
	0.44
Châtaignier duramen pur 9 plis	
	1.02
	1.00
	0.58
	2.40
	2.54
	1.04

Tableau 1. Les pertes de masse et les classements des contreplaqués purs et mélangés de peuplier et de duramen de châtaignier.

Type de Contreplaqué Mélange du : <i>Hêtre</i> <i>Châtaignier</i>
<i>Coriolus versicolor</i>
<i>Coniophora puteana</i>
<i>Perte de masse %</i> <i>Perte de masse %</i>
Moyenne
Médiane
Ecart type
Médiane
Moyenne

	Ecart type
Hêtre pur 5 plis	23.80 23.49 1.94 39.07 39.05 1.91
Hêtre pur 9 plis	18.50 18.82 1.26 37.00 37.19 2.55
mélange 1	13.48 12.34 2.62 27.41 25.74 2.82
mélange 2	16.15 16.14 0.53
	216

27.55
27.70
1.71

mélange 3

8.93

9.08
1.22

16.17

17.47
3.14

mélange 4

10.51

10.59
0.49

22.43

22.75
1.32

mélange 5

12.73

12.90
1.28

24.90
25.15
4.13

mélange 6

17.44

17.23
2.44

31.83
31.42
1.93

mélange 7

14.16

13.30
2.71

27.50
27.45
0.65

mélange 8

16.58

16.82
1.83

30.14
30.38
1.16

mélange 9

8.90

8.17
2.37

18.93
18.90
0.74

mélange 10

10.52

10.56
1.31

24.36
24.60
1.01

mélange 11

	10.07
	10.13
	0.91
23.77	
23.82	
1.06	
Châtaignier duramen pur 5 plis	
	1.024
	0.21
	1.56
1.61	
1.51	
0.44	
Châtaignier duramen pur 9 plis	
	1.022
	1.00
	0.58
2.40	
2.54	
1.04	

Tableau 2. Les pertes de masse et les classements des contreplaqués purs et mélangés de duramen de châtaignier et de hêtre.

Type de Contreplaqué Mélange du : <i>Cèdre-duramen</i>
<i>Cèdre-aubier</i>
<i>Coriolus versicolor</i>
<i>Coniophora puteana</i>
<i>Perte de masse %</i>
<i>Perte de masse %</i>

Moyenne
Médiane
Ecart type
Médiane
Moyenne
Ecart type

Cèdre aubier pur 5 plis

11.77
11.06
2.44
37.85
37.55
0.87

Cèdre aubier pur 9 plis

10.39
1.05
10.09
40.98
40.11
2.16

mélange 1

4.45
4.31
2.01
24.02
25.74
7.58

mélange 2

4.05
4.29

.
0.77
29.10
29.38
1.51

mélange 3

2.07
1.95
1.22
17.67
17.58
3.11

mélange 4

3.14
3.04
0.67
23.40
22.51
2.06

mélange 5

4.11
4.13
0.86
25.64
24.44
2.62

mélange 6

5.46
5.45
0.36
28.53
27.68
2.67

mélange 7

4.34
4.09
1.41
25.97
25.13
3.04

mélange 8

4.57
4.21
1.39
23.58
23.58
2.12

mélange 9

1.04
0.98
0.33
22.33
22.07
2.14

mélange 10

2.92
2.79
0.49
29.35
29.67
2.09

mélange 11

2.15
2.13
0.95
22.99
23.70
4.89

Cèdre duramen pur 5 plis

0.08
0.04
0.10
1.91
1.88
1.73

Cèdre duramen pur 9 plis

0.47
0.47
0.20

4.61
4.90
3.98

Tableau 3. Les pertes de masse et les classements des contreplaqués purs et mélangés de Cèdre-duramen et de cèdre-aubier.

<i>Cèdre-duramen</i> <i>hêtre</i>	Type de Contreplaqué Mélange du :
	<i>Coriolus versicolor</i>
	<i>Coniophora puteana</i>
	<i>Perte de masse %</i> <i>Perte de masse %</i>
	Moyenne
	Médiane
	Ecart type
	Médiane
	Moyenne
	Ecart type

Hêtre pur 5 plis

23.80
23.49

.
1.94
39.07
39.05
1.91

Hêtre pur 9 plis

18.50
18.82
1.26
37.00
37.19
2.55

mélange 1

19.37
19.65
5.04
32.54
32.78
0.92

mélange 2

21.31
21.56
1.97
35.72
35.95
1.96

mélange 3

16.64
15.97
2.17
23.18
23.62
0.92

mélange 4

17.26
17.16
1.08
28.97
28.84

1.60

mélange 5

16.30

16.89

2.18

29.08

29.30

2.27

mélange 6

17.91

17.69

0.90

39.29

37.99

2.86

mélange 7

16.91

16.56

1.38

31.73

31.29

1.07

mélange 8

18.53

19.01

1.51

31.56

31.38

3.60

mélange 9

11.43

12.98

6.19

28.17

28.59

2.74

mélange 10

14.91

14.89
2.06
31.741
31.375
2.022

mélange 11

13.60
14.59
2.48
29.41
28.19
1.87

Cèdre duramen pur 5 plis

0.08
0.10
0.04
1.91
1.88
1.73

Cèdre duramen pur 9 plis

0.47
0.20
0.47
4.61
4.90
3.98

Tableau 4. Les pertes de masse et les classements des contreplaqués purs et mélangés de Cèdre-duramen et de hêtre.

