



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/25867>



This document is available under CC BY license

To cite this version :

Guillaume POT, Joffrey VIGUIER, DELIN JOREL SOH MBOU, Benoît BESSEAU, Thibault CHASTAGNIER, Jean-Denis LANVIN, Didier REULING - Transformation et Classement éco-Efficients des Qualités Secondaires de chêne pour leur valorisation en bois d'œuvre - 2024

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



PROJET TreCEffiQuaS

Nov
2024

Transformation et Classement éco-Efficents
des Qualités Secondaires de chêne pour leur
valorisation en bois d'œuvre

1. Contexte et objectifs du Projet

Les arbres feuillus représentent 63 % du volume de bois sur pied en France métropolitaine, mais ils représentent seulement 27 % du volume de bois d'œuvre récolté (FCBA 2023). Une ressource importante d'arbres feuillus est vue comme de faible qualité et/ou trop compliquée à transformer, elle est délaissée ou destinée à des usages de moindre valeur ajoutée. Plutôt que de broyer directement des feuillus de qualité secondaire pour en faire du bois énergie ou du bois d'industrie, il pourrait être intéressant qu'une portion de ces bois soit transformée en bois de construction, à plus forte valeur ajoutée, et pour lequel l'aspect esthétique est moins contraignant qu'en ameublement ou en agencement.

Selon une étude prospective sur la demande du bois dans la construction de 2019, (Bureau d'Informations et de Prévisions Economiques et FCBA 2019), la France produit moins de 30 % des produits collés qu'elle consomme (carrelets, bois lamellé-collé - BLC, cross laminated timber - CLT, bois massif abouté). Or, ces produits techniques bois répondent à une demande croissante (le marché mondial du CLT, par exemple, devrait doubler entre 2018 et 2025 (QY Research 2019). Ces matériaux ont pour avantage de proposer de grandes dimensions, d'être plus stables vis-à-vis des variations d'humidité, d'avoir un aspect esthétique et des propriétés mécaniques maîtrisés, bref, d'être adaptés aux besoins modernes en matériaux demandés par les architectes et par les consommateurs. La production de produits collés à partir de feuillus constituerait donc bien une réponse à une demande, avec une ressource disponible en France. Toujours selon le Bureau d'Informations et de Prévisions Economiques et FCBA (2019), « *le coût est aujourd'hui le principal frein à l'utilisation du feuillu en structure, en raison d'un prix de la matière première et de coûts de transformation plus élevés comparés aux essences résineuses* ». On ajoutera le fait que les normes européennes actuelles pour les produits bois de structure collés encadrent exclusivement l'usage de bois résineux, ce qui complique l'accès aux marchés pour les produits à base de feuillus. Les procédés et normes développés pour les produits résineux (EN 14080:2013 entre autres) ne peuvent pas être transposés directement pour les feuillus car ils conduisent à une sous-estimation des caractéristiques mécaniques, de trop faibles rendements matière et/ou un coût de production trop élevé. L'absence de normes concernant les produits à base de feuillus constitue finalement une opportunité dont veut se saisir ce projet TreCEffiQuaS, dans le but de produire des connaissances nécessaires à l'élaboration d'un contexte normatif adapté aux futurs produits bois collés en feuillus français mis sur le marché européen. Plus généralement, l'objectif est de mener à bien une recherche industrielle apportant les connaissances nécessaires à l'amélioration des procédés de transformation des bois feuillus et du chêne (sessile et pédonculé) en particulier (qui est l'essence la plus présente avec 41 % du volume de feuillus sur pied).

A l'heure actuelle, les différents tris effectués tout au long du procédé sont très défavorables économiquement parlant pour les feuillus par rapport aux résineux, en raison du rendement matière plus faible et d'une moindre automatisation. Ceci limite considérablement la compétitivité des produits à base de feuillus. Selon une étude FCBA (2017), le coût de fabrication de BLC en chêne est actuellement 2,8 fois supérieur au coût du même produit en épicea. Actuellement, la filière bois feuillus et chêne en particulier repose sur une utilisation des différents compartiments de l'arbre représentée en Figure 1. Des arbres de diamètre conséquent (environ 50 cm ou plus) sont abattus et tronçonnés en différentes parties : la bille de pied présente les meilleures qualités, la surbille une qualité de deuxième choix, celle actuellement utilisée pour les applications type construction qui intéresse ce projet, puis enfin les parties supérieures utilisées en bois énergie ou bois d'industrie. Cette représentation reste schématique, et, selon les arbres, certains peuvent ne pas contenir de premier choix, ni même de second choix. S'ils sont de trop faible diamètre, d'une mauvaise rectitude, trop courts, etc., des arbres ou des parties d'arbres peuvent être directement broyées pour être transformés en bois énergie ou bois d'industrie.

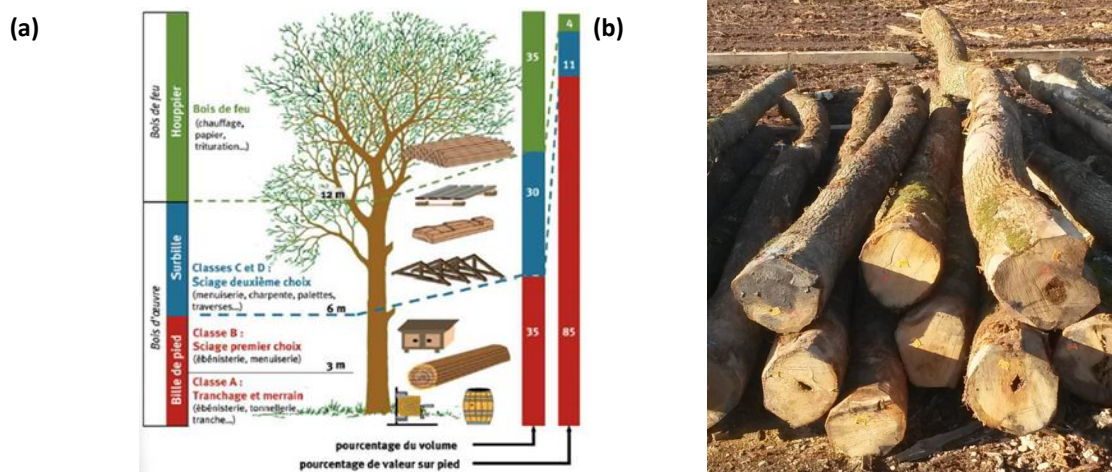


Figure 1 : (a) Utilisation classique des chênes de première qualité (Lemaire 2010) ; (b) Photographie de chênes représentatifs de la ressource visée pour ce projet.

