

Réemploi du bois de structure : approches de caractérisation et de valorisation

REBHI Amal^{1,2}, GARNESSON Thomas², GALIMARD Philippe¹, COUREAU Jean-Luc¹, DE HAECK Maxime²,

¹Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Département Environnement et Génie Civil (GCE), Université de Bordeaux, Talence, France

² NOBATEK, Institut pour la transition énergétique du Bâtiment, Anglet, France
amal.rebhi@u-bordeaux.fr

Mots clefs : réemploi ; bois de structure ; économie circulaire ; qualification mécanique ; classement visuel ; classement par machine ; essais mécaniques.

Introduction

Le réemploi des matériaux de construction, et en particulier du bois de structure, contribue à la préservation des ressources naturelles et à la réduction de l'empreinte environnementale du bâtiment. Il constitue un levier essentiel de l'économie circulaire, en prolongeant la durée de vie des matériaux et en limitant l'extraction de ressources neuves.

Chaque année, la déconstruction génère d'importants volumes de déchets, parmi lesquels une part significative de bois encore exploitable pour des usages structurels. En France, l'étude GDBAT (FCBA 2022) estime à 2,3 millions de tonnes le gisement de bois issu du bâtiment en 2019, dont environ 40 % correspond à des éléments porteurs tels que poutres, chevrons ou solives, révélant un fort potentiel pour le réemploi. Aujourd'hui, les filières de valorisation privilégient la production d'énergie ou la fabrication de panneaux dérivés, saturant leur capacité à traiter le bois disponible. Une part importante de cette ressource reste donc sous-utilisée ou valorisée de manière sous-optimale, sans exploiter pleinement ses propriétés mécaniques.

Le cadre réglementaire évolue pour mieux intégrer l'empreinte carbone des matériaux. En France, la RE2020 (Ministère de la transition écologique 2020) impose une réduction accrue des émissions de gaz à effet de serre liées aux produits de construction. À l'échelle européenne, le plan d'action pour l'économie circulaire (European Commission 2020) encourage des stratégies de circularité, telles que le stockage durable du carbone dans les constructions en bois et la réutilisation des matériaux issus de la démolition.

Dans ce contexte, le projet Restwood, déployé à l'échelle nationale en France, vise à créer un réseau de plateformes de reconditionnement capables de fournir du bois de structure qualifié mécaniquement issu d'opérations de déconstruction. L'objectif principal est de développer les outils scientifiques et techniques nécessaires à la mise en place d'une filière complète de réemploi, couvrant diagnostic, dépose, transformation, qualification et réemploi.

À l'échelle européenne, le projet Woodstock complète cette démarche en se concentrant sur le réemploi et l'utilisation de bois sous-exploité (bois dur, bois de faible qualité, bois post-consommation et bois endommagé). Il vise à développer et tester des solutions circulaires et zéro-déchet pour la construction en bois. Bien que Restwood se concentre sur la filière nationale, Woodstock poursuit le même objectif de valorisation du bois réemployé, tout en favorisant l'échange de bonnes pratiques et l'émergence de standards européens pour le réemploi des matériaux.

Malgré son potentiel, le réemploi du bois de construction se heurte à plusieurs défis majeurs. La dépose soignée des éléments structuraux est nécessaire pour préserver leur intégrité, mais elle demande du temps et des compétences spécifiques, constituant un enjeu économique pour les entreprises de déconstruction. Par ailleurs, l'absence d'information précise sur l'historique des bâtiments complique l'évaluation de l'état du bois. Enfin, les normes actuelles, conçues pour le bois scié, ne permettent pas de définir la performance mécanique des éléments réemployés, limitant leur utilisation structurelle et freinant la massification de la pratique. Ces contraintes soulignent l'importance de développer des méthodes adaptées pour qualifier le bois récupéré et assurer son usage durable dans la construction neuve.

L'objectif de cette étude est de développer une méthode de classement visuel adaptée au bois de réemploi en France, en tenant compte des spécificités liées aux essences et aux conditions locales de croissance. Cette approche combine les principes de la norme française NF-B52-001-1 (2018) pour le bois scié et ceux de la norme norvégienne prNS3691 (2023) pour le bois de structure de réemploi. Elle est appuyée par des essais mécaniques en flexion et un classement mécanique par machine.

