

Bois densifié sans résine synthétique: performances, stabilité et perspectives d'utilisation

Autor(en): **Huguenin, Philippe**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **121 (1995)**

Heft 13

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78607>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Bois densifié sans résine synthétique

Par Philippe Huguenin, ing. dipl. sc. mat. EPFL et Parviz Navi, Ph. D. mat. sc. UCLA, Laboratoire de matériaux de construction, EPFL, 1015 Lausanne

Performances, stabilité et perspectives d'utilisation

La densification du bois massif par traitement thermomécanique est un procédé qui a été développé et industrialisé à partir des années 1940. Le produit de ce type le plus connu a été commercialisé sous le nom de *Staypack* [1]¹. Ce traitement de densification consiste à appliquer une force dans la direction radiale des pièces, à une température suffisamment élevée pour que la plastification du bois se produise [2]. Il en résulte une diminution de la porosité du bois et une augmentation de sa résistance mécanique [3]. Lorsqu'un tel matériau est soumis à une humidité élevée ou entre en contact avec de l'eau, il a malheureusement tendance à revenir à ses dimensions d'origine. Ce comportement s'appelle «mémoire de forme» [4].

Actuellement, les différents produits de bois densifié sur le marché, comme les parquets, les éléments de structure pour les skis ou les contreplaqués densifiés, sont pratiquement tous imprégnés de polymères synthétiques, essentiellement pour réduire leur instabilité dimensionnelle et leur mémoire de forme. Or, en Suisse, l'entreprise *Stahel+Köng* à Hinwil (ZH) utilisait jusqu'à il y a peu un procédé thermomécanique sans résine pour fabriquer des navettes pour les métiers à tisser. Cela a permis de remplacer les bois tropicaux habituellement utilisés pour ce type d'application, par du hêtre européen densifié. Depuis, la technologie textile n'utilise plus de navettes et il n'existe actuellement plus, à notre connaissance, d'autres applications pour ce matériau.

L'objectif de cet article est de présenter les performances et les imperfections du hêtre densifié

par traitement thermomécanique. L'étude est donc orientée avant tout vers la comparaison des caractéristiques de ce matériau avec celles de deux sortes de hêtre non densifié et des moyens sont proposés pour réduire ses défauts tout en conservant ses qualités, dont la principale est qu'il ne contient aucune substance d'origine fossile et que son élimination est donc totalement écologique.

Nous espérons que ces informations ouvriront la voie vers de nouvelles applications et susciteront un intérêt pour le développement de bois densifié, cherchant à concilier des exigences technologiques, économiques et écologiques.

Présentation du matériau

Pour les essais comparatifs effectués, les pièces de bois densifié ont été fournies par l'entreprise citée. L'installation dont celle-ci dispose permet de densifier en une seule opération une vingtaine de pièces de hêtre (50 x 50 x 500 mm) dans le sens radial (fig. 1). La teneur initiale du bois en eau est d'environ 13% de son poids et elle diminue fortement au cours du traitement pour atteindre une valeur correspondant à l'équilibre hygroscopique de l'atmosphère d'utilisation de la pièce de bois ainsi traitée, qui est d'environ 8%. Les paramètres optimaux pour la mise en œuvre corres-

pondent à une pression de 25 MPa, une température de 130°C et une durée de 2,5 heures. Sous l'effet du traitement, les pièces subissent un écrasement de 40%.

Pour évaluer les performances du bois densifié, outre les essais effectués sur ce matériau, d'autres ont porté sur le bois non traité mais sélectionné pour la densification et sur du hêtre de menuiserie disponible dans le commerce. Ils sont désignés comme «hêtre densifié», «hêtre à densifier» et «hêtre de menuiserie».

Les figures 2 et 3 illustrent la différence de microstructure entre un hêtre de menuiserie et un hêtre densifié par procédé thermomécanique. Les cellules déformées sont surtout celles du bois de printemps dont les parois sont plus minces.

Essais et comportement mécaniques

Le paramètre principal pour l'analyse des propriétés mécaniques du bois est la densité apparente. Mesurée sur des échantillons, celle-ci a été déterminée à partir de la masse et du volume à sec (à l'humidité relative $h = 5$) des échantillons, (sans déduction du volume des pores).

Les résultats obtenus sont présentés dans un but essentiellement comparatif et complétés, autant que possible, par les

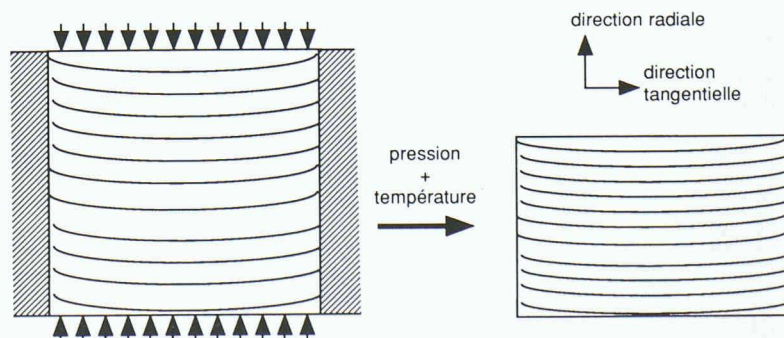


Fig. 1. - Densification de pièces de bois par traitement thermomécanique

¹Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

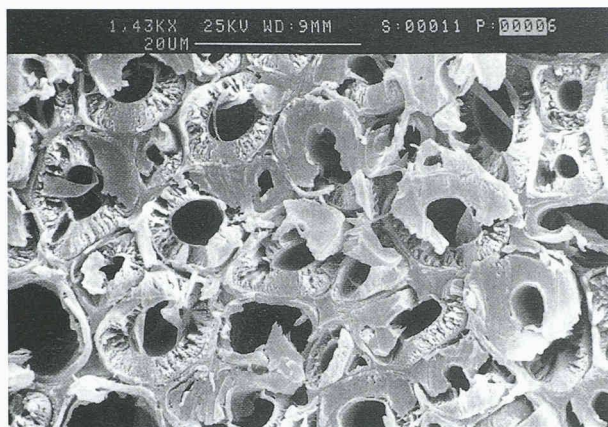


Fig. 2. - Microstructure du hêtre de menuiserie, photographie prise au microscope électronique à balayage

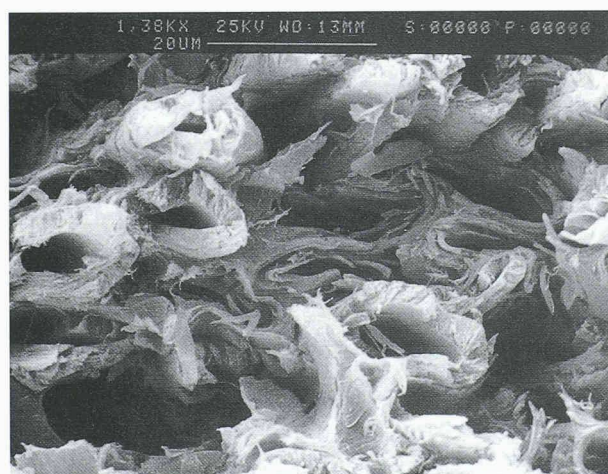


Fig. 3. - Microstructure du hêtre densifié, photographie prise au microscope électronique à balayage