La forte demande en chêne de premier choix a été à l'origine de récentes tensions sur le prix du chêne, se répercutant sur les prix du deuxième choix. Le projet TreCEffiQuaS avait pour objectif de rendre économiquement faisable la transformation des qualités les plus faibles (faible longueur, faible diamètre, flexuosité, hétérogénéité des qualités, ...), dont le prix d'achat est toujours bas, en bois de structure pour lequel l'aspect esthétique importe moins.

Une fois secs, les bois sciés destinés à la construction doivent être classés pour garantir leurs caractéristiques mécaniques selon la norme EN 14081-1+A1 (2019). Si cette norme permet bien de classer les sciages feuillus, la méthode utilisée en pratique, un classement visuel par des opérateurs, ne présente pas un assez bon rendement matière pour être viable (FCBA 2007 ; Lanvin et Reuling 2012). C'est donc une source de perte de rendement matière majeure pour les feuillus. Cependant, le LaBoMaP a élaboré une machine de classement basée sur la mesure de l'orientation des fibres spécifique au cas du chêne au cours d'un post-doctorat et d'une thèse financés par la région Bourgogne et l'Institut Carnot ARTS de 2014 à 2017. Un des objectifs du projet est de valider cette technique sur des sciages représentatifs de la ressource en chêne de qualité secondaire, en plusieurs sections et sous sollicitation de traction plus utile à l'utilisation des lamelles pour le BLC et/ou le CLT. Les données nécessaires aux réglages du modèle et sa calibration en adéquation avec la ressource de chêne de qualité secondaire n'ont à ce jour jamais été recueillies.

Les étapes de seconde transformation (bois sec) qui suivent le classement sont normalisées uniquement pour les résineux (EN 14080 (2013) pour le BLC et NF EN 16351 (2021) pour le CLT). Il s'agit d'une phase de tronçonnage pour éliminer les défauts dans les zones d'aboutage, puis d'aboutage des tronçons toutes longueurs, appelés courçons, pour obtenir des lamelles de grande longueur, suivie d'une phase de rabotage pour calibrer les lamelles. Pour les feuillus, étant données les longueurs de billons plus courtes, les déformations au séchage plus grandes et les nœuds plus gros, les éléments à assembler pour fabriquer les lamelles sont inévitablement plus courts (dépassant rarement 1 m de longueur), moins épais (environ 20 mm) et moins large (100 mm environ) que dans le cas des résineux. De ce fait, les lamelles aboutées de bois feuillus se retrouvent composées de nombreux petits éléments dans la longueur, et peuvent nécessiter aussi un assemblage dans la largeur (collage sur les chants appelé panneautage). Cette caractéristique peut être critique car les aboutages constituent autant de points potentiellement faibles durant les tests mécaniques de poutres de BLC. Il est d'ailleurs demandé dans les normes que la résistance dans les zones d'aboutage soit supérieure à celle de la classe de bois employée. Pour respecter cette résistance minimum des aboutages, les normes de bois résineux imposent le respect d'une distance entre un nœud et l'aboutage de trois fois le diamètre du nœud. Ce critère est inapplicable au feuillu qui possède des nœuds très gros. Proposer un critère adapté aux feuillus pour garantir la résistance des aboutages constituera une contribution forte de ce projet aux travaux normatifs sur les futures normes de BLC ou CLT feuillus.

Le principal objectif de ce projet est de proposer des solutions permettant la valorisation du chêne de basse qualité, dite qualité secondaire, dont le seul débouché actuel est le bois énergie ou bois d'industrie, en maximisant sa transformation en bois d'œuvre pour la construction. Le projet explore deux axes nécessaires pour que cette nouvelle voie de valorisation soit normativement possible et économiquement viable : (1) le développement de méthodes pour garantir la résistance de ces bois par une méthode non-destructive rapide et efficace ; et (2) la recherche de procédés de transformation permettant de maximiser le rendement matière tout en étant abordables pour les PME françaises.

2. Principaux résultats obtenus

2.1. Mesure et modélisation des déformations de séchage

L'objectif principal de cette partie portait sur la prédiction de la déformation des sciages lors de leur séchage en intégrant l'orientation des fibres locales dans des modèles hygro-mécaniques. L'échantillonnage comprenait 19 avivés de chêne, dont l'orientation des fibres locale ainsi que la déformation initiale des sciages ont été mesurés juste après le sciage. Les sciages ont ensuite été séchés à une humidité cible de 10% et les déformations résultant du séchage, ont été mesurées. Un modèle éléments finis (EF) a été utilisé pour simuler ces déformations à partir de la seule information d'orientation des fibres locales. Malgré la simplicité de la modélisation, les résultats montrent que le modèle a bien estimé l'amplitude des déformations, avec des écarts acceptables entre les déformations prédites et réelles, et une erreur moyenne de 3,1 mm. Ces résultats sont encourageants et incitent à poursuivre la modélisation, avec des propositions pour des développements futurs, notamment la modélisation en trois dimensions. Les résultats de ces travaux ont été diffusés à travers une communication dans une conférence nationale, la soutenance de thèse de Benoît Besseau, et un article en cours de review. Ces travaux restent une preuve de concept nécessitant plus de développements pour envisager un transfert vers une application industrielle. La poursuite de la recherche en ce sens est prévue au LaBoMaP