Matériel et méthodes

Deux lots de bois issus de chantiers de déconstruction ont été étudiés : le premier constitué de 21 éléments et le second de 27 éléments (Fig. 1), de sections homogènes et de longueurs comprises entre 3 et 3,6 m. Après séchage (12–18 % d'humidité), les éléments ont été préparés par retrait des pièces métalliques, brossage ou rabotage, afin de permettre une identification fiable des défauts. L'essence a été déterminée par analyse anatomique, en observant la microstructure du bois dans les deux plan radial et tangentiel.



Fig. 1: Photos des lots de bois testés : (a) lot 1 d'épicéa (21 éprouvettes) ; (b) lot 2 de pin (27 éprouvettes)

Dans un premier temps nous avons réalisé un classement visuel selon la norme française NF B52-001-1. Le classement repose sur l'analyse visuelle de plusieurs critères liés aux caractéristiques naturelles du bois, tels que la largeur des cernes de croissance, la taille et la fréquence des nœuds, la pente du fil, la présence de poches de résine, les fentes, les déformations et les flaches. Toutefois, cette méthode ne tient pas compte des altérations liées à un usage antérieur, comme les trous de fixation, les entailles, les dégradations causées par les insectes ou les champignons.

Dans un second temps, la norme norvégienne prNS 3691, spécifiquement conçue pour le classement du bois de réemploi, a été appliquée. Elle repose sur l'observation de deux types de caractéristiques : les singularités naturelles (nœuds, fissures, pente du fil, etc.) évaluées à l'aide de normes existantes pour le bois neuf comme la NF B52-001-1, et les altérations résultant d'un usage antérieur (trous de fixation, entailles, fissures traversantes, compressions, attaques biologiques). Ces défauts sont distingués entre petits et grands selon leur impact sur les performances mécaniques. La norme propose ainsi trois classes de résistance : R14 (équivalente à C14), R18 (C18) et R24 (C24), elle est principalement validée pour deux essences résineuses courantes en Norvège : l'épicéa et le pin.

Un classement mécanique par machine a également été réalisé à l'aide de la Xyloclass, en complément du classement visuel. Cette machine mesure la masse volumique et le module d'élasticité dynamique par vibration. Bien qu'initialement calibrée pour du bois scié de pin maritime, les données obtenues ont été exploitées pour déterminer les valeurs caractéristiques (densité fractile à 5 % et le module d'élasticité dynamique moyen) et attribuer une classe de résistance selon la norme EN 338.

Enfin, des essais destructifs en flexion quatre points ont été réalisés selon la norme EN 408. Ces essais ont permis de déterminer le module d'élasticité global (MOE) et la résistance en flexion (MOR), utilisés pour évaluer la fiabilité des méthodes de classement appliquées.

Résultats et Discussion

Les essais de flexion réalisés sur les deux lots de bois montrent que le premier lot d'épicéa (21 éléments) pourrait être classé C27 avec un MOE local moyen de 12 800 MPa, un MOR fractile 5 % de 34 MPa et une densité de 380 kg/m³. Le deuxième lot de pin (27 éléments) pourrait être classé C22 avec un MOE local moyen de 11 700 MPa, un MOR fractile 5 % de 23 MPa et une densité de 423 kg/m³. Les paramètres les plus limitants pour atteindre ces classes sont soit la résistance en flexion, soit la densité. Les essais montrent que le bois récupéré, qu'il s'agisse d'épicéa ou de pin, présente des valeurs de module d'élasticité et de résistance comparables, voire légèrement supérieures à celles du bois scié (Fig. 2), comme l'ont montré plusieurs études (Llana et al 2023, Nocetti et al 2024).

