

Évaluation par arbre décisionnel du potentiel de réemploi du bois lamellé-collé : Une application expérimentale

Aghiless Yahmi^{1,2,3}, Mustapha Nouri¹, Mahfoud Tahlaiti^{1,4}, Abdelhafid Khelidj², Charlène Raffin³ et Nicolas Place³

¹ Icam, Site de Nantes, 35 av. du Champ de Manœuvres, 44470 Carquefou, France

² Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44600 Saint-Nazaire, France

³ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 77420 Marne-la-Vallée, France

⁴ Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France

RESUME Ce travail propose une méthode pour évaluer l'état du bois lamellé-collé récupéré et déterminer son potentiel de réemploi. Une analyse approfondie de la pathologie du bois a conduit à la création d'une méthodologie de diagnostic sous forme d'arbre décisionnel. Cette méthode a été appliquée sur une charpente en bois lamellé-collé (BLC) récupérée d'un site de démolition. Un protocole expérimental en laboratoire a été mis en place afin de valider et compléter cette approche. Le protocole comprenait l'identification des données manquantes concernant le produit : essence, densité, type de colle, résistance au cisaillement, propriétés mécaniques en flexion des mono-lamelles et lamelles doubles ainsi que la vérification des sorties de l'arbre décisionnel. Les résultats expérimentaux ont validé l'approche et ont montré que le BLC était produit de lamelles en épicea avec une densité de $420 \pm 45 \text{ kg/m}^3$ à sec, collés à l'aide de l'adhésif mélamine–urée–formaldéhyde (MUF) avec une résistance au cisaillement de $7.37 \pm 1.79 \text{ MPa}$. Les tests de résistance et de module d'élasticité en flexion indiquent que les mono-lamelles et le bois lamellé-collé sont respectivement de classe C16 et GL20H, et donc réemployables.

Mots-clefs lamellé-collé, protocole de réemploi, propriétés mécaniques, résistance au cisaillement du collage, arbre décisionnel

I. INTRODUCTION

Les pratiques intensives en ressources du secteur de la construction ont largement contribué à la dégradation environnementale (Haeusler and Guyot, 2020). En effet, le secteur du BTP est responsable de 213 millions de tonnes sur les 277 millions de tonnes de déchets générés par les activités économiques, ce qui représente 77% du total (ADEME, 2023). L'adoption d'une approche d'économie circulaire basée sur les 3R (réduire, réemployer et recycler) pourrait résoudre ce problème en minimisant l'utilisation de nouvelles ressources, en améliorant la gestion des déchets et en économisant de l'énergie (Ministry of Ecological Transition, 2020; Minunno et al., 2020; Viola and Thomas, 2021). Le réemploi de produits, d'équipements et de matériaux dans la construction présente un potentiel prometteur (Minunno et al., 2020), mais rencontre des difficultés pour

répondre aux exigences des nouvelles structures, car les matériaux de réemploi peuvent être altérés par des facteurs variés comme l'exposition à différentes conditions climatiques, causant différents dommages (Netinger Grubeša et al., 2019; Poncelet and Vrijders, 2021). L'importance de ces aspects et tant d'autres a été soulignée dans plusieurs études (European Commission, 2022; Interreg NWE FCRBE, 2021; Poncelet and Vrijders, 2021).

Parmi les matériaux réemployables, le bois lamellé-collé (BLC) se distingue grâce à ses propriétés structurelles et sa flexibilité, le rendant pertinent pour une seconde vie. Cependant, la détérioration des lamelles, de l'adhésif, et de l'interface entre le bois et l'adhésif peut entraîner une diminution des propriétés mécaniques du bois lamellé-collé (Okada et al., 2020). En effet, le comportement du bois est fortement variable (Vardanyan, 2021) ; Il réagit différemment selon son taux d'humidité, sa nature hydrophile et poreuse. Concernant le collage, la délamination des couches collées peut survenir, notamment en raison du vieillissement sous certaines conditions d'exposition telles que l'humidité et la température, ou en raison d'erreurs de fabrication (Gomes Ferreira et al., 2017). Par ailleurs, il est important de souligner que l'un des principaux sinistres rencontrés pour les produits en bois est la formation de fissures, qui peuvent être causées par divers mécanismes liés à des sollicitations, principalement initiée par le gonflement et le retrait dus aux variations de la teneur en humidité (Berg et al., 2015; Dietsch and Tannert, 2015; Frese and Blaß, 2010). Ce phénomène peut également générer des délaminations (Berg et al., 2015; Dietsch and Tannert, 2015; Frese and Blaß, 2010). De plus, les traitements du bois, tels que les traitements thermiques, affectent la couleur et l'imperméabilité du matériau (Jiang et al., 2022b, 2022a; Nziengui, 2019). Les changements de couleur dus à l'humidité, aux UV, à la température et aux champignons indiquent une dégradation, qui peut être superficielle ou structurelle (Desch and Dinwoodie, 1996). Les champignons fragilisent la structure du bois, affectant sa résistance et sa masse (Brischke et al., 2008; Feci et al., 2013; Kim et al., 1994; Witowski et al., 2016). Les insectes, tels que les scarabées et les termites, l'endommagent en s'y nourrissant, influencés par la composition du bois et les facteurs environnementaux (Martín and López, 2023; Verbist et al., 2020). Ainsi, avant d'envisager tout réemploi de BLC dans de nouveaux projets de construction, il est important d'évaluer son potentiel de réemploi.

Ce travail propose une méthode novatrice pour estimer le potentiel de réemploi du BLC, à l'aide d'un arbre décisionnel. Elle se base sur une analyse détaillée de la littérature concernant la pathologie du bois, l'intégrité structurelle et l'impact des conditions environnementales sur les propriétés mécaniques. L'objectif étant d'avoir une méthode simple qui compile et couvre l'intégralité des problématiques rencontrées sur les éléments en BLC, permettant de le diagnostiquer rapidement. Un cas d'étude a été traité afin d'évaluer la méthodologie et de montrer son fonctionnement.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Développement d'une approche par arbre décisionnel

Etant basé sur l'analyse de l'état de l'art, un arbre décisionnel comprenant les mécanismes de dégradation potentiels, les indicateurs et les tests à réaliser est développé. Après sa conception, il est possible d'évaluer l'état de dégradation d'un matériau et déterminer son potentiel de réemploi. De plus, il permet d'examiner les poutres au sein d'une structure existante pour identifier les éléments nécessitant un remplacement. Des observations visuelles mènent à des questions binaires, utilisant des méthodes de test non ou semi-destructives, pour conclure sur l'état du matériau et sa réemployabilité. Il est constitué de trois éléments : fissures/délaminations, insectes et décoloration.