**Type de
Contreplaqué
Mélange du :
Cèdre-duramen
peuplier**

Coriolus versicolor

Coniophora puteana

<i>Perte de masse %</i>
<i>Perte de masse %</i>
Moyenne
Médiane
Ecart type
Médiane
Moyenne
Ecart type

peuplier pur 5 plis

14.05
13.87
1.22
34.25
1.64
34.18

peuplier pur 9 plis

12.04
11.77
0.68
36.31
36.47
2.80

mélange 1

10.49
11.03
1.64
32.84
33.78
2.53

mélange 2

12.94
12.68
1.15
34.32
36.18
4.00

mélange 3

8.13
8.03
0.93
19.48
19.85
2.25

mélange 4

11.41
11.77
1.49
30.62
30.65
1.60

mélange 5

10.47
10.91
1.56
33.63
34.08
1.58

mélange 6

11.54
12.24
1.33
39.88
39.88
1.16

mélange 7

9.19
8.98

.
1.55
31.41
31.02
1.07

mélange 8

10.33
10.24
1.74
30.56
30.10
2.38

mélange 9

7.37
6.81
1.42
20.01
20.24
1.46

mélange 10

8.70
9.46
2.93
26.02
26.01
1.95

mélange 11

9.04
9.08
1.70
21.34
21.68
1.92

Cèdre duramen pur 5 plis

0.08
0.04
0.10
1.91
1.88
1.73

Cèdre duramen pur 9 plis

0.47

0.20

0.47

4.61

4.90

3.98

Tableau 5. Les pertes de masse et les classements des contreplaqués purs et mélangés de Cèdre-duramen et de peuplier.

<i>Cyprès-duramen</i>	Type de Contreplaqué Mélange du :
	<i>Cyprès-aubier</i>
<i>Coriolus versicolor</i>	
<i>Coniophora puteana</i>	
<i>Perte de masse %</i>	
<i>Perte de masse %</i>	
Moyenne	
Médiane	
Ecart type	
Médiane	
Moyenne	
Ecart type	

Cyprés aubier pur 5 plis

7.00

6.73

1.27

36.30

37.31

3.77

Cyprés aubier pur 9 plis

6.67

6.53

0.43

30.27

30.05

1.20

mélange 1

3.84

3.14

1.84

17.32

17.57

1.24

mélange 2

4.35

4.38

0.77

20.92

21.37

1.16

mélange 3

2.45

2.45

0.45

11.45

9.47

5.96

mélange 4

3.92

4.42

.
1.51
18.34
17.15
2.85

mélange 5

2.32
1.65
2.59
19.86
19.21
2.91

mélange 6

3.89
4.10
0.68
23.11
21.38
1.64

mélange 7

1.90
1.03
1.82
21.62
21.85
2.91

mélange 8

3.90
3.50
1.64
24.83
24.39
1.59

mélange 9

0.62
0.51
0.64
15.95
16.37
2.74

mélange 10

3.10
3.29
0.91
19.88
17.47
9.68

mélange 11

1.31
1.07
0.99
11.16
13.36
5.05

Cyprès duramen pur 5 plis

0.45
0.10
0.71
6.55
6.50
1.35

Cyprès duramen pur 9 plis

0.00
0.00
0.00
7.56
7.19
3.97

Tableau 6. Les pertes de masse et les classements des contreplaqués purs et mélangés de cyprès-duramen et de cyprès-aubier

*Annexe C : Information sur la colle Mélamine-Urée-Formol.
CASCOMIN MUF 1242
DURCISSEUR D 2542*

La résine CASCOMIN MUF 1242 est une résine Mélamine-Urée-Formol.
En combinaison avec le durcisseur liquide D 2542 elle est employée pour la fabrication de charpentes en bois lamellé- collé résistant aux intempéries. D'autres domaines d'application sont, par exemple, l'aboutage, le collage de structures dans l'industrie du bâtiment, le panneautage Le joint de colle est incolore.

En combinaison avec le durcisseur D 2542, la CASCOMIN MUF 1242 ? répond sous forme de mélange collant aux exigences des normes EN 301 (pour les colles de type I et II et les classes de service 1, 2 et 3), EN 391, DIN 68141. Elle est approuvée :

- par le CTBA (France) rapport d'essais n° ST/MK/FS/76/97. 360,
- par le NTI (Norvège)
- par le FMFA (Allemagne).
- par le SKH/KOMO- Hollande (DHBC- certificat NR. 32389).