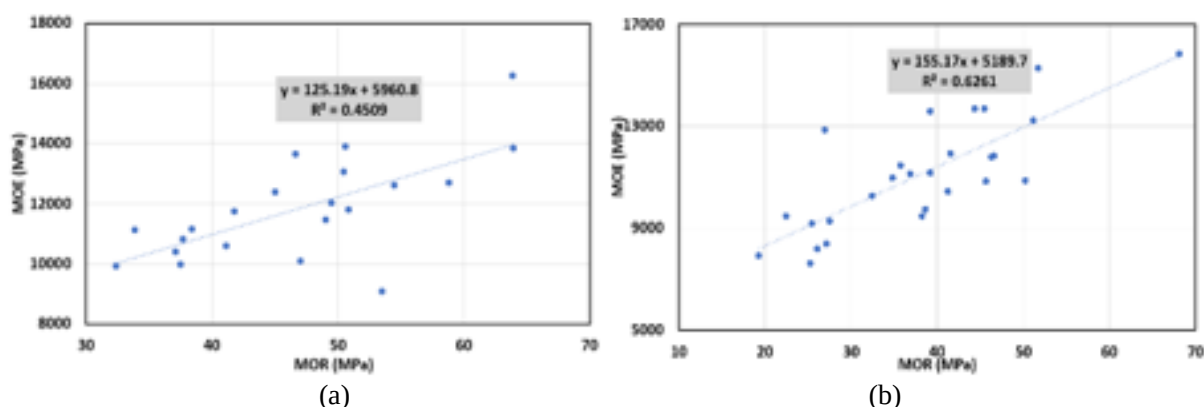


Fig. 2 : Corrélation entre le module d'élasticité global en flexion et la résistance en flexion : (a) lot d'Epicéa (21 éléments) ; (b) lot de Pin (27 éléments)

Les Tab. 1 et 2 présentent la répartition des éléments par classe de résistance selon la méthode de classement appliquée (NF B52-001-1, norme norvégienne prNS3691, classement machine et classement expérimental).

Pour le lot d'épicéa, la norme NF B52-001-1 classe la majorité des éléments en C24, légèrement en dessous des résultats expérimentaux, un seul élément (LB19) dépassant cette classe expérimentale. Cet élément ne présente ni défauts naturels prononcés ni signes d'usage antérieur et possède d'excellentes propriétés mécaniques (MOE = 13 600 MPa ; MOR = 47 MPa). En revanche, la norme Norvégienne prNS3691 sous-estime systématiquement la classe, 70 % des éléments étant classés en C18 ou moins, en raison de critères stricts sur les flaches. Le classement machine XyloClass, basé sur la masse volumique et le module d'élasticité dynamique, attribue une classe C27, en accord avec les essais destructifs.

Pour le lot de pin, la norme NF B52-001-1 conduit à une légère surestimation pour certains éléments en raison de la variabilité des propriétés mécaniques, tandis que la norme norvégienne prNS3691 sous-estime majoritairement (96 % des cas) les classes en raison de critères stricts

sur les flaches et les attaques biologiques, entraînant un nombre important de rejets. Le classement machine réalisé par la XyloClass fournit une estimation légèrement supérieure à celle obtenue par les essais destructifs. Cette différence s'explique par le fait que le paramètre limitant pour la classification de ce lot est le fractile à 5 % de la résistance en flexion, une propriété que la XyloClass ne prend pas en compte.

L'analyse comparative montre que la norme NF B52-001-1 offre un classement sécuritaire, proche des résultats expérimentaux pour le bois sain, mais peut surestimer la résistance en présence de défauts internes non visibles, comme pour le lot de pin. La norme Norvégienne prNS3691 tend à sous-estimer les classes et entraîne un taux de rejet élevé en raison de critères stricts sur les flaches et les altérations biologiques. La XyloClass met en évidence les limites du classement visuel pour certains éléments présentant de faibles valeurs de masse volumique et de module d'élasticité, alors qu'ils avaient été classés entre C14 et C24 avec les méthodes visuelles. Cela souligne l'importance d'intégrer la masse volumique comme critère de classement pour éliminer les éléments potentiellement faibles et améliorer la fiabilité. Une méthode fiable pour le bois de réemploi devrait combiner les critères utilisés pour le bois neuf, l'évaluation des défauts liés à l'usage précédent, et la prise en compte de la masse volumique des éléments. Sur cette base nous avons développé une méthode de classement visuel intégrant la masse volumique comme critère initial : les éléments dont la masse volumique est inférieure à 350 kg/m³ à 12 % d'humidité sont automatiquement écartés. Ensuite, l'évaluation se déroule en deux étapes : (i) l'analyse des singularités naturelles selon la norme NF B52-001-1 (cernes, nœuds, poches de résine, entre-cœur, pente de fil), et (ii) la prise en compte des altérations liées à l'usage antérieur, sur la base de la norme norvégienne prNS3691, avec certains ajustements des critères (fentes, fissures, flèches, gauchissement, dommages mécaniques, galeries d'insectes, dégradations fongiques), en tenant compte de leur localisation, de leur taille et de leur impact mécanique. Les ajustements proposés incluent la définition de seuils précis pour l'évaluation des fentes et l'intégration des fissures de cœur, absentes de la norme norvégienne mais jugées significatives. Les critères liés aux déformations ont été conservés conformément à la norme NF B52-001, tandis que les exigences concernant les dommages mécaniques ont été assouplies en les rapportant aux dimensions globales de l'élément. Enfin, des seuils d'acceptabilité ont été introduits pour les galeries d'insectes et les attaques fongiques, afin de distinguer les altérations superficielles, souvent négligeables et sans influence sur le comportement mécanique, des dégradations réellement pénalisantes. Deux niveaux d'acceptabilité sont définis pour les défauts d'usage : mineurs (niveau 1, sans modification de la classe) et majeurs (niveau 2, entraînant une dégradation de la classe). La classe finale est déterminée à partir d'un tableau de correspondance proposant trois classes : R24, R18 et R14, la classe naturelle maximale étant définie par l'évaluation des défauts naturels.