1. Les fissures et les délaminations :

Pour évaluer les fissures et la délamination du bois lamellé-collé, les recommandations d'un document de la Fédération Française de la Construction Bois (*Notes techniques du bois lamellé N°1 – Fissures*, 2016) ont été utilisées. Les fissures sont classées en trois catégories : les fissures/délaminations mineures ne présentant aucun risque, les fissures significatives avec un potentiel d'aggravation, celles-ci sont plus grandes, parallèles aux plans de collage, et doivent être surveillées pour éviter leur évolution. Enfin, les fissures larges/traversantes qui dépassent les critères des deux premières classes et peuvent s'étendre sur plusieurs lamelles. La présence de celles-ci implique un rejet systématique de la poutre, ou de la partie concernée par la fissure. Ceci dit, la poutre, ou la partie touchée, peut être réutilisée pour d'autres fins. La figure 1 englobe les différents critères et cite les trois scénarios de réemployabilité : haut potentiel de réemploi (SC1), réemployable avec certaines conditions (SC2) et non réemployable (SC3) où SC est l'abréviation de Scenario Crack.

A noter qu'un mètre ruban, une jauge de profondeur et une jauge d'épaisseur peuvent être utilisés, respectivement, pour mesurer la longueur, la profondeur et pour l'ouverture de la fissure. Une jauge de profondeur d'une épaisseur de 0,2 mm convient pour mesurer la profondeur des fentes et des fissures dans le bois (AFNOR, 2019).

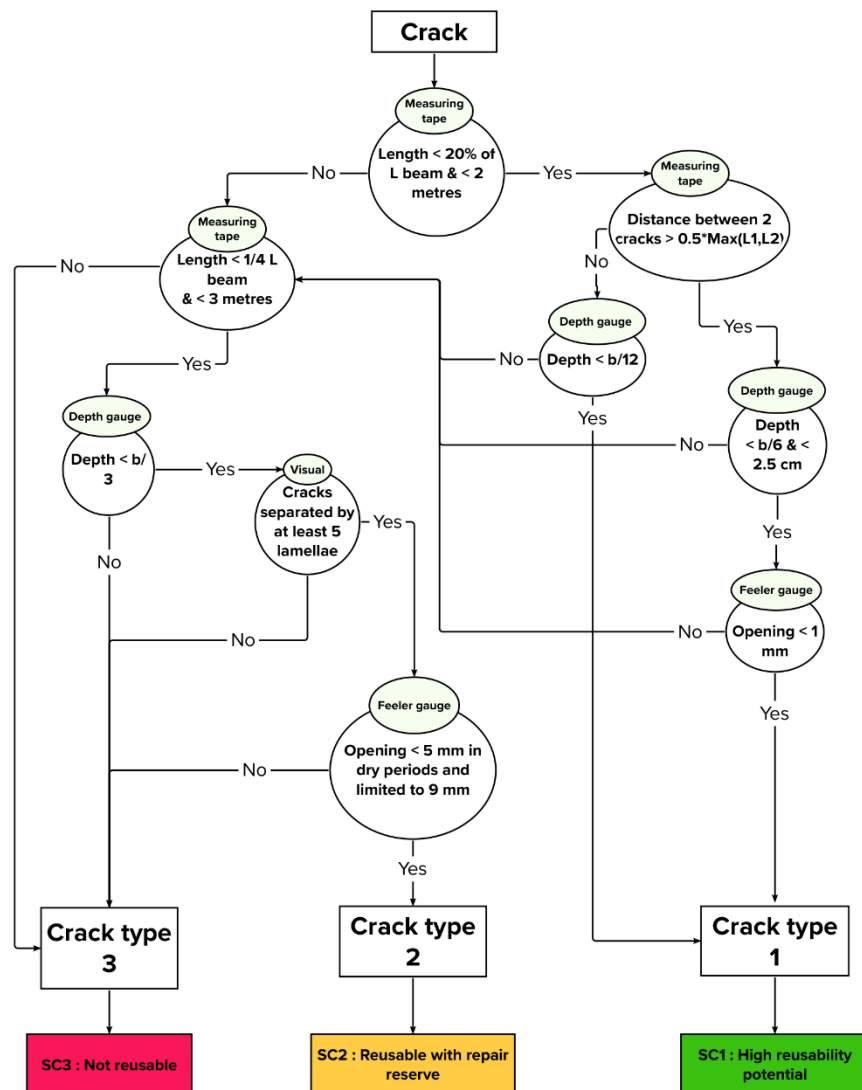


FIGURE 1. Arbre décisionnel pour le diagnostic des fissures et des délaminations (Yahmi et al., 2023).
SC pour Scenario Crack.

2. La présence d'insectes :

En s'appuyant sur plusieurs sources bibliographiques (Desch and Dinwoodie, 1996; Findlay, 1967; Illston, 2018; Martín and López, 2023; Moore, 1979; Råberg et al., 2005; Ridout, 2001) un arbre décisionnel de diagnostic sur la présence d'insectes a été développée. Lors de l'inspection du bois lamellé-collé pour la présence d'insectes, il est crucial de reconnaître les signes de dommages causés par les insectes xylophages. Les larves créent des tunnels dans le bois, laissant des trous de sortie et des amas de sciure. Les types de dommages varient selon l'espèce d'insecte. Les termites, en particulier, représentent une menace majeure pour les structures en bois, se nourrissant principalement sous la surface du bois et produisant une sciure granulaire. Les tests au maillet et les tests d'éclatement aident à évaluer la présence de termites et la condition du bois. Comme

montré dans la figure 2, le diagnostic relatif aux insectes, se base fortement sur le visuel étant donné que chaque insecte possède ses caractéristiques qui le différencie des autres.

Notez qu'un pied à coulisse peut être utilisé pour mesurer le diamètre du trou et un tournevis pour le test d'éclatement.