2.2. Constitution d'une base de données de référence

2.2.1. Echantillonnage

Une des tâches importantes du projet consistait en l'établissement d'un échantillon de sciages devant répondre aux exigences de la norme EN 14081-1+A1 (2019) et refléter la variabilité de la ressource en bois de qualité secondaire. La sélection des arbres et leur exploitation a été réalisée par l'équipe d'exploitation forestière de Ducerf. Des chênes sessiles et pédonculés provenant de quatre régions françaises différentes ont été sélectionnés pour un total de 122 billons représentant environ 80 m³. Ces billons ont ensuite été transformés en plateaux de différentes épaisseurs puis séchés. Ces plateaux ont été transformés en sciages répartis en différentes sections, représentatives des sections réalisables dans des bois de qualité secondaire. Enfin, les avivés ont été rabotés aux dimensions finies. Une attention particulière a été portée sur la traçabilité depuis le billon jusqu'au sciage, avec plus de 2 000 sciages collectés. Enfin, parmi les 2 030 sciages obtenus, 1 071 ont été dédiés aux essais de traction (échantillonnage principal), sélectionnés pour représenter toutes les sections, régions et billons de manière représentative. L'autre partie des sciages (échantillonnage secondaire) a pu être dédié à la confection de lamelles aboutées et à la possible réalisation d'essais de flexion complémentaires.

2.2.2. Contrôles non-destructifs

Une campagne de caractérisation non-destructive réalisée sur l'ensemble des 2 030 sciages a été réalisée. Le LaBoMaP est équipé d'un scanner industriel permettant de mesurer l'orientation des fibres sur les quatre faces des sciages à haute résolution. Cette mesure est effectuée par la projection d'un faisceau de lasers points perpendiculairement à la surface des sciages, formant des tâches lumineuses dont la direction principale correspond à celle des fibres locales. Un exemple de cette mesure sur un sciage de chêne est présenté sur la Figure 2. Le scanner fournit aussi des images en couleur, en noir et blanc, et des cartographies rayons X permettant la mesure de la masse volumique locale des sciages.

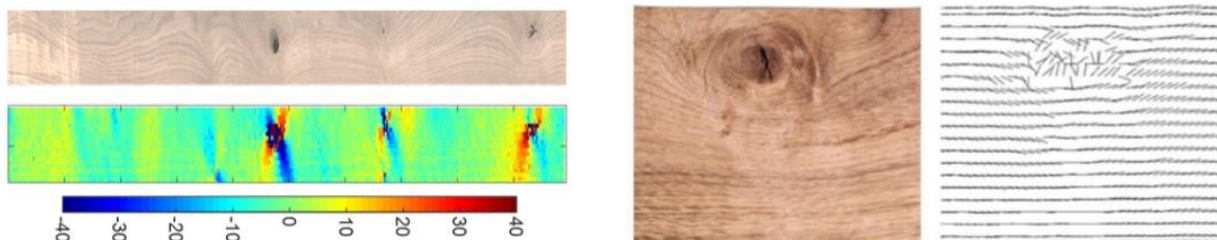


Figure 2 : Exemples de mesure de l'orientation des fibres locales sur un sciage de chêne

En complément du scanner, un appareil de mesure du module élastique dynamique a été utilisé. Cet appareil, composé d'un marteau et d'un vibromètre laser, permet de mesurer le module d'élasticité global d'un sciage de manière non-destructive. Des contrôles manuels ont également été réalisés sur chaque sciage, incluant la mesure des dimensions, la pesée, la mesure des diamètres des nœuds, l'identification du mode de débit, et le relevé de la position radiale des sciages dans l'arbre.

A l'issus du comité de pilotage élargi, il a été décidé d'impliquer les deux principaux fabricants européens de scanners, Luxscan et Microtec, dans le projet pour faciliter et accélérer la possible mise en application industrielle des résultats du projet. Les 1 071 sciages de l'échantillonnage principal testés en traction ont donc également été caractérisés de manière non-destructive par les machines industrielles de ces deux entreprises.

Une large campagne non-destructive a aussi été réalisée sur les courçons prélevés dans les sciages dédiés à la production de lamelles aboutées, cette campagne sera détaillée dans la suite de cette synthèse.

2.2.3. Caractérisation destructive

La caractérisation destructive des sciages a été réalisée au laboratoire d'essais mécaniques de l'institut technologique FCBA habilité à réaliser des essais certifiés au niveau européen (ISO 17025), ce qui assure la fiabilité des valeurs mesurées pour une homologation de machine de classement. Un total de 1 071 sciages a été testé en traction conformément à la norme EN 408 (2012), avec une longueur entre mors égale à neuf fois la largeur des sciages. Les essais ont permis de déterminer le module d'élasticité et la contrainte à rupture en traction, nécessaires pour l'établissement des modèles de prédiction. La masse volumique et l'humidité moyenne des sciages ont également été mesurées. Seuls les essais présentant une rupture dans la partie centrale ont été retenus, soit un total de 924 résultats.

Pour les lamelles aboutées, 183 aboutages de section 19,5 x 69,5 mm² et 191 de section 19,5 x 100 mm² ont été testés en traction, conformément à l'EN 408+A1 (2012). Les essais ont permis la mesure de la résistance et du mode de rupture. Pour les 29 lamelles aboutées-panneautées (LAP), des essais de traction ont également été réalisés. Les courçons ont été testés avec une distance entre mors de 2,4 m pour maximiser la longueur hors mors et mieux appréhender le comportement mécanique de ces lamelles en condition d'usage.

2.2.4. Valorisation de la base de données

L'ensemble de la base de données est disponible sur la plateforme recherche.data.gouv.fr (Pot et al. 2023). Un data paper viendra en accompagnement afin de permettre sa diffusion dans des conditions optimales à la communauté scientifique. Cette base de données regroupe toutes les informations nécessaires pour établir des modèles de comportement mécanique afin de préparer l'homologation de machines de classement pour la résistance des deux principaux fabricants de scanner en Europe.