**CARACTERISTIQUES
TECHNIQUES**

Spécifications	Résine MUF 1242	Durcisseur D 2542 (acide Formique)
Aspect	Liquide	Liquide
Couleur	Blanc	Gris clair
Viscosité (fabrication)	11.000 mPas environ Viscosimètre Brookfield LVT, aig. 4, 12 tr/mn, 25°C	14.000 mPa.s environ
Extrait sec	68% environ	
Densité	1250 kg/m ³ environ	1300 kg/m ³ environ
PH	10 environ	1 environ
Formol libre	0,5% environ	
Point éclair	Au-dessus de 100°C	Au-dessus de 100°C

COMPOSITION/ INFORMATION SUR LES COMPOSANTS

SUBSTANCE	CAS n°	CONCENTRATION	CLASSIFICATION
Ethylène glycol	107-21-1	1< C< 5%	Xn ; R-22
Formol libre	50-00-00	0.1< C < 0,5%	T ; R 23/24/25-34-40-43
Résine Mélamine	9003-06-1	10< C< 30%	
Résine Urée Formol	9011-05-6	10< C< 30%	

PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES

Colle :

- | | |
|-------------------------|--|
| - Etat physique : | liquide visqueux à odeur caractéristique |
| - Point éclair : | > 100°C |
| - Masse volumique : | env. 1,25 g/cm ³ |
| - pH : | environ 10 |
| - Solubilité dans l'eau | soluble |
| - | |

Durcisseur :

- | | |
|---|-----------------------------------|
| - Etat physique : | liquide visqueux à base viscosité |
| - Point éclair : | > 100°C |
| - Masse volumique : | env. 1,3 g/cm ³ |
| - pH : | environ 1 |
| - Solubilité dans l'eau | soluble |
| - substance : acide formique, résorcine, eau. | |

INFORMATIONS ECOLOGIQUES

Le produit contient une faible quantité de formol libre pouvant causer des irritations ou des allergies chez certaines personnes.

Ne pas ingérer- ne pas inhaler.

Protéger la peau et les yeux des éclaboussures.

STABILITE ET REACTIVITE

La préparation est stable aux conditions de manipulation et de stockage recommandées sous la rubrique 7.

Exposée à des températures élevées, la préparation peut dégager des produits de décomposition dangereux (oxyde d'azote)

Tenir à l'écart d'agents oxydants et de matières fortement acides ou basiques afin d'éviter des réactions exothermiques.

INFORMATIONS ECOLOGIQUES

Aucune donnée sur la préparation elle-même n'est disponible.

Tout écoulement dans les égouts ou les cours d'eau doit être évité.

Annexe D : Les valeurs de la résistance au cisaillement avant et après l'exposition au C. versicolor des contreplaqués purs et mélangés.

Les contreplaqués purs	Nombre de plis	Résistance au cisaillement non exposé (moyenne en Newton)	Ecart type	Résistance au cisaillement exposé (moyenne en Newton)	Ecart type
peuplier blanc	5	6952	361	2354	456
peuplier gris	5	6856	64	1760	220
hêtre normal	5	10633	153	2149	308
hêtre cœur rouge	5	13181	1796	3412	531
châtaignier-duramen	5	5974	212	4798	654
cèdre-aubier	5	7359	647	4196	335
cèdre-duramen	5	6153	132	5543	333
cyprès-aubier	5	5883	104	4003	69
cyprès-1 duramen	5	4001	525	3876	250
cyprès-2 duramen	5	7567	509	6433	664
peuplier blanc	9	7489	449	2820	214
peuplier gris	9	7441	480	1924	578
hêtre normal	9	11057	1118	2037	560
hêtre cœur rouge	9	14631	683	2503	710
châtaignier-duramen	9	5076	233	4001	522
cèdre-aubier	9	7477	301	4383	1197
cèdre-duramen	9	9853	149	8575	505
cyprès-aubier	9	7257	291	4680	1209
cyprès-1 duramen	9	8445	245	8245	733
cyprès-2 duramen	9	8018	224	7674	381

Tableau 7. Les valeurs moyennes et les écarts type de tous les contreplaqués purs réalisés.