L'application de cette méthode sur les lots testés montre une meilleure corrélation avec les résultats expérimentaux que la norme norvégienne prNS 3691-3, réduisant les cas de sous-classement tout en maintenant un niveau de sécurité acceptable. Certains éléments rétrogradés par la norme norvégienne, mais faiblement altérés, se voient ainsi attribuer une classe supérieure, en cohérence avec leur classe expérimentale. La méthode reste cependant plus restrictive pour des défauts majeurs localisés, comme des fentes longitudinales dépassant la moitié de la longueur de la pièce, entraînant un déclassement systématique.

Conclusion et perspective

Les essais destructifs de flexion réalisés dans cette étude montrent que le bois de réemploi peut conserver de bonnes propriétés mécaniques, comparables à celles du bois scié. Ces résultats

confirment l'intérêt de sa valorisation en structure, à condition qu'il soit correctement évalué et classé.

Tab. 1 : Répartition des éléments par classe de résistance selon les différentes méthodes de classement pour le lot d'Epecia (21 éléments)

Méthode de classement	Nombre des éléments par classe de résistance			
	Rejets	C14	C18	C24
NF B52-001-1	0	0	1	20
prNS 3691	0	2	12	7
Nouvelle méthode	0	0	6	12
Classe par machine du lot	C27			
Classe expérimentale du lot	C27			

Tab. 2 : Répartition des éléments par classe de résistance selon les différentes méthodes de classement pour le lot de Pin (27 éléments)

Méthode de classement	Nombre des éléments par classe de résistance			
	Rejets	C14	C18	C24
NF B52-001-1	2	3	15	7
prNS 3691	6	5	15	1
Nouvelle méthode	3	4	17	3
Classe par machine du lot	C27			
Classe expérimentale du lot	C27			

La méthode de classement visuel proposée, intégrant la masse volumique, les singularités naturelles et les défauts liés à l'usage antérieur, présente une meilleure corrélation avec les performances mécaniques mesurées que la norme norvégienne prNS 3691-3, tout en réduisant les cas de sous-classement injustifiés. Sa validation nécessite toutefois des applications sur un plus grand nombre d'éléments issus de chantiers variés et représentant une diversité d'essences. Des travaux sont en cours dans ce sens.

Par ailleurs, il serait pertinent de compléter les essais de flexion par des essais de cisaillement, le bois de réemploi présentant fréquemment des fentes longitudinales susceptibles d'affaiblir sa résistance au cisaillement, et donc d'influer sur sa classe de résistance.

Références

FCBA (2023) Gisement et devenir des déchets bois issus de la construction neuve, de la démolition et de la rénovation du bâtiment (GDBAT), Phase 1 : Devenir des déchets bois issus de la construction neuve, de la démolition et de la rénovation du bâtiment, Rapport final.

Ministère de la Transition écologique (2020) Réglementation Environnementale 2020 (RE2020).

European Commission (2020) A new circular economy action plan – for a cleaner and more competitive Europe.

NF-B52-001-1 (2018) Règles d'utilisation du bois dans la construction – Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés résineux et feuillus - Partie 1 : bois massif, Afnor.

prNS3691 (2023) Evaluation of recycled wood. Norwegian Standard.

Llana DF, Iniguez-Gonzalez G, Plos M, et al (2023) Grading of recovered Norway spruce (picea abies) timber for structural purposes, Construction and Building Materials, 398:132440.

Nocetti M, Aminti G, Vicario M, et al (2024) Mechanical properties of ancient wood structural elements assessed by visual and machine strength grading, Construction and Building Materials, 411:134418.