2.3. Classement pour la résistance du chêne de qualité secondaire

2.3.1. Définition de classes de traction feuillus

Les classes de résistance en traction n'existent pas dans les normes européennes pour les bois feuillus. Sur la base des données acquises dans le cadre du présent projet, il est proposé l'établissement de classes de résistance en traction adaptées aux feuillus de qualité secondaire, nommées DT9, DT11, DT14, et DT18. Les classes de traction feuillus « DT » proposées effacent le traitement défavorable donné aux feuillus dans l'EN 338 (2016) par rapport aux résineux vis-à-vis du module élastique. Ces classes pourraient être intégrées dans la future norme de BLC feuillu, comme cela a été fait pour les résineux.

2.3.2. Qualité mécanique de l'échantillonnage principal

Le classement optimal destructif obtenu après rupture des planches en flexion sur les bois issus de la campagne de qualification du chêne français (campagne de qualification du chêne en France rapport final Convention DGFAR n°61.45.80.29/02) et le classement optimal destructif des planches en traction de ce projet a pu être comparé. Ainsi, 96 % des planches de l'étude précédente pouvaient être utilisés en structure contre 86% pour l'échantillonnage TreCEffiQuaS. De plus, les valeurs obtenues pour les modules d'élasticité dans l'échantillonnage TreCEffiQuaS sont nettement plus faibles que celles de l'étude précédente, avec une différence d'environ 30 % pour la classe D30. Cela souligne la qualité inférieure du lot de sciages de chêne de qualité secondaire utilisé dans cette étude par rapport à la typologie de bois habituellement transformée en scierie.

La traçabilité depuis l'arbre jusqu'au sciage a permis de montrer que les propriétés mécaniques étaient meilleures dans les arbres de petits diamètres. Ainsi, lorsque l'objectif est de produire du bois à usage structurel dans les plus hautes classes de résistance, il semble intéressant de prioriser la transformation de bois de plus petits diamètres qui présentent un module élastique plus important que les sciages issus de bois de plus grand diamètre.

Les relations entre les différentes grandeurs physico-mécaniques du lot étudié révèlent que la masse volumique a une corrélation très faible avec le module élastique et la résistance à la traction. Le module élastique dynamique présente également une faible corrélation avec le module élastique en traction et la résistance à la traction, indiquant que les machines vibratoires ne sont pas efficaces pour classer les sciages de chêne de qualité secondaire. Ces résultats montrent la nécessité d'utiliser des méthodes permettant de prendre en compte localement les défauts présents dans le bois de qualité secondaire.

2.3.3. Evaluation de la pertinence du classement visuel

Il est possible d'estimer le potentiel mécanique de chaque avivé selon une méthode de tri visuel, pour le chêne français, les classes de résistance déterminées par méthode visuelle sont au nombre de trois : D30, D24, et D18, chacune correspondant à des valeurs spécifiques de résistance mécanique et de module d'élasticité. La norme NF B 52 001-1 s'applique aux sections d'au moins 2 200 mm², dont l'une des dimensions doit être supérieure ou égale à 22 mm. L'application de ces règles de tri sur l'échantillonnage testé a révélé que les valeurs de résistance en traction obtenues sont inférieures aux exigences de la norme. Par exemple, pour la classe D30, la résistance en traction obtenue est de 15,0 MPa, contre 18 MPa exigés. Pour les classes D24 et D18, les écarts sont encore plus significatifs, avec des résistances en traction de 11,1 MPa et 5,2 MPa respectivement, contre 14 MPa et 11 MPa exigés. Ces résultats suggèrent que l'application de la norme de classement visuel n'est pas adaptée et ne doit pas être utilisée pour garantir une résistance à la traction pour des classes supérieures à D18. En effet, en considérant que la ressource de bois secondaire permet uniquement l'accès à une seule classe visuelle (D18), les valeurs physico-mécaniques peuvent être vérifiées pour cette classe sur l'échantillonnage TreCeffiQuaS. Ainsi, 52,5 % des pièces testées sont classées en D18, avec une résistance en traction de 11 MPa, un module d'élasticité de 11 000 MPa, et une masse volumique de 624 kg/m³.

2.3.4. Classement par machine

Le classement par machine repose sur l'utilisation de machines permettant de prédire les propriétés mécaniques des sciages, en particulier leur rigidité et leur résistance à la traction. L'objectif est de fournir des propriétés indicatrices fortement corrélées avec les propriétés mécaniques à garantir, permettant ainsi de régler une machine de classement pour la résistance mécanique. Le réglage de la machine consiste à trouver des seuils sur les propriétés indicatrices de telle manière que le lot de sciage constitué des pièces présentant des valeurs supérieures à ces seuils présente des valeurs caractéristiques des propriétés d'attribution à une classe supérieures à celles préconisées dans les classes considérées. Un des objectifs principaux du présent projet était de valider une technique de classement pour la résistance des sciages de chêne, basée sur la mesure de l'orientation des fibres. Cette technique repose sur des travaux antérieurs ayant démontré leur efficacité pour des sollicitations de flexion sur des échantillons de faibles dimensions.

Le modèle utilise les mesures locales de l'orientation des fibres pour calculer des profils unidimensionnels de rigidité le long des sciages. Les angles mesurés à partir des images de diffusion elliptiques des lasers sont interpolés pour "remplir" l'intérieur des sciages. Deux propriétés indicatrices sont enfin calculées à partir des profils unidimensionnels de rigidité : $E_{a,app,90,BT,min}$ qui est corrélée à la résistance en traction, prise comme le minimum du profil de rigidité dans la portion de la planche située entre les mors lors de l'essai de traction et $E_{a,l,BT}$, corrélée au module élastique, calculée avec le déplacement sur la zone centrale de l'échantillon sur une distance de 5 fois la hauteur comme lors de l'essai destructif. Un exemple de mesure de l'orientation des fibres ainsi qu'une illustration d'un profil de rigidité calculé sur une planche de chêne sont présentés sur la Figure 3.