Mélange du châtaignier et du peuplier	Nombre de plis	Résistance au cisaillement non exposé (moyenne en Newton)	Ecart type	Résistance au cisaillement exposé (moyenne en Newton)	Ecart type
Modèle 1	5	6226	1006	3634	743
Modèle 2	5	6516	467	2937	265
Modèle 3	5	6116	744	3673	308
Modèle 4	5	6622	1047	3378	235
Modèle 5	9	6698	498	3488	274
Modèle 6	9	5456	2292	1860	219
Modèle 7	9	6116	205	3552.9	494
Modèle 8	9	7778		4291	
Modèle 9	9	7198	231	4239	874
Modèle 10	9	6130	80	2458	927
Modèle 11	9	5530	397	2789	

Tableau 8. Les valeurs moyennes et les écarts type pour les contreplaqués de mélange de châtaignier et de peuplier avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du châtaignier et du hêtre	Nombre de plis	Résistance au cisaillement non exposé (moyenne en Newton)	Ecart type	Résistance au cisaillement exposé (moyenne en Newton)
Modèle 1	5	6489	67	3211
Modèle 2	5	5098	1010	2423
Modèle 3	5	6306	723	3065
Modèle 4	5	7181	2096	3113
Modèle 5	9	7279	1970	3794
Modèle 6	9	6281	1087	2137
Modèle 7	9	7491	610	3570
Modèle 8	9	8549	2142	3298
Modèle 9	9	8778	1905	4465
Modèle 10	9	6619	298	2450
Modèle 11	9	7745	256	3039

Tableau 9. Les valeurs moyennes et les écarts type pour les contreplaqués de mélange de châtaignier et de hêtre avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du cèdre- duramen et du cèdre- aubier	Nombre de plis	Résistance au cisaillement non exposé (moyenne en Newton)	Ecart type	Résistance au cisaillement exposé (moyenne en Newton)	Ecart type
Modèle 1	5	6935	2157	5171	54
Modèle 2	5	7776	2751	5828	408
Modèle 3	5	6818	446	4843	961
Modèle 4	5	6005	123	4137	875
Modèle 5	9	5897	2229	4812	1344
Modèle 6	9	6458	477	4908	279
Modèle 7	9	6564	670	4723	868
Modèle 8	9	7499	2623	5262	325
Modèle 9	9	7787	743	6649	2070
Modèle 10	9	6100	170	4443	639
Modèle 11	9	7094	522	5563	930

Tableau 10. Les valeurs moyennes et les écarts type pour les contreplaqués de mélange de cèdre aubier et de cèdre duramen avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du cèdre-duramen et du hêtre	Nombre de plis	Résistance au cisaillement non exposé (moyenne en Newton)	Ecart type	Résistance au cisaillement exposé (moyenne en Newton)
Modèle 1	5	6648	510	2325
Modèle 2	5	6391	400	1470
Modèle 3	5	7557	2272	2523
Modèle 4	5	7344	387	2293
Modèle 5	9	6336	603	2311
Modèle 6	9	7562	2733	2481
Modèle 7	9	7999	2045	3641
Modèle 8	9	7096	1183	2859
Modèle 9	9	6853	1465	3261
Modèle 10	9	6248	1519	1980
Modèle 11	9	6779		1457

Tableau 11. Les valeurs moyennes et les écarts type pour les contreplaqués de mélange de hêtre et de cèdre duramen avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du cypres-	Nombre de plis	Résistance au cisaillement	Ecart type	Résistance au cisaillement	Ecart type
-------------------------------	---------------------------	---------------------------------------	-------------------	---------------------------------------	-------------------

duramen et du cyprès-aubier		non exposé (moyenne en Newton)		exposé (moyenne en Newton)	
Modèle 1	5	6627	1488	4990	1738
Modèle 2	5	5491	127	3640	1617
Modèle 3	5	6290	829	4891	1725
Modèle 4	5	5894	647	4040	601
Modèle 5	9	7177	617	5837	289
Modèle 6	9	7216		5018	724
Modèle 7	9	8030	784	6151	871
Modèle 8	9	7351	785	4915	445
Modèle 9	9	7768		6708	1245
Modèle 10	9	6804	232	5207	1196
Modèle 11	9	7747	1860	6171	358

Tableau 12. Les valeurs moyennes et les écarts type pour les contreplaqués de mélange de cyprès duramen et de cyprès aubier avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

mélange du cèdre-duramen et du peuplier	Nombre de plis	Résistance au cisaillement non exposé (moyenne en Newton)	Ecart type	Résistance au cisaillement exposé (moyenne en Newton)	Ecart type
modèle 1	5	5332	465.087447	2457	433
modèle 2	5	5300	1137.887698	2568	315
modèle 3	5	5617	866.3394254	2798	936
modèle 4	5	5261	799.8932866	2274	40

Tableau 13. Les valeurs moyennes et les écarts type pour les contreplaqués de mélange de cèdre duramen et de peuplier avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Annexe E : Les valeurs de la vitesse des ondes ultrasonores avant et après l'exposition au *C. versicolor* des contreplaqués purs et mélangés.