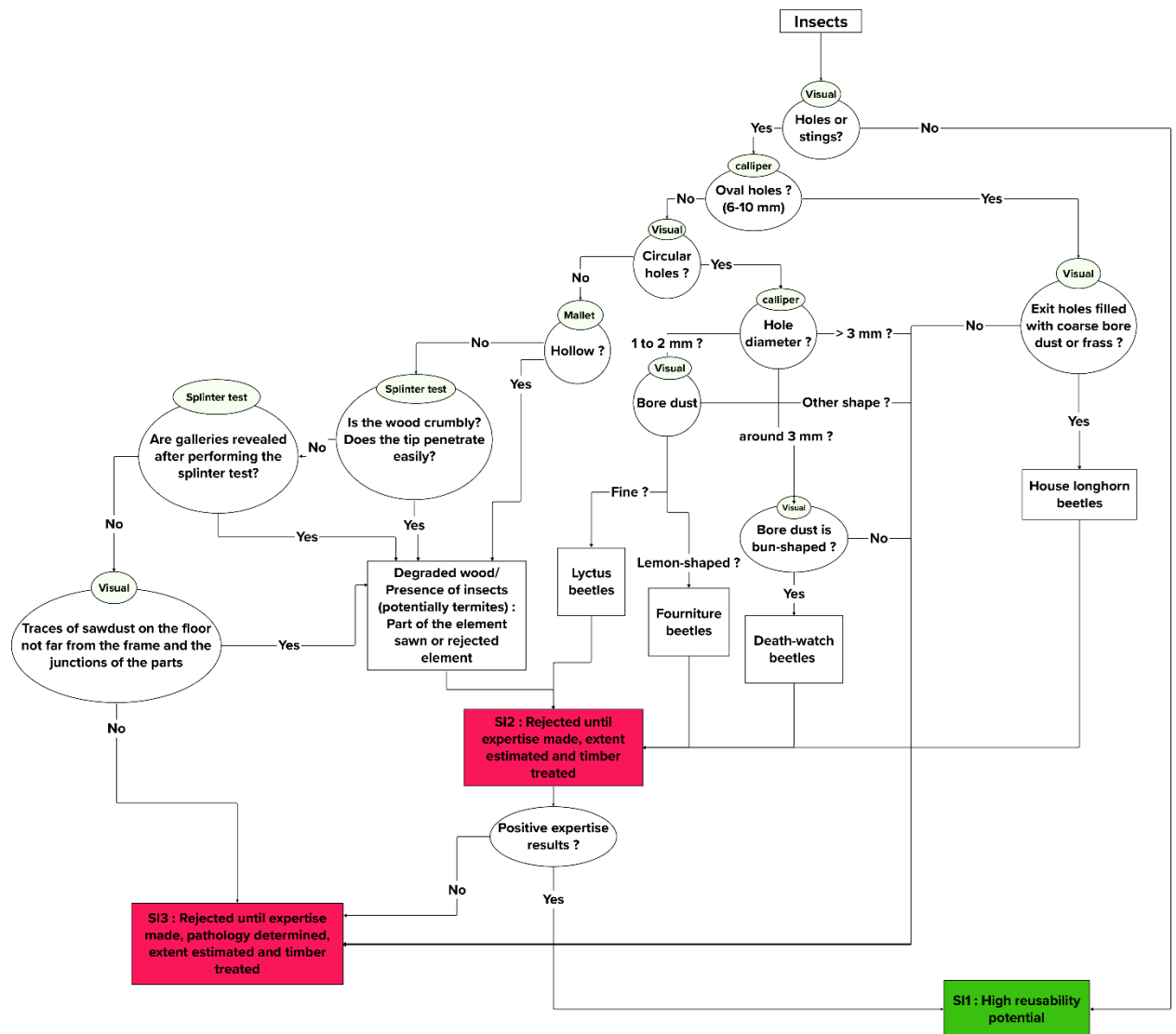


FIGURE 2. Arbre décisionnel pour le diagnostic et l'identification des insectes (Yahmi et al., 2023). SI pour Scenario Insect.

3. Les décolorations :

Pour évaluer la décoloration du bois lamellé-collé, plusieurs sources bibliographiques ont été étudiées (Desch and Dinwoodie, 1996; Dimou et al., 2017; Illston, 2018; Martín and López, 2023; Råberg et al., 2005). Au début, un test d'éclatement est réalisé sur la zone concernée. Si la fracture du fragment est sèche, le bois est sain. La décoloration peut indiquer une infiltration surfacique ou du bleuissement sans pour autant affecter les propriétés mécaniques du bois. Autrement, cela peut signaler une pourriture et une résistance réduite. La présence de pourriture blanche ou brune est

déterminée par l'aspect et la texture du bois. Il existe plusieurs types de pourritures blanches et brunes. Tout comme les insectes, chaque champignon a ses caractéristiques. L'ensemble est résumé dans la figure 3. Les dommages significatifs entraînent le rejet du bois, tandis que les zones infectées mineures peuvent être coupées avant d'envisager le réemploi.