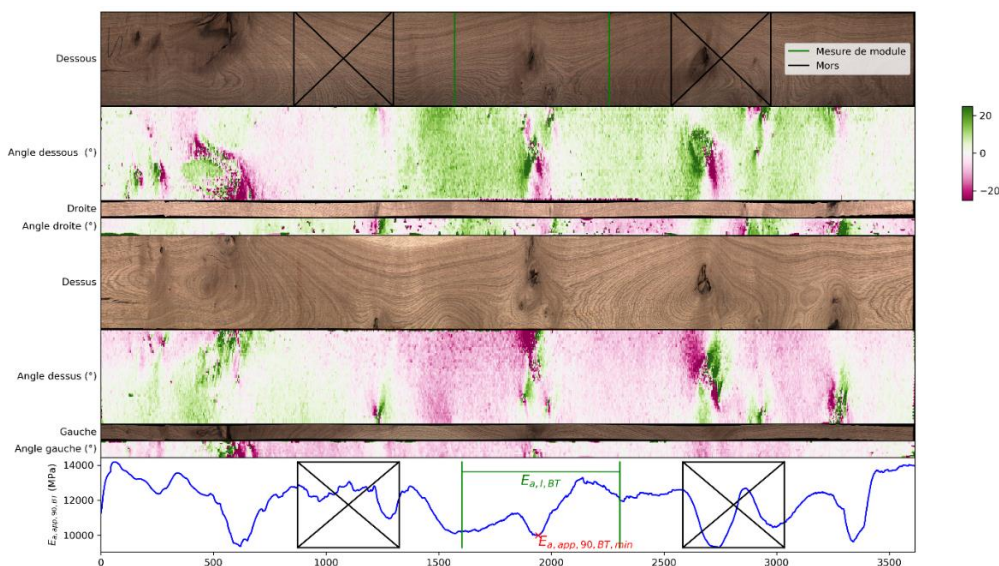


Figure 3 : Illustration des mesures d'orientation des fibres sur les 4 faces d'un sciage et leur utilisation pour le calcul de deux propriétés indicatrices. De haut en bas : photographie couleur de la face du dessus d'un sciage ou sont représentés par deux croix noires la position des mors de traction lors de l'essai destructif, la mesure de l'orientation des fibres associée, puis les trois autres faces et leur cartographie d'orientation des fibres associés et enfin le profil de rigidité obtenue sur la base de ces mesures. Enfin sur ce profil sont aussi représentés les deux différentes propriétés indicatrices utilisées pour le classement par machine.

La qualité de la prédiction des propriétés d'attribution à une classe (masse volumique, module élastique et résistance à la traction) est évaluée par le coefficient de détermination R^2 . Les résultats montrent que le modèle basé sur la mesure de l'orientation des fibres possède un R^2 de 0,45 pour le module élastique et de 0,49 pour la résistance à la traction. Ces valeurs sont comparables à celles trouvées dans la littérature pour d'autres essences ou d'autres types de sollicitation et permettent de procéder au réglage d'une machine de classement.

Les rendements de classement pour les combinaisons de classe les plus pertinentes en termes de rendement matière et d'usage des sciages à usage structural pour le chêne de qualité secondaire sont présentés sur la Figure 4. Les rendements de classement obtenus montrent que le classement machine permet l'obtention d'un rendement de 82,9 % pour la combinaison DT11/Rejet qui est à comparer avec un rendement de 52,5 % en utilisant le classement visuel. Pour des classes de résistance plus élevées, nous avons vu précédemment que le classement visuel ne pouvait tout simplement pas garantir des résistances caractéristiques à la traction suffisantes. La solution machine apparaît donc plus que jamais nécessaire. Il faut cependant noter que les rendements diminuent à mesure que la qualité des classes visées augmente, avec un taux de rejet plus important pour les classes de résistance plus élevées.

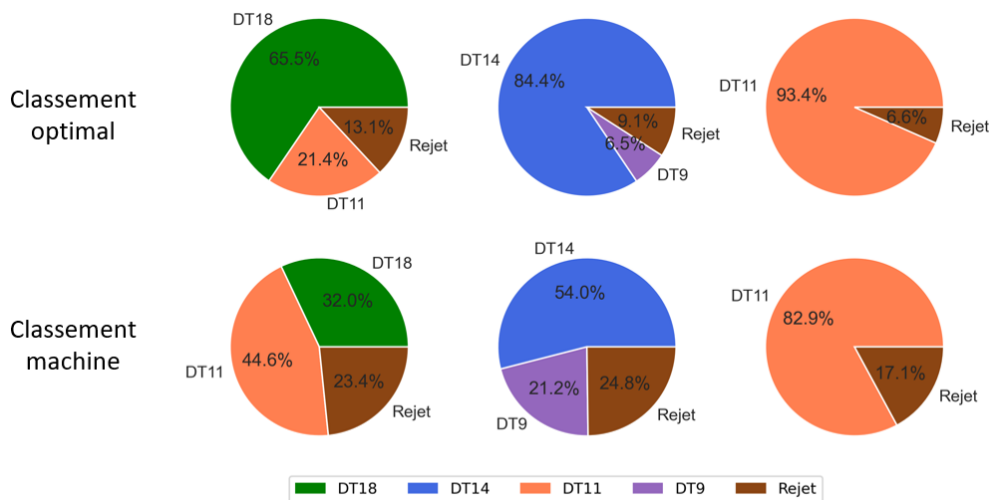


Figure 4 : Rendements de classement obtenus pour différentes combinaisons de classes. En haut, en utilisant les mesures destructives pour simuler une machine parfaite (classement optimal), en bas, à l'aide du modèle basé sur la mesure de l'orientation des fibres.

2.4. Tronçonnage optimisé pour la transformation du chêne de qualité secondaire

2.4.1. Production de lamelles aboutées : résistance des aboutages et rendements matière

Un algorithme de tronçonnage pour garantir la résistance mécanique des aboutages de lamelles de bois a été développé. Dans le cadre normatif actuel, les critères d'aboutage sont visuels, excluant les nœuds ou les perturbations des fibres dans les zones d'assemblage. Toutefois, ces critères ne quantifient pas précisément ce qui constitue une « perturbation prononcée », rendant difficile l'évaluation mécanique précise des assemblages. L'approche innovante de cette étude consiste à utiliser la mesure de l'orientation des fibres (ODF) pour définir de manière plus rigoureuse les zones de tronçonnage, assurant la résistance des aboutages sans nécessiter des distances précises aux nœuds, contrairement aux critères visuels actuels. Un schéma de principe de la méthode est présenté sur la Figure 5.