les	Nombre	la vitesse	Ecart	la vitesse	la vitesse	Ecart	la vitesse m/s
------------	---------------	-------------------	--------------	-------------------	-------------------	--------------	-----------------------

contreplaqués purs	de plis	m/s avant exposition (moyen)	type	m/s avant exposition (médian)	m/s après exposition (moyen)	type	après exposition (médian)
peuplier blanc	5	1806.6	23.3	1815.1	1380.2	88.2	1392.4
peuplier gris	5	1806.4	29.3	1813.1	1213.3	61.0	1222.0
hêtre normale	5	2105.0	13.1	2106.4	1716.3	35.3	1721.4
hêtre cœur rouge	5	2087.2	16.0	2092.7	1648.9	35.3	1756.6
cèdre aubier	5	2208.9	27.8	2203.8	2038.9	56.8	2040.6
cyprès aubier	5	2047.0	4.3	2045.6	1753.3	55.1	1754.4
peuplier blanc	9	1818.1	17.6	1816.8	1434.8	41.8	1435.1
peuplier gris	9	1764.3	36.4	1768.7	1320.6	59.4	1333.6
hêtre normal	9	2100.0	25.5	2098.5	1746.9	40.4	1758.8
hêtre cœur rouge	9	2109.2	14.7	2109.9	1776.5	40.7	1785.5
cèdre aubier	9	2184.1	48.0	2173.7	2030.8	92.0	2031.3
cyprès aubier	9	2090.6	35.9	2084.2	1825.7	31.1	1827.6
châtaignier duramen	5	1961.2	13.4	1965.7	1974.7	64.1	1990.7
cèdre duramen	5	2583.8	55.7	2596.1	2592.6	51.2	2589.8
cyprès duramen	5	2259.8	30.3	2252.1	2245.2	43.0	2254.6
châtaignier duramen	9	1943.5	29.4	1948.8	1950.5	40.3	1960.5
cèdre duramen	9	2440.7	38.7	2441.7	2453.8	28.9	2448.1
cyprès duramen	9	2065.7	47.0	2080.8	2045.0	51.6	2033.3

14. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de tous les contreplaqués purs réalisés.

Mélange du peuplier et du	Nombre de plis	la vitesse m/s avant exposition	Ecart type	la vitesse m/s avant exposition	la vitesse m/s après exposition	Ecart type	la vitesse m/s après exposition
--	---------------------------	--	-----------------------	--	--	-----------------------	--

châtaignier		(moyen)		(médian)	(moyen)		(médian)
modèle 1	5	1968.1	28.7	1967.8	1717.9	74.0	1728.5
modèle 2	5	2049.6	39.0	2045.7	1778.3	46.3	1786.8
modèle 3	5	2006.7	13.4	2007.6	1851.8	51.5	1849.1
modèle 4	5	2083.4	20.3	2089.8	1901.9	35.7	1909.2
modèle 5	9	1862.6	18.6	1868.2	1719.2	29.8	1722.0
modèle 6	9	1877.4	21.9	1878.5	1572.6	66.2	1566.5
modèle 7	9	1891.3	22.3	1891.0	1611.8	87.7	1593.8
modèle 8	9	1852.5	29.6	1851.7	1576.4	43.7	1582.6
modèle 9	9	1857.4	18.4	1857.1	1679.4	60.9	1688.8
modèle 10	9	1907.2	18.7	1904.5	1687.0	55.7	1697.7
modèle 11	9	1922.4	30.4	1921.1	1712.9	62.2	1697.1

Tableau 15. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de la vitesse des ondes ultrasonores pour les contreplaqués de mélange de châtaignier et de peuplier avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du hêtre et du châtaignier	Nombre de plis	la vitesse m/s avant exposition (moyen)	Ecart type	la vitesse m/s avant exposition (médian)	la vitesse m/s après exposition (moyen)	Ecart type	la vitesse m/s après exposition (médian)
modèle 1	5	2031.3	36.7	2048.5	1840.3	43.9	1844.7
modèle 2	5	2018.0	30.3	2020.7	1825.1	71.0	1850.6
modèle 3	5	2072.8	65.7	2042.4	1934.1	91.7	1962.3
modèle 4	5	2066.1	40.6	2064.8	1980.1	51.1	1998.3
modèle 5	9	2054.9	18.5	2057.1	1818.9	40.7	1813.5
modèle 6	9	2060.9	19.3	2062.8	1747.8	58.6	1774.1
modèle 7	9	2068.7	18.1	2065.6	1822.6	50.4	1837.4
modèle 8	9	2076.8	54.8	2068.0	1835.6	56.1	1835.4
modèle 9	9	2160.6	13.6	2160.0	1852.7	39.7	1853.4
modèle 10	9	2138.3	37.4	2137.1	1973.5	42.0	1981.4
modèle 11	9	1996.7	19.6	1996.0	1740.3	55.0	1729.0