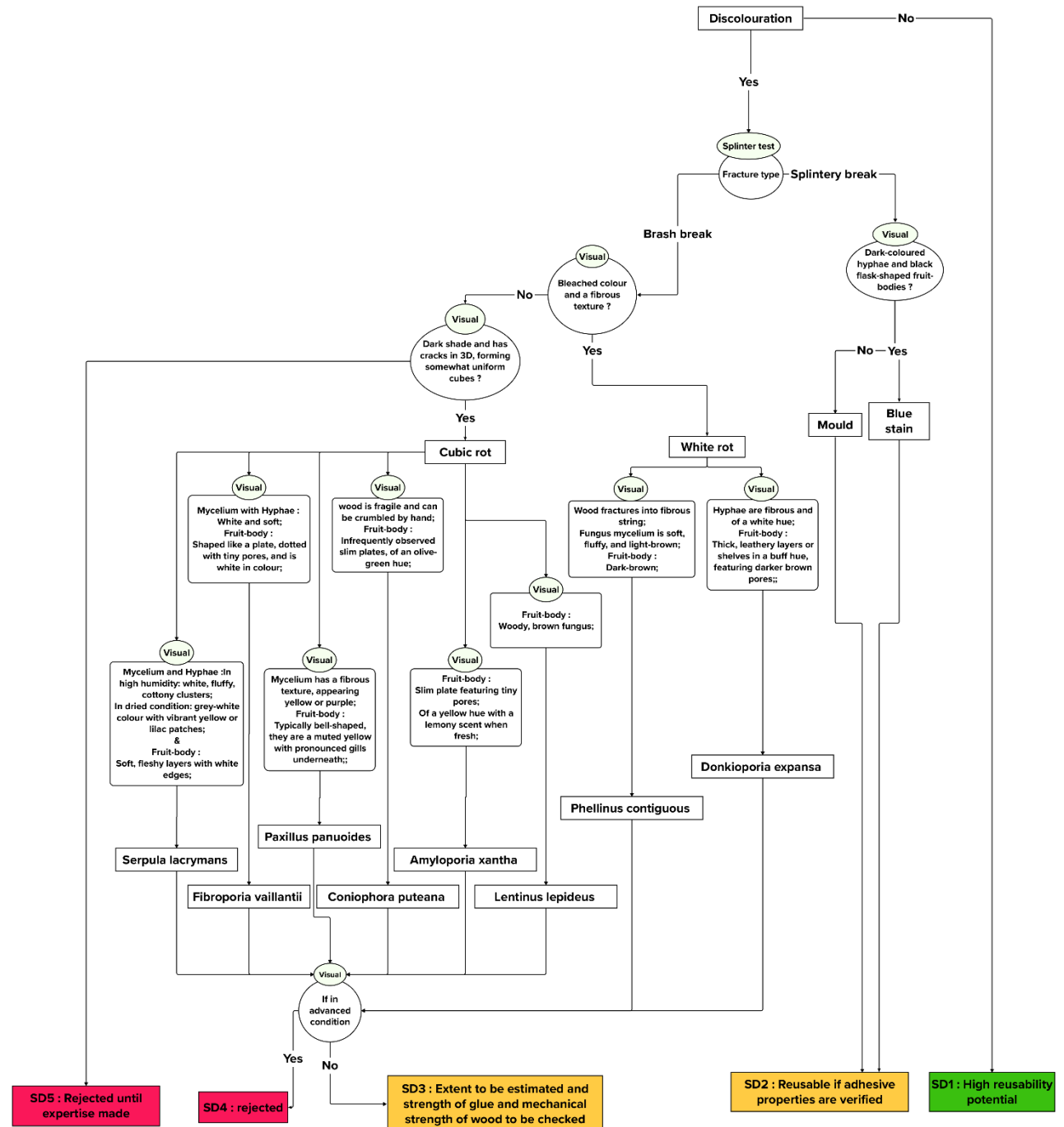


FIGURE 3. Arbre décisionnel pour le diagnostic et l'identification des décolorations (Yahmi et al., 2023).
SD pour Scenario décoloration.

La figure 4 résume les étapes globales de la méthodologie d'évaluation de l'arbre décisionnel et les principales conclusions qui peuvent être tirées des différents scénarios. Lorsque le potentiel de réemployabilité est élevé ou moyen, une application structurale est possible. Le rejet n'implique pas nécessairement que la poutre soit immédiatement classée comme déchet ; En effet, une étude peut être menée pour déterminer si elle peut être réutilisée pour d'autres usages non structurels ou recyclée pour fabriquer d'autres produits en bois.

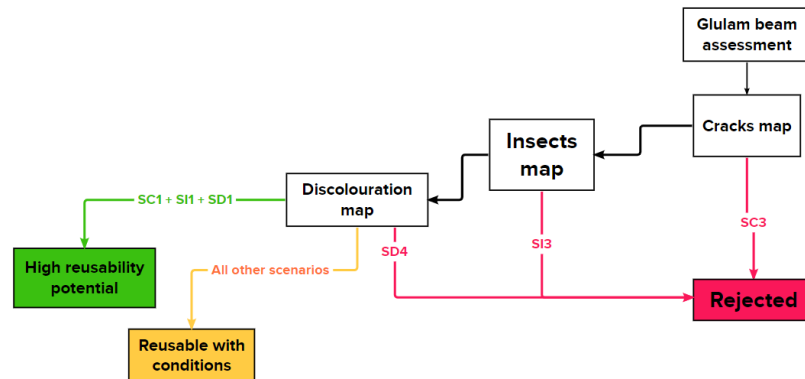


FIGURE 4. Arbre décisionnel pour le diagnostic et l'identification des décolorations (Yahmi et al., 2023).

B. Cas d'étude

Un cas d'expérimentation a été réalisé sur une ancienne usine de textiles à *Montaigu-Vendée* pour évaluer l'état de ses poutres en BLC. L'usine se compose de deux charpentes symétriques, chacune avec une poutre extérieure incurvée et deux poutres intérieures connectées. Les poutres varient en taille et étaient numérotées selon leur disposition dans le chantier, suite à leur dépose pour l'évaluation. L'objectif était d'appliquer l'arbre décisionnel et de vérifier ses conclusions. Le protocole expérimental a combiné les tests requis (vérifier les propriétés mécaniques de l'adhésif) et identifier les caractéristiques techniques essentielles comme l'essence du bois, la résistance à la flexion, la classe de résistance et la résistance au cisaillement de l'adhésif.

C. Protocole expérimental

Le protocole expérimental comprenait plusieurs tests :

- Observation microstructurale :

Dans le but d'identifier l'essence de bois via un microscope métallographique Olympus BH2 Infinity 2, les échantillons ont d'abord été découpés à l'aide d'une scie à ruban, puis polis à l'aide d'une machine à polir, Jean Wirtz FT 250, en utilisant des disques abrasifs en carbure de silicium.

- Densité :

La méthode de séchage au four a été suivie (Reeb et al., 1999). 5 échantillons cubiques de bois de 1 cm³ ont été séchés à 103 °C jusqu'à ce que leur masse se stabilise, puis conservés dans un dessiccateur. La densité a été déterminée par la méthode d'Archimède, mesurant leur poids dans l'air et dans un liquide.

- Spectroscopie Infrarouge Transformée de Fourier (FTIR) :

Pour identifier le type d'adhésif, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier assistée par réflexion totale atténuée (ATR-FTIR) a été utilisée avec un spectromètre Perkin Elmer. Cette méthode, ne nécessitant pas de préparation préalable des échantillons, analyse les différences spectrales entre le bois et l'adhésif. Des ajustements de traitement du signal, tels que la correction ATR et de ligne de base, sont également réalisés pour optimiser la qualité du spectre.

- Tests de résistance au cisaillement :

Des tests de cisaillement ont été réalisés sur 32 échantillons avec une machine d'essai universelle électromécanique (Instron modèle 5566) avec une cellule de charge de 10 kN. Les échantillons, préparés selon la norme NF EN 302-1 (AFNOR, 2023). Les tests se sont déroulés dans des conditions ambiantes de laboratoire, et la résistance au cisaillement a été calculée. Après les tests, le pourcentage de rupture du bois a été estimé visuellement pour chaque échantillon.

- Tests de flexion :

Des essais de flexion à quatre points ont été effectués sur 45 lamelles simples et 15 doubles, avec des dimensions spécifiques, en utilisant deux modèles de machines d'essai universelles Instron (modèles 5566 et 5585), équipés respectivement de cellules de charge de 10 kN et de 200 kN, ont été utilisés. Le protocole suivi était celui de la norme EN 408 (AFNOR, 2012). Les tests ont été réalisés dans des conditions de laboratoire standardisées. Après les tests, la résistance à la flexion et le module de flexion ont été calculés, puis classés selon les normes NF EN 14358 (AFNOR, 2016a) et NF EN 338 (AFNOR, 2016b). Enfin, la classe des lamelles simples a été utilisée pour déterminer celle du bois lamellé-collé selon NF EN 14080 (AFNOR, 2013).

- Echantillonnage :

Pour la partie expérimentale, l'échantillonnage a été effectué sur la base des résultats de l'arbre décisionnel. La poutre affectée, contenant une section moisie, a été choisie pour caractérisation, en supposant que ses performances seraient les performances minimales de l'ensemble du lot. La poutre de 9 m a été fournie en sections de 3 m en raison des contraintes de transport. Chaque section a été découpée en trois sous-sections, la sous-section (SS) moisie étant la SS 2.1. Les caractérisations mécaniques ont été réalisées sur chaque sous-section encadrée dans la figure 5, en prélevant trois lamelles individuelles, une double lamelle et un échantillon pour les tests de cisaillement de l'adhésif.