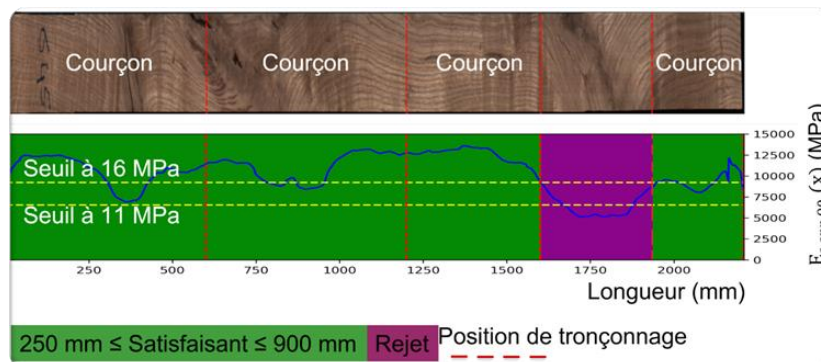


Figure 5 : Exemple d'application de l'algorithme de tronçonnage pour une classe de résistance T11. En vert les pièces conservées et en violet les pièces rejetées.

Deux classes de résistance en traction ont été évaluées : DT11, avec une résistance à la traction de 11 MPa pour le bois et de 16 MPa pour l'aboutage, et DT14, atteignant 14 MPa dans le bois et 19 MPa pour l'aboutage. L'algorithme développé permet de positionner le tronçonnage selon les seuils définis à l'aide de la calibration du modèle de classement basé sur l'orientation des fibres précédemment présenté. Ces positions de tronçonnage garantissent alors que les sections aboutées répondent aux critères de résistance tout en maximisant le rendement matière. La longueur des pièces obtenues est contrôlée entre 250 et 900 mm, en accord avec les exigences industrielles pour l'aboutage de bois courts. L'étude révèle des résultats prometteurs pour les classes DT11 et DT14, les aboutages en classe DT11 présentent une résistance caractéristique de 15,6 MPa, légèrement en dessous du seuil requis de 16 MPa, tandis que la classe DT14 dépasse le seuil avec une résistance caractéristique de 19,4 MPa. En classe DT9, le rendement matière atteint 77 %, tandis que pour DT11 et DT14, les rendements décroissent à 68 % et 44 % respectivement, en raison des exigences de résistance plus élevées.

2.4.2. Comportement mécanique de lamelles aboutées-panneautées constituées de petits courçons de chêne de qualité secondaire

Comme les bois feuillus sont sciés en petites dimensions pour optimiser le rendement matière et le rendement économique, les lamelles de chêne sont constituées d'éléments plus petits que pour les bois résineux. Cette différence entraîne une plus grande hétérogénéité des lamelles, en particulier une opération de panneautage est nécessaire pour obtenir des lamelles de plus grande largeur. En effet, sans cette opération, les lamelles aboutées-panneautées à base de chêne seraient cantonnées à de faibles largeurs de l'ordre de 100 mm, l'utilisation de sciages de 175 ou 200 mm comme pour le résineux étant économiquement inenvisageable. Le comportement de ce type de produit n'a cependant jamais été vraiment étudié dans la littérature, cette étude tâche donc de le faire. De plus, des solutions de tri des éléments constituant les lamelles ont été explorées pour tenter de réduire leur hétérogénéité.

Les courçons nécessaires à la fabrication des lamelles aboutées-panneautées ont été obtenus selon le procédé de tronçonnage décrit précédemment, assurant résistance du bois et des aboutages pour une classe T14 et une section nominale de 21x105 mm². Pour chaque courçon obtenu, des mesures non destructives ont été effectuées, notamment la mesure de la masse volumique et du module élastique moyen par une méthode vibratoire. Les courçons ont ensuite été répartis en trois lots : un lot de faibles modules élastiques, un lot de modules élastiques élevés et un lot de modules aléatoirement répartis. L'équivalent de 60 m de courçons ont été sélectionnés pour chaque configuration, dans l'objectif d'obtenir 10 lamelles aboutées-panneautées doubles de 3 m pour chaque configuration. Les différentes étapes de fabrication ont été réalisés par le groupe Ducerf dans des conditions industrielles. Une traçabilité complète et exhaustive de la position et du sens de chaque courçon dans les lamelles a été réalisé. Ces lamelles ont ensuite été testées en traction, et un système de stéréo-corrélation d'images (digital image correlation - DIC) a été mis en place pour mesurer les champs de déplacement et de déformation et déterminer le module élastique statique.

Le Tableau 1 présente les propriétés mécaniques des lamelles aboutées panneautées en fonction des propriétés des courçons les constituant. Les modules élastiques moyens des lamelles, $E_{0,l,mean}$ sont sensiblement équivalents aux modules élastiques des courçons les constituant, $E_{0,elem,dyn,mean}$. Il apparait ainsi que le tri des courçons par une machine vibratoire longitudinale permet bien de maîtriser le module élastique des lamelles aboutées-panneautées produites à partir de ces courçons. Le comportement en termes de résistance à la traction calculée selon l'EN 14358 (2016), $f_{t,0,l,k}$, est nettement plus inhabituel. En effet, les lamelles constituées de courçons choisis aléatoirement présentent une résistance caractéristique de 11,3 MPa, soit moins que 14 MPa, la valeur cible pour lesquels ils avaient été tronçonnés. En revanche, si l'on considère les lamelles constituées de courçons triés selon leur module pour réduire les hétérogénéités, les valeurs de résistance caractéristiques sont beaucoup plus élevées, 17,7 MPa pour les lamelles « faibles » et 20,2 MPa pour les lamelles « fortes ».