Tableau 16. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de la vitesse des ondes ultrasonores pour les contreplaqués de mélange de châtaignier et de hêtre avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du cèdre aubier et	Nombre de plis	la vitesse m/s avant exposition	Ecart type	la vitesse m/s avant exposition	la vitesse m/s après exposition	Ecart type	la vitesse m/s après exposition
-----------------------------------	-----------------------	--	-------------------	--	--	-------------------	--

du cèdre duramen		(moyen)		(médian)	(moyen)		(médian)
modèle 1	5	2385	62	2363	2221.9	50.1	2229.5
modèle 2	5	2421.2	40.3	2427.6	2291.2	96.1	2282.4
modèle 3	5	2405.8	50.7	2395.2	2316.2	72.1	2317.6
modèle 4	5	2420.5	49.5	2420.4	2335.8	76.9	2333.1
modèle 5	9	2234.5	44.3	2236.5	2108.9	81.2	2115.4
modèle 6	9	2250.6	29.6	2257.2	2058.9	56.1	2048.3
modèle 7	9	2221.3	61.1	2195.8	2108.2	77.3	2118.6
modèle 8	9	2280.0	35.7	2291.5	2083.3	60.7	2089.1
modèle 9	9	2216.8	48.7	2218.1	2135.6	58.8	2142.5
modèle 10	9	2219.6	57.6	2236.2	2144.6	45.5	2131.9
modèle 11	9	2244.3	34.6	2245.4	2077.8	71.0	2067.4

Tableau 17. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de la vitesse des ondes ultrasonores pour les contreplaqués de mélange de cèdre aubier et de cèdre duramen avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du hêtre et du cèdre duramen	Nombre de plis	la vitesse m/s avant exposition (moyen)	Ecart type	la vitesse m/s avant exposition (médian)	la vitesse m/s après exposition (moyen)	Ecart type	la vitesse m/s après exposition (médian)
modèle 1	5	2276.6	31.4	2281.1	1924.1	72.7	1902.4
modèle 2	5	2324.2	27.9	2331.3	1943.9	55.2	1949.2
modèle 3	5	2283.8	31.3	2284.8	2052.2	49.1	2053.7
modèle 4	5	2370.1	39.9	2353.4	2046.3	53.3	2043.2
modèle 5	9	2250.7	25.5	2247.7	1822.6	69.0	1815.1
modèle 6	9	2270.2	28.0	2282.3	1905.8	62.5	1919.4
modèle 7	9	2233.5	38.9	2225.9	1874.3	58.8	1880.7
modèle 8	9	2247.2	40.7	2241.3	1908.9	55.8	1902.3
modèle 9	9	2240.4	43.1	2225.5	1971.3	94.2	1999.3
modèle 10	9	2276.6	30.8	2270.7	2025.2	58.2	2041.8
modèle 11	9	2296.7	50.1	2309.3	1936.9	50.3	1939.9

Tableau 18. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de la vitesse des ondes ultrasonores pour les contreplaqués de mélange de hêtre et de cèdre duramen avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du peuplier et du cèdre	Nombre de plis	la vitesse m/s avant exposition	Ecart type	la vitesse m/s avant exposition	la vitesse m/s après exposition	Ecart type	la vitesse m/s après exposition
---------------------------------------	-------------------	---------------------------------------	---------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---------------	---------------------------------------

duramen		(moyen)		(médian)	(moyen)		(médian)
modèle 1	5	2109.2	23.7	2107.6	1806.3	98.4	1791.9
modèle 2	5	2129.2	17.6	2130.0	1753.1	81.8	1768.3
modèle 3	5	2249.3	33.1	2253.2	1910.6	72.4	1893.3
modèle 4	5	2245.8	70.4	2258.1	1943.2	55.9	1943.8
modèle 5	9	2131.5	24.7	2128.3	1769.0	87.6	1795.7
modèle 6	9	2137.2	37.8	2128.1	1798.9	71.5	1802.7
modèle 7	9	2110.6	30.8	2103.3	1840.7	85.4	1859.7
modèle 8	9	2211.1	47.4	2210.3	1758.7	72.5	1776.8
modèle 9	9	2326.1	40.2	2324.7	2113.7	80.6	2104.9
modèle 10	9	2219.0	40.1	2213.6	1966.3	154.4	1995.4
modèle 11	9	2213.1	42.6	2215.9	1843.5	59.7	1843.2

Tableau 19. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de la vitesse des ondes ultrasonores pour les contreplaqués de mélange de peuplier et de cèdre duramen avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du cyprès aubier et du cyprès duramen	Nombre de plis	la vitesse m/s avant exposition (moyen)	Ecart type	la vitesse m/s avant exposition (médian)	la vitesse m/s après exposition (moyen)	Ecart type	la vitesse m/s après exposition (médian)
modèle 1	5	2102.0	51.2	2100.2	1991.3	61.5	2001.1
modèle 2	5	2219.1	110.7	2207.3	2019.8	79.8	2008.0
modèle 3	5	2234.1	50.1	2233.9	2052.2	69.2	2053.6
modèle 4	5	2201.9	41.7	2198.6	2044.4	34.2	2044.2
modèle 5	9	2114.9	37.4	2104.7	1988.8	52.9	1999.4
modèle 6	9	2087.4	29.3	2091.4	1958.6	52.6	1948.9
modèle 7	9	2102.1	32.0	2097.5	2009.6	45.6	2017.6
modèle 8	9	2173.2	51.5	2182.0	1987.6	71.5	1996.6
modèle 9	9	2159.4	41.1	2165.4	2068.9	53.00	2064.3
modèle 10	9	2090	387	2151	2035.2	49.96	2030.9
modèle 11	9	2149	31	2149	1903.1	51.8	1895.5