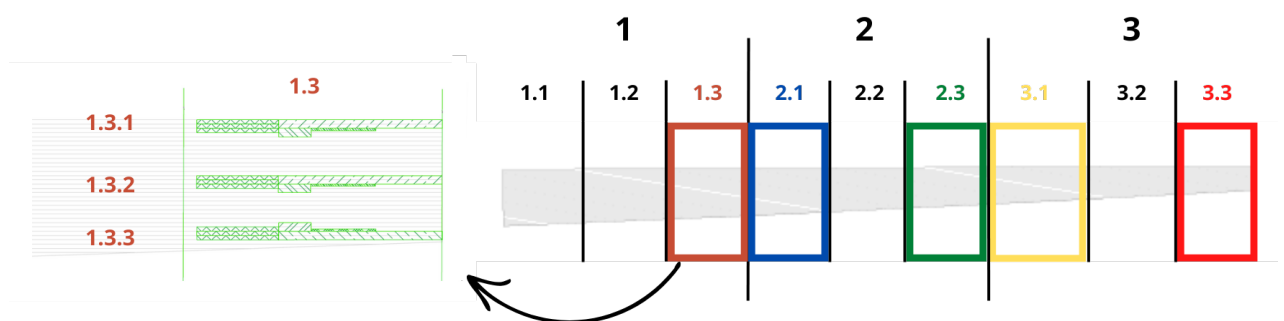


FIGURE 5. Découpe de la poutre en BLC et choix des échantillons de sous-section (Yahmi et al., 2023).

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Application de l'arbre décisionnel

Après application du diagnostic sur le lot des poutres, les résultats ont été rapportés dans la figure 6. Comme montré par la figure, aucune poutre ne présentait de fissures de type 2 ou 3, les classant toutes dans le scénario de réemploi SC1. Aucune anomalie n'a été observée concernant les insectes, correspondant au scénario SI1. Cependant, pour la décoloration, 20 poutres présentaient seulement des traces superficielles d'infiltration d'eau (SD1), facilement nettoyables. Une exception montrait des taches significatives et une section moisie, indiquant un scénario SD2 avec une délamination localisée, possiblement due à un système de chauffage proche ou à une infiltration d'eau.

À partir des résultats obtenus et des informations de base sur le lot, divers tests nécessaires ont été identifiés. Pour tous les tests, il était nécessaire d'étudier la variabilité des propriétés le long de la poutre, d'où la prise de 3 à 5 échantillons à différentes positions pour effectuer les tests selon les normes actuelles.

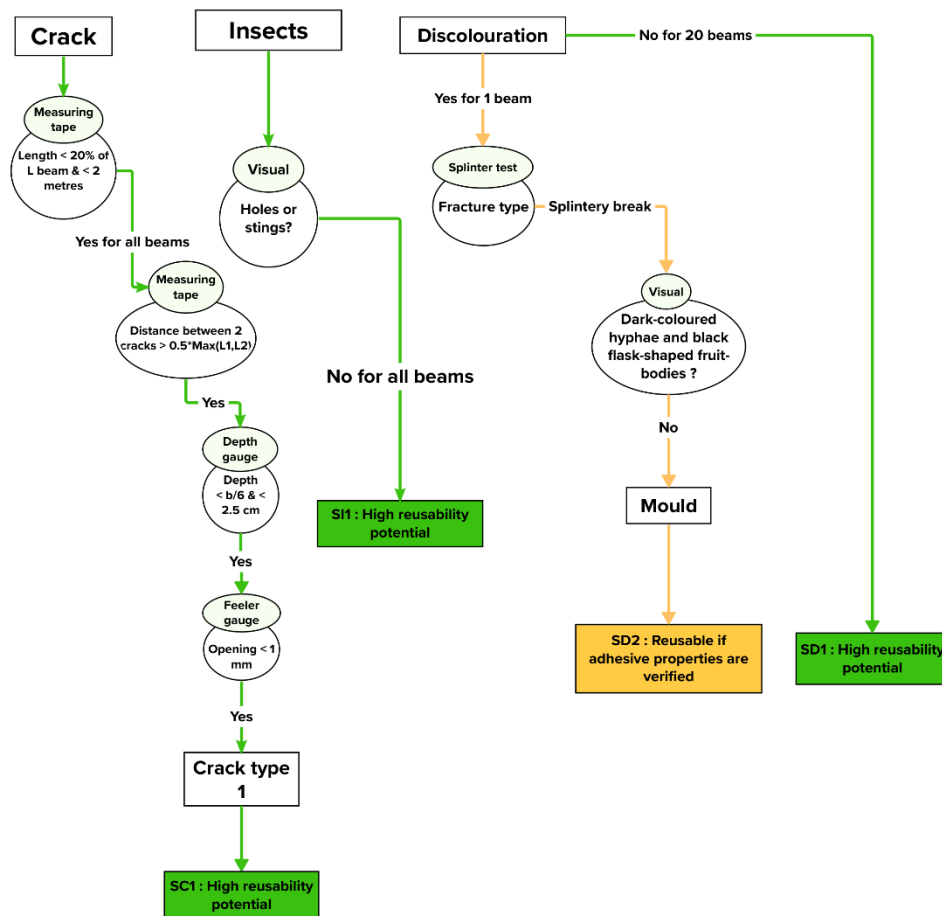


FIGURE 6. Application de l'approche de l'arbre décisionnel sur le lot de lamellé-collé (Yahmi et al., 2023).

B. Résultats expérimentaux

- Essence de bois :

Grâce à des observations microscopiques montrant une transition graduelle entre l'aubier et le duramen et des canaux résineux normaux avec une section festonnée ("Anatomie du Bois," 2022; Cufar et al., 2019), l'essence de bois a été identifiée comme de l'épicéa.

- Densité :

La densité obtenue du bois d'épicéa est de $420 \pm 45 \text{ kg/m}^3$ à sec, ce qui est cohérent avec la plage de densité de l'épicéa mentionnée dans la littérature, variant de 370 à 571 kg/m^3 (Gryc and Horáček, 2007). Cette densité correspond également à la valeur standard en France de 450 kg/m^3 à 12% d'humidité ("Epicéa," 2022). Les variations observées peuvent s'expliquer par le poids supplémentaire dû aux conditions sèches de l'échantillon et les erreurs de manipulation.