Lot	Courçons		Lamelles				Classe de résistance équivalente
	Nombre	$E_{0,elem,dyn,mean}$ [GPa]	Nombre	$E_{0,l,mean}$ [GPa]	$f_{t,0,l,mean}$ [MPa]	$f_{t,0,l,k}$ [MPa]	
Aléatoire	160	12.5	12	11.8	16.2	11.3	DT11
Faible	96	10.6	8	9.77	21.5	17.7	DT11
Fort	109	14.5	9	13.1	26.3	20.2	DT18

Tableau 1 : Propriétés mécaniques des lamelles aboutées panneautées en fonction des courçons les constituant.

Pour conclure sur les conséquences de ces résultats expérimentaux, malgré des courçons transformés pour assurer une classe de résistance DT14, les lamelles aboutées-panneautées doubles ne permettent pas d'atteindre une classe DT14 (seulement DT11) si tous ces courçons sont assemblés sans tri préalable. Au contraire, une homogénéisation des modules élastiques des courçons grâce à un tri réalisé par machine vibratoire longitudinale permet d'atteindre des résistances bien

supérieures à ce qui est requis pour la classe DT14. Le tri proposé ici permet d'atteindre une classe DT18 pour les lamelles constituées de courçons de modules fort, mais pour les lamelles constituées de courçons de modules faibles, le module élastique moyen devient le facteur limitant malgré une bonne résistance et ne permet qu'une classe DT11. Etant donné le faible nombre de lamelles testées, ces conclusions ne sont pas à prendre avec exactitude quantitativement parlant, mais la tendance est très nette : il existe un risque d'obtenir des résistances trop faibles à produire des lamelles panneautées si leur hétérogénéité de module élastique n'est pas maîtrisée. Le niveau d'hétérogénéité acceptable reste encore à définir plus précisément par des études et modélisations complémentaires. Ce mode de production étant typique du feuillu, cet aspect pourrait être intégré aux futures normes BLC feuillus.

3. Conclusions / Perspectives

3.1. Conclusions

La complémentarité des trois partenaires du consortium a permis de relever tous les objectifs principaux du projet. Il est utile de rappeler qu'avant le début du projet TreCeffiQuaS, pour utiliser du chêne en produit structurel, les seuls éléments à disposition étaient la norme de classement des sciages basée sur des critères visuels et sur des essais de flexion. Or, ce classement visuel par un opérateur est relativement inefficace pour le chêne, et les produits collés type BLC et CLT se réfèrent aux propriétés de traction pour leur constitution.

Le projet TreCeffiQuaS a tout d'abord permis de constituer une base de données de mesures destructives en traction et non-destructives (vibratoire et scan d'orientation des fibres) sur un échantillonnage représentatif du chêne de qualité secondaire français, c'est-à-dire de chêne issu de billons de qualité C ou D, scié directement sans autre précaution ou tri. Cette base de données est disponible sur la plateforme de données ouvertes du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche.

Ces données expérimentales ont permis :

- De confirmer que le chêne de qualité secondaire possède bien des propriétés mécaniques suffisantes pour un usage structurel dans la construction, puisque selon les combinaisons de classes, 86 % à 93,4 % des pièces testées ont pu être classées sur la base des essais destructifs (classement optimal). Ceci confirme aussi que l'enjeu est bien d'arriver à réaliser ce classement de manière non-destructive.
- De proposer des classes de résistance sous sollicitation de traction, actuellement inexistantes, adaptées au chêne de qualité secondaire, équivalentes ou avantageuses par rapport aux classes de traction des résineux.
- De remarquer que l'application du classement visuel de la norme NF B52 001-01 défini selon des essais de flexion ne permettait pas de garantir les propriétés de résistance en traction correspondantes selon l'EN 338. Celui-ci pourrait être adapté pour un classement à une classe DT11 / rejet.
- De montrer qu'un algorithme de classement par machine, basé sur les données d'un scanner d'orientation des fibres était très efficace, classant par exemple 82,9 % des pièces en DT11 là où le classement visuel n'en classerait que 52,5 %, pour un maximum théorique de 93,4 %.
- De proposer des combinaisons de classe optimisant les rendements pour cette ressource lors du classement machine, adaptées à la production de BLC ou CLT : DT18/DT11/rejet, DT14/DT9/ rejet, DT11/rejet.
- De remarquer que les bois de chêne de petits diamètres (< 50 cm) présentaient statistiquement de meilleures propriétés mécaniques, ouvrant une possible voie supplémentaire d'augmentation des rendements ou de plus hautes performances.

Le projet TreCeffiQuaS s'est aussi attaché à mener une réflexion globale sur la transformation optimisée du chêne de qualité secondaire.

- Premièrement, il a été montré qu'il était possible de modéliser convenablement les déformations des planches sciées lors de leur séchage uniquement à partir des mesures d'orientation des fibres, ce qui peut ouvrir la voie à des optimisations lors du tronçonnage pour limiter ces déformations. Ces travaux très originaux nécessiteraient cependant plus de développements pour envisager un transfert vers une application industrielle.
- Grâce au modèle mécanique du classement des sciages, un algorithme de tronçonnage a été proposé pour purger les pièces de leurs points les plus faibles, tout en garantissant la résistance des aboutages. Il permet d'optimiser le rendement matière tout en s'affranchissant de la méthode visuelle usuelle de la norme, qui est coûteuse, difficile à mettre en œuvre et incertaine pour le feuillu. Il conviendrait que dans les normes une valeur d'angle de fibre à

respecter soit clairement définie et que son mode de calcul et sa mesure par les scanners modernes soit décrite, en s'appuyant entre autres sur les résultats de cette étude.

- Des résultats originaux sur l'impact des nombreux aboutages et du collage sur chant (panneautage pour obtenir des lamelles de plus grande largeur sur le comportement mécanique des lamelles ont été montrés. Les résultats pourront être utiles à l'élaboration des futures normes de produits feuillus.