Tableau 20. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de la vitesse des ondes ultrasonores pour les contreplaqués de mélange de peuplier et de cèdre duramen avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Annexe F : Les valeurs de l'énergie d'indentation avant et après l'exposition au *C. versicolor* des contreplaqués purs et mélanges.

les contreplaqués purs	Nombre de plis	l'énergie (N.mm) avant exposition (médian)	l'énergie (N.mm) avant exposition (moyen)	Ecart type	l'énergie (N.mm) après exposition (médian)	l'énergie (N.mm) après exposition (moyen)	Ecart type
peuplier	5	4158.2	4144.6	397.8	2272.0	2251.4	235.2
hêtre	5	5560.3	5479.4	363.8	2540.3	2490.9	434.8
cèdre aubier	5	4315.6	4396.5	509.3	3469.3	3480.6	346.1
châtaignier	5	3651.8	3643.2	211.7	3630.2	3610.9	206.1
cèdre duramen	5	5227.7	5185.8	299.5	5014.4	5134.9	500.9
cypres aubier	5	4699.5	4694.9	178.7	3853.8	3876.9	316.2
cypresduramen	5	5456.2	5473.6	342.5	5408.0	5393.6	437.1
peuplier	9	4487.1	4396.4	328.3	2929.9	2983.3	459.5
hêtre	9	6073.8	6024.1	334.1	3465.8	3461.6	189.8
cèdre aubier	9	4324.7	4376.7	425.6	4617.8	4435.5	500.9
châtaignier	9	3608.7	3628.7	428.4	3689.3	3950.7	520.3
cèdre duramen	9	5180.3	5167.6	293.1	5048.1	4993.3	299.7
cypres aubier	9	4851.6	4927.0	303.3	4317.3	4317.3	367.1
cypresduramen	9	5709.8	5520.4	459.6	5882.8	5647.6	528.0

Tableau 21. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de l'énergie d'indentation pour les contreplaqués purs avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du peuplier et du châtaignier	Nombre de plis	l'énergie (N.mm) avant exposition (médian)	l'énergie (N.mm) avant exposition (moyen)	Ecart type	l'énergie (N.mm) après exposition (médian)	l'énergie (N.mm) après exposition (moyen)	Ecart type
modèle 1	5	4000.6	4028.0	203.2	3044.3	3093.7	201.2
modèle 2	5	4368.7	4377.58	322.9	3044.8	2940.5	285.6
modèle 3	5	3836.2	3820.5	219.2	3086.2	3001.3	283.0
modèle 4	5	4065.0	4045.1	346.6	3301.3	3368.0	422.4
modèle 5	9	4357.1	4290.6	331.9	3159.1	3193.3	229.6
modèle 6	9	4490.7	4410.1	447.4	3347.2	3353.1	235.5
modèle 7	9	4446.0	4401.0	345.1	3232.8	3414.7	461.1
modèle 8	9	4117.4	4050.6	329.1	3096.4	3155.0	283.6
modèle 9	9	4309.6	4266.6	307.9	3299.1	3375.2	462.9
modèle 10	9	4286.5	4345.6	323.9	3143.4	3047.8	225.7
modèle 11	9	4101.5	3973.3	360.4	3154.1	3182.7	259.1

Tableau 22. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de l'énergie d'indentation pour les contreplaqués en mélange de peuplier et de châtaignier avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du hêtre et du châtaignier	Nombre de plis	l'énergie (N.mm) avant exposition (médian)	l'énergie (N.mm) avant exposition (moyen)	Ecart type	l'énergie (N.mm) après exposition (médian)	l'énergie (N.mm) après exposition (moyen)	Ecart type
modèle 1	5	4913.2	4949.4	162.6	3178.4	3303.8	277.0
modèle 2	5	4631.7	4655.0	290.9	3057.6	2913.2	330.7
modèle 3	5	4443.2	4533.8	374.3	3343.7	3294.5	233.7
modèle 4	5	4317.2	4385.4	321.7	3623.5	3561.7	316.3
modèle 5	9	5655.0	5683.6	361.0	3891.9	3769.3	381.8
modèle 6	9	5095.5	5084.6	163.1	2937.8	2894.5	235.6
modèle 7	9	5599.6	5402.1	435.3	3446.2	3457.7	347.9
modèle 8	9	5698.5	5747.3	182.0	3671.5	3548.3	475.2
modèle 9	9	5581.6	5436.8	480.8	4544.4	4464.5	492.3
modèle 10	9	4440.1	4439.4	135.4	3692.0	3819.8	621.4
modèle 11	9	5259.6	5257.6	81.3	3886.8	3821.1	441.1