- Type d'adhésif :

L'analyse par spectroscopie FTIR a permis de comparer les spectres d'un adhésif mélangé au bois et du bois seul. Les pics principaux identifiés dans le spectre du bois ont été distingués, indiquant des composants tels que la cellulose, l'hémicellulose et la lignine (Cavallaro et al., 2019; Nouri et al., 2021). Des différences dans le spectre de l'adhésif + bois ont révélé la présence de liaisons chimiques caractéristiques de l'adhésif mélamine-urée-formaldéhyde (MUF), notamment des pics associés à C=O, C-N, N-H et au pont méthylène (Liu et al., 2017). Ces résultats, combinés avec la couleur foncée de l'adhésif, indiquent son vieillissement naturel (*Le Manuel du Bois Lamellé*, 2013).

- Résistance au cisaillement de la liaison adhésif-bois :

Sur les 32 échantillons testés, seuls 18 ont donné des résultats exploitables, principalement en raison de la difficulté à préparer les échantillons avec précision, notamment en coupant jusqu'à la jointure de la colle.

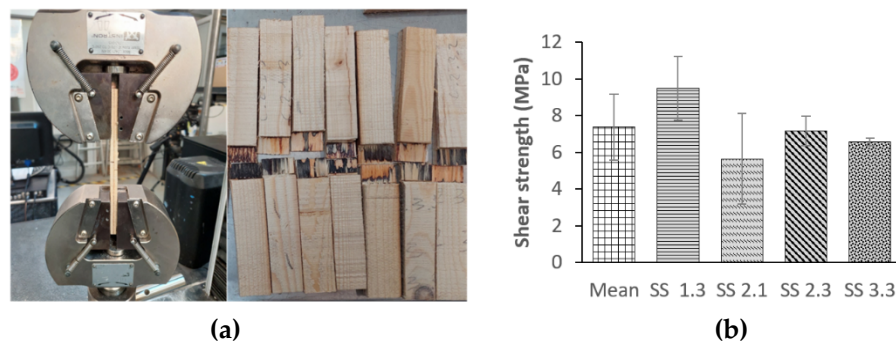


FIGURE 7. (a) Échantillons avant et après l'essai ; (b) Résultats de l'essai de résistance au cisaillement du collage (Yahmi et al., 2023).

Les échantillons avant et après les tests, ainsi que les résultats, sont illustrés dans la Figure 7(a). Les tests de cisaillement ont révélé que la résistance moyenne de l'adhésif était de $7.38 \pm 1.79 \text{ MPa}$. La valeur est inférieure à 10 MPa, qui est le seuil de résistance pour les nouvelles structures en lamellé-collé selon la norme NF EN 302-1 (AFNOR, 2023) et dans les travaux de Tran (Tran, 2014). avec un pourcentage moyen de rupture du bois de 64%, inférieur à d'autres références (AFNOR, 2013; Wang et al., 2016). Les résultats les plus faibles ont été observés dans une section moisie, avec une moyenne de $5.65 \pm 2.45 \text{ MPa}$, et une résistance encore plus basse à 4.75 MPa dans

la partie supérieure moisie. L'élimination de cette section a augmenté la valeur moyenne à 7.74 ± 0.55 MPa. Cependant, cette valeur reste inférieure au seuil standard (10 MPa) pour les nouvelles structures en lamellé-collé (AFNOR, 2023; Tran, 2014), nécessitant ainsi une caractérisation complémentaire du BLC.

- Essais de flexion et classe de résistance :

- Mono-lamelles :

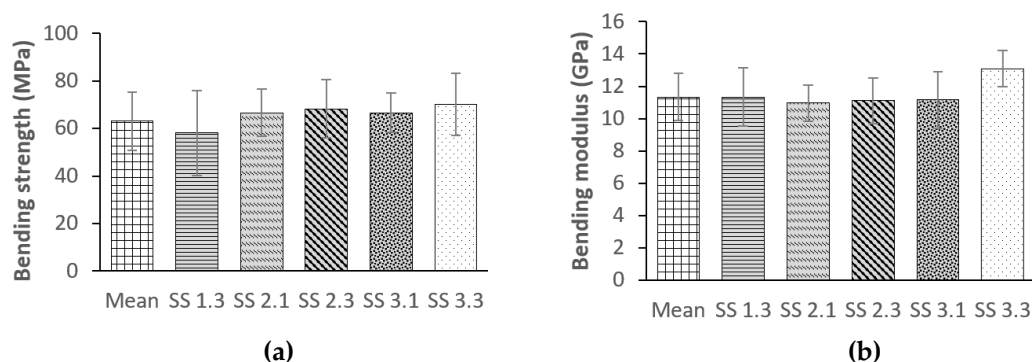


FIGURE 8. (a) Résistance à la flexion des mono-lamelles ; (b) Module de flexion des mono-lamelles (Yahmi et al., 2023).

La Figure 8 montre les résistances à la flexion et les modules de flexion des mono-lamelles. Entre les différents types de ruptures de bois observables (Grecchi, 2022), la tension transversale était le mode de rupture dominant dans les mono-lamelles. Cette rupture transversale peut être due à une tension parallèle aux fibres dans la partie inférieure de la lamelle, provoquant une fracture décalée par rapport au milieu de la lamelle. Les défauts intrinsèques du bois comme les nœuds ou une combinaison de facteurs peuvent également contribuer à ce type de défaillance et fragiliser l'échantillon (Komán et al., 2013).

Les valeurs obtenues ont permis de déterminer la classe de résistance du bois selon la norme EN 338 (AFNOR, 2016b). Les résultats obtenus sont de 7 GPa pour le module et de 26 MPa pour la résistance. Cette résistance correspond à la classe C24 selon la norme. Cependant, pour cette classification, le module enregistré doit correspondre à la classe, ce qui n'est pas le cas ici puisque 7 GPa correspond à la classe C14. Par conséquent, la classe minimale pour les lamelles de ce lot est C14.

- Lamelles doubles :

Les essais sur les lamelles doubles ont montré une résistance et un module relativement stables (Figure 9), avec des valeurs moyennes de 59.79 MPa et 10.62 GPa. La fissure initiant la rupture se propage principalement et rapidement au niveau du joint de colle, indiquant une faible résistance à ce niveau comparé au bois. Les variations de propriétés le long de la poutre suggèrent l'influence de défauts comme les nœuds. La partie moisie a montré des valeurs inférieures notamment sur la partie inférieure. Finalement, la classification mécanique GL20H a été attribuée selon la norme EN 14080 (AFNOR, 2013), en accord avec les résultats pour les lamelles simples et doubles, indiquant l'adéquation de cette classe de bois lamellé-collé pour des usages structuraux.