3.2. Perspectives

Premièrement, il convient d'homologuer des machines de classement basées sur la mesure de l'ODF selon les règles de l'EN 14081-2+A1 (2022). Ceci est la responsabilité des fabricants de scanners, avec le contrôle de FCBA. Impliqués dès le début du projet, ils ont pu scanner les mêmes lots de planches et n'ont plus qu'à appliquer la méthodologie développée par le LaBoMaP (ou toute autre méthode s'ils le souhaitent), et valider les tests de répétabilité (décrits dans l'EN 14081-2+A1 2022). Le LaBoMaP pourra les accompagner dans cette démarche.

Si une méthode permettant de tronçonner les sciages de chêne pour obtenir des courçons aboutables suffisamment résistants pour des applications structurelles a bien été développée avec succès, dans un contexte industriel réel, pour des raisons économiques, les plus beaux courçons seront orientés vers des applications esthétiques à plus haute valeur ajoutée (agencement notamment). Cette problématique de devoir réaliser un tri à la fois esthétique et mécanique n'existe pas dans le cadre normatif actuel, établi pour les bois résineux qui présentent peu ou pas de différence de prix entre les qualités structurelles et non structurelles alors qu'elle est extrême pour le chêne qui possède une échelle de prix très grande par qualité. Pour ces raisons économiques, il semble bien que la problématique du bois de structure en chêne soit indissociable du bois non-structurel à plus forte valeur. C'est ici que se situe une autre difficulté des feuillus avec le contexte normatif actuel élaboré pour les bois résineux de construction : normalement une machine de classement fournit des propriétés indicatrices de la résistance, du module élastique et de la masse volumique, mais il n'est pas prévu que des bois puissent être classés sur d'autres critères. C'est techniquement tout à fait possible, mais il faut en étudier l'impact sur les propriétés mécaniques des lamelles aboutées structurelles obtenues par cette méthode, ce qui constitue une perspective très importante.

La méthode de classement obtenue appliquée au cours du projet pour les chênes sessile et pédonculé, semble pouvoir se transposer sans difficultés à d'autres feuillus, tant que la mesure d'ODF fonctionne. Il conviendrait de le vérifier pour des essences qualifiées de secondaires par leur présence sur le territoire, mais qu'il faudra valoriser à terme pour répondre à la demande croissante du secteur de la construction : charme (*Carpinus betulus*), chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra* L.), chêne pubescent (*Quercus pubescens*, particulièrement résistant à la sécheresse et par conséquent planté assez massivement actuellement), érable (*Acer campestre*), etc. C'est particulièrement l'objectif du projet Feuillus CHOC, financé par l'Ademe (contrat 2282D0474-A) et débutant fin 2023, qui devrait à répondre entre autres à cette question.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bureau d'Informations et de Prévisions Economiques, FCBA (2019) Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments. ADEME, France Bois Forêt, CODIFAB
- EN 338 (2016) Structural timber—Strength classes.
- EN 408 (2012) Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties.
- EN 14080 (2013) Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué - Exigences
- EN 14081-1+A1 (2019) Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements
- EN 14081-2+A1 (2022) Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 2: Machine grading; additional requirements for type testing
- EN 14358 (2016) Structures en bois - Détermination et vérification des valeurs caractéristiques
- EN 16351 (2021) Structures en bois - Bois lamellé croisé - Exigences
- FCBA (2007) Campagne de qualification du Chêne en France - Rapport final Convention DGFAR n°61.45.80.29/02
- FCBA (2023) Mémento FCBA
- Lemaire J (2010) Le chêne autrement : Produire du chêne de qualité en moins de 100 ans. Forêt privée française
- 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
- Pot G, Reuling D, Chastagnier T, Besseau B, Ducerf E, Ducerf J-M, Lanvin J-D, Magne N, Viguier J (2023) Tensile testing of second-quality French oak sawn timber for strenght grading - TreCEffiQuaS dataset. doi.org/10.57745/JUHQIT

RÉSUMÉ

Le chêne a la particularité de présenter une très grande variété de qualités. La proportion de chêne actuellement considérée de faible qualité est importante, et ces bois sont souvent utilisés pour des applications à faible valeur ajoutée comme le bois de chauffage. Le projet TreCEffiQuaS cherche à offrir de meilleurs débouchés aux bois de chêne de qualité secondaire en les transformant en matériaux de construction. Pour cela, les défis à relever étaient de garantir leur résistance par des méthodes non-destructives et de développer des procédés de transformation performants et abordables pour les petites entreprises françaises.

De nombreux essais ont été réalisés sur un échantillon représentatif de la ressource française de chêne sessile et pédonculé de qualité secondaire, permettant d'en évaluer les propriétés mécaniques et révélant que 90 % de ces bois peuvent théoriquement être utilisés pour la construction. Des classes de résistance adaptées aux applications de type lamellé-collé ont été proposées, et un algorithme de classement par machine a été développé, basé sur l'orientation des fibres du bois mesurée par scanner industriel. Ce classement par machine s'est révélé beaucoup plus efficace que le classement visuel traditionnel, atteignant un rendement de 83 % pour la classe de résistance DT11, la première utilisable en construction. Une méthode de tronçonnage optimisé pour la transformation de ces bois en lamelles aboutées a aussi été proposée, permettant d'obtenir des rendements matière élevés et des résistances mécaniques satisfaisantes. Ces avancées permettent d'envisager une plus grande valorisation économique des bois de chêne de qualité secondaire, tout en respectant les normes et répondant aux besoins du marché de la construction en produits techniques bois.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2003C0065

Étude réalisée par Arts et Métiers, Ducerf Groupe et FCBA pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Arts et Métiers
Appel à projet de recherche : GRAINE 2019

Coordination technique - ADEME : **NOM Prénom ingénieur**
Direction/Service : XXXXX

CITATION DE CE RAPPORT

POT Guillaume, VIGUIER Joffrey, SOH MBOU Delin, (Arts et Métiers), BESSEAU Benoît, CHASTAGNIER Thibault, (Groupe Ducerf), LANVIN Jean-Denis, REULING Didier, (Institut Technologique FCBA). 2024. **Transformation et Classement éco-Efficients des Qualités Secondaires de chêne pour leur valorisation en bois d'œuvre**. 57 pages.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.