Tableau 23. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de l'énergie d'indentation pour les contreplaqués en mélange de hêtre et de châtaignier avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du cèdre aubier et du cèdre duramen	Nombre de plis	l'énergie (N.mm) avant exposition (médian)	l'énergie (N.mm) avant exposition (moyen)	Ecart type	l'énergie (N.mm) après exposition (médian)	l'énergie (N.mm) après exposition (moyen)	Ecart type
modèle 1	5	4608.7	4574.8	429.8	3878.1	3901.4	610.2
modèle 2	5	4603.9	4527.3	525.6	4164.1	4182.0	456.3
modèle 3	5	4063.1	4097.0	389.8	4121.7	4365.3	544.2
modèle 4	5	4199.8	4304.1	526.7	4367.0	4324.8	673.1
modèle 5	9	4731.1	4591.5	550.9	5032.9	5011.8	493.5
modèle 6	9	5414.1	5362.7	536.7	4304.0	4524.8	643.9
modèle 7	9	4711.7	5075.0	514.0	4824.6	4463.5	928.9
modèle 8	9	4235.6	4674.6	482.2	4579.0	4765.7	730.1
modèle 9	9	3710.5	3632.9	435.7	4013.6	4040.8	473.8
modèle 10	9	3951.2	4249.6	851.0	3818.7	3903.7	464.5
modèle 11	9	4365.7	4328.8	937.4	3460.4	3458.7	270.5

Tableau 24. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de l'énergie d'indentation pour les contreplaqués en mélange de cèdre aubier et de cèdre duramen avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du hêtre et du	Nombre de	l'énergie (N.mm)	l'énergie (N.mm)	Ecart type	l'énergie (N.mm)	l'énergie (N.mm)	Ecart type
------------------------	-----------	------------------	------------------	------------	------------------	------------------	------------

cèdre duramen	plis	avant exposition (médian)	avant exposition (moyen)		après exposition (médian)	après exposition (moyen)	
modèle 1	5	5150.2	5150.2	444.8	2607.2	2784.5	594.1
modèle 2	5	5423.8	5298.1	655.7	2929.6	2914.6	557.8
modèle 3	5	4521.4	4575.6	577.5	2802.6	2799.5	213.5
modèle 4	5	4233.2	4223.1	587.3	2172.5	2400.9	547.4
modèle 5	9	5892.2	6114.9	534.2	3246.6	3174.1	453.6
modèle 6	9	5879.8	5881.0	360.0	3471.3	3473.3	461.3
modèle 7	9	6314.9	6266.8	664.8	3500.4	3686.4	439.1
modèle 8	9	5554.1	5725.7	463.1	3460.5	3429.8	468.7
modèle 9	9	5304.1	5462.5	310.6	4728.9	4318.5	1026.6
modèle 10	9	5496.1	5437.1	600.3	3372.2	3385.7	339.3
modèle 11	9	5514.3	5464.1	459.1	3207.6	3364.9	507.1

Tableau 25. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de l'énergie d'indentation pour les contreplaqués en mélange de hêtre et de cèdre duramen avant et après l'exposition au *C. versicolor*.

Mélange du peuplier et du cèdre duramen	Nombr e de plis	l'énergie (N.mm) avant exposition (médian)	l'énergie (N.mm) avant exposition (moyen)	Ecart type	l'énergie (N.mm) après exposition (médian)	l'énergie (N.mm) après exposition (moyen)	Ecart type
modèle 1	5	4321.0	4320.4	382.7	2556.6	2645.1	283.8
modèle 2	5	3864.4	3991.1	327.6	2842.8	2886.5	350.5
modèle 3	5	4049.8	3796.0	468.3	2948.8	2831.5	551.6
modèle 4	5	3918.5	3986.9	534.0	2917.9	2727.7	655.5
modèle 5	9	4258.7	4277.1	187.2	3170.2	3177.8	276.0
modèle 6	9	4316.3	4161.4	561.1	2678.2	2604.1	959.1
modèle 7	9	4916.4	5023.6	273.5	3373.8	3284.8	464.5
modèle 8	9	4562.3	4690.1	436.4	3375.3	3174.4	466.6
modèle 9	9	4656.3	4563.2	327.9	3623.9	3502.0	431.5
modèle 10	9	4918.7	4929.3	380.2	4526.1	4510.1	1569.8
modèle 11	9	3953.0	4914.1	585.2	3678.5	3648.7	311.2

Tableau 25. Les valeurs moyennes, médianes et les écarts type de l'énergie d'indentation pour les contreplaqués en mélange de hêtre et de cèdre duramen avant et après l'exposition au *C. versicolor*.