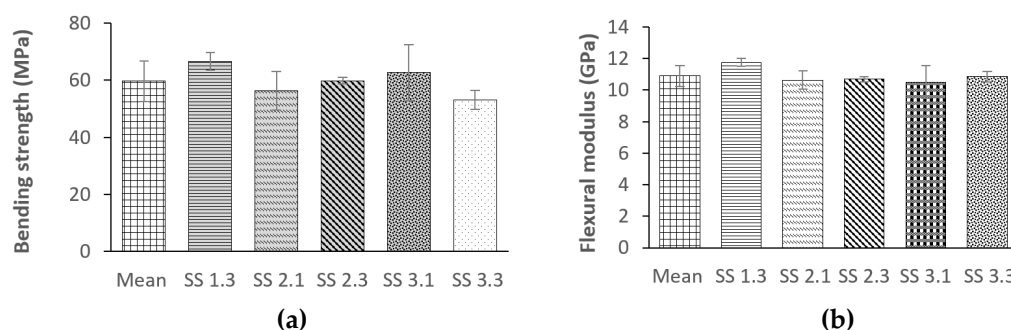


Figure 9. a) Résistance à la flexion des lamelles doubles ; (b) Module de flexion des lamelles doubles (Yahmi et al., 2023).

VI. CONCLUSIONS

L'arbre décisionnel développé et présenté dans cet article est un outil utile pour diagnostiquer l'état des produits, identifier leurs défauts et déterminer leur potentiel de réemploi. Cette approche contribue à optimiser le processus d'évaluation et de massification du réemploi, soutenant ainsi les objectifs de l'économie circulaire.

Dans cet article, un cas d'application a été réalisé sur le BLC, pour lequel l'évaluation in situ est essentielle pour assurer la sécurité et la performance requise dans de futurs projets de construction. L'arbre décisionnel utilisé a permis de tirer des conclusions pertinentes sur l'état d'un lot de poutres. Il a révélé qu'aucune fissure majeure, délamination ou présence d'insectes n'était observée, tout en soulignant la nécessité de vérifier les propriétés de l'adhésive après la détection de décolorations sur une poutre. Remarque qui a été démontrée grâce aux essais de résistance au cisaillement du collage. Cela démontre l'efficacité de l'arbre décisionnel pour évaluer l'état des matériaux et déterminer leur potentiel de réemploi. Globalement, les tests ont inclus l'identification de l'espèce de bois, la densité, le type de colle, et les propriétés de cisaillement et de flexion. Les résultats indiquent une densité de $420 \pm 45 \text{ kg/m}^3$, une colle de type mélamine-urée-formaldéhyde, et une résistance au cisaillement inférieure au seuil standard. La classe de résistance attribuée aux poutres permet de réaliser des calculs structurels pour leur réemploi.

Cette approche, qui s'affine progressivement à mesure que de nouvelles données sont intégrées, vise à être appliquée à divers gisements présentant des problématiques variées, afin d'en évaluer les limites et de les cataloguer. Il est crucial de souligner que cette méthode est conçue pour estimer uniquement le potentiel de réemploi, sans garantir la viabilité du réemploi d'un BLC. En conséquence, des essais destructifs ont été initialement menés pour compléter l'évaluation. À l'avenir, l'objectif est d'enrichir ces arbres décisionnels avec des essais non destructifs qui offriraient une évaluation plus précise de l'état et des propriétés des matériaux, afin de mieux déterminer leur aptitude au réemploi.

REFERENCES

- Notes techniques du bois lamellé N°1 – Fissures, 2016. . SNBL.
- ADEME, 2023. Déchets Chiffres-clés.
- AFNOR, 2023. NF EN 302-1 : Adhésifs pour structures portantes en bois - Méthodes d'essais - Partie 1 : détermination de la résistance au cisaillement en traction longitudinale.
- AFNOR, 2019. NF EN 14081-1+A1 : Structures en bois - Bois de structure à section rectangulaire classé pour sa résistance - Partie 1 : exigences générales.
- AFNOR, 2016a. NF EN 14358 : Structures en bois - Détermination et vérification des valeurs caractéristiques.
- AFNOR, 2016b. NF EN 338 : Bois de structure - Classes de résistance.
- AFNOR, 2013. NF EN 14080 : Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué - Exigences.
- AFNOR, 2012. NF EN 408+A1 : Structures en bois - Détermination et vérification des valeurs caractéristiques.
- Anatomie du Bois [WWW Document], 2022. . FUN MOOC. URL <http://www.fun-mooc.fr/fr/cours/anatomie-du-bois/> (accessed 8.20.22).
- Berg, S., Sandberg, D., Ekevad, M., Vaziri, M., 2015. Crack influence on load-bearing capacity of glued laminated timber using extended finite element modelling. *Wood Material Science & Engineering* 10, 335–343. <https://doi.org/10.1080/17480272.2015.1027268>
- Brischke, C., Welzbacher, C.R., Huckfeldt, T., 2008. Influence of fungal decay by different basidiomycetes on the structural integrity of Norway spruce wood. *Holz Roh Werkst* 66, 433–438. <https://doi.org/10.1007/s00107-008-0257-1>
- Cavallaro, G., Agliolo Gallitto, A., Lisuzzo, L., Lazzara, G., 2019. Comparative study of historical woods from XIX century by thermogravimetry coupled with FTIR spectroscopy. *Cellulose* 26, 8853–8865. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02688-3>
- Cufar, K., Balzano, A., Krže, L., Merela, M., 2019. Wood identification using non-destructive confocal laser scanning microscopy. *Les/Wood* 68. <https://doi.org/10.26614/les-wood.2019.v68n02a02>
- Desch, H.E., Dinwoodie, J.M., 1996. *Timber Structure, Properties, Conversion and Use*. Macmillan Education UK, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-13427-4>
- Dietsch, P., Tannert, T., 2015. Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. *Construction and Building Materials* 101, 1259–1270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.064>

Dimou, V., Kaziolas, D.N., Zygomas, I., Avtzi, N., 2017. Influence of biotic factors on the mechanical properties of wood, taking into account the time of harvesting. *Wood Material Science & Engineering* 12, 140–148. <https://doi.org/10.1080/17480272.2015.1063004>

Epicéa, 2022.

European Commission, 2022. Proposal for a Regulation laying down harmonised conditions for the marketing of construction products, amending Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Regulation (EU) 305/2011 [WWW Document]. URL <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/49315> (accessed 8.30.22).

Feci, E., Mannucci, M., Palanti, S., 2013. Diagnostic Evaluation of Insect Attack on Existing Timber Structures: A Review of some Case Studies. *Advanced Materials Research* 778, 1020–1027. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.1020>

Findlay, W.P.K., 1967. CHAPTER 3 - Causes of Deterioration in Timber, in: Findlay, W.P.K. (Ed.), *Timber Pests and Diseases*, Pergamon Series of Monographs on Furniture and Timber. Pergamon, pp. 19–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-011310-4.50009-8>

Frese, M., Blaß, H.J., 2010. Damage analysis of wooden hall supporting structures (In German), KIT Scientific Publishing. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe Institute of Technology, Germany. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000020517>

Glulam handbook – Le Manuel du Bois Lamellé, SNBL/UICB&Swedish Wood. ed, 2013.

Gomes Ferreira, J., Cruz, H., Silva, R., 2017. Failure behaviour and repair of delaminated glulam beams. *Construction and Building Materials* 154, 384–398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.200>

Grecchi, M., 2022. Building Renovation: How to Retrofit and Reuse Existing Buildings to Save Energy and Respond to New Needs, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89836-6>

Gryc, V., Horáček, P., 2007. Variability in density of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) wood with the presence of reaction wood. *Journal of Forest Science* 53, 129–137. <https://doi.org/10.17221/2146-JFS>

Haeusler, L., Guyot, M., 2020. Waste key figures: The essentials 2020 (In French). ADEME.

Illston, P.D., John (Ed.), 2018. *Construction Materials: Their Nature and Behaviour*, Fourth Edition, 4th ed. CRC Press, London. <https://doi.org/10.1201/9781315272436>

Interreg NWE FCRBE, 2021. Reuse Toolkit: Material sheets [WWW Document]. URL <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/fcrbe-facilitating-the-circulation-of-reclaimed-building-elements-in-northwestern-europe/news/reuse-toolkit-material-sheets/>

Jiang, J., Cao, J., Mei, C., 2022a. Microstructure, hydrophobicity and thermal stability of wood treated by silica/montmorillonite nanoparticle-stabilized Pickering emulsion (I). *Wood Sci Technol* 56, 111–121. <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01338-x>

Jiang, J., Du, J., Li, H., Mei, C., Gong, X., 2022b. Hydrophobicity Improvement on Wood for a Better Application of This Bio-Based Material. *Coatings* 12, 1465. <https://doi.org/10.3390/coatings12101465>

Kim, G.-H., Barnes, H.M., Lyon, D.E., 1994. Effect of Decay on the Mechanical Properties of Full-Sized Lumber 48, 145–149. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1994.48.2.145>

Komán, S., Sandor, F., Jozsef, A., Taschner, R., 2013. Effect of knots on the bending strength and the modulus of elasticity of wood. *Wood Research* 58, 617–626.

Liu, M., G. Thirumalai, R.V.K., Wu, Y., Wan, H., 2017. Characterization of the crystalline regions of cured urea formaldehyde resin. *RSC Advances* 7, 49536–49541. <https://doi.org/10.1039/C7RA08082D>

Martín, J.A., López, R., 2023. Biological Deterioration and Natural Durability of Wood in Europe. *Forests* 14, 283. <https://doi.org/10.3390/f14020283>

Ministry of Ecological Transition, 2020. Circular economy.

Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G.M., Gruner, R.L., 2020. Exploring environmental benefits of reuse and recycle practices: A circular economy case study of a modular building. *Resources, Conservation and Recycling* 160, 104855. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104855>

Moore, H.B., 1979. Wood-inhabiting Insects in Houses: Their Identification, Biology, Prevention and Control. Department of Agriculture, Forest Service.

Netinger Grubeša, I., Teni, M., Krstić, H., Vračević, M., 2019. Influence of Freeze/Thaw Cycles on Mechanical and Thermal Properties of Masonry Wall and Masonry Wall Materials. *Energies* 12, 1464. <https://doi.org/10.3390/en12081464>

Nouri, M., Griballah, I., Tahlaiti, M., Grondin, F., Beaugrand, J., 2021. Plant Extraction and Physicochemical Characterizations of Untreated and Pretreated Diss Fibers (*Ampelodesmos mauritanicus*). *Journal of Natural Fibers* 18, 1083–1093. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1687062>

Nziengui, C.F.P., 2019. Fissuration du bois en climat variable sous charges de longues durées: applications aux essences européennes et gabonaises (Thèse). Université Clermont Auvergne.

Okada, T., Kobori, H., Kojima, Y., Suzuki, S., Nishikido, K., Hirose, A., Takahashi, K., 2020. Evaluating the durability of structural glulam bonded with aqueous polymer-isocyanate adhesive by two kinds of accelerated aging treatments. *Eur. J. Wood Prod.* 78, 113–122. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01485-w>

Poncelet, F., Vrijders, J., 2021. J. Technical framework for re-used materials: How can the technical performance of re-used materials be justified? (In French). CSTC, Brussels, Belgium.

Råberg, U., Edlund, M.-L., Terziev, N., Land, C.J., 2005. Testing and evaluation of natural durability of wood in above ground conditions in Europe – an overview. *J Wood Sci* 51, 429–440. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0717-8>

Reeb, J.E., Milota, M.R., Association, W.D.K., Western Dry Kiln Association. Meeting (50th : 1999 : Portland, O.), 1999. Moisture content by the oven-dry method for industrial testing [WWW Document].

Ridout, B., 2001. Timber Decay in Buildings: The Conservation Approach to Treatment. *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology* 32, 58–60. <https://doi.org/10.2307/1504694>

Tran, V.D., 2014. Caractérisation et modélisation numérique des poutres en Bois Massif Reconstitué (BMR) réalisées avec une essence locale feuillue (These de doctorat). Université de Lorraine.

Vardanyan, E.R., Pavel Akimov, Merab Khalvashi, Eghiazar (Ed.), 2021. Contemporary Problems of Architecture and Construction: Proceedings of the 12th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction (ICCPAC 2020), 25-26 November 2020, Saint Petersburg, Russia. CRC Press, London. <https://doi.org/10.1201/9781003176428>

Verbist, M., Branco, J.M., Nunes, L., 2020. Characterization of the Mechanical Performance in Compression Perpendicular to the Grain of Insect-Deteriorated Timber. *Buildings* 10, 14. <https://doi.org/10.3390/buildings10010014>

Viola, J., Thomas, S., 2021. Re-use of building components (RE-USE) Potential for systematic re-use of building components in a regional context and realisation of a pilot project (In German), RE-USE. BBSR, Bonn, Germany.

Wang, X.A., Björnberg, J., Hagman, O., Ahmed, S.A., Wan, H., Niemz, P., 2016. Effect of Low Temperatures on the Block Shear Strength of Norway Spruce Glulam Joints. *BioResources* 11, 9638–9648.

Witomski, P., Olek, W., Bonarski, J.T., 2016. Changes in strength of Scots pine wood (*Pinus silvestris* L.) decayed by brown rot (*Coniophora puteana*) and white rot (*Trametes versicolor*). *Construction and Building Materials* 102, 162–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.109>

Yahmi, A., Nouri, M., Tahlaiti, M., Khelidj, A., Raffin, C., Place, N., 2023. Mind-Mapping Assessment of Reuse Potential of Glulam: An Experimental Study. *Buildings* 13, 2929. <https://doi.org/10.3390/buildings13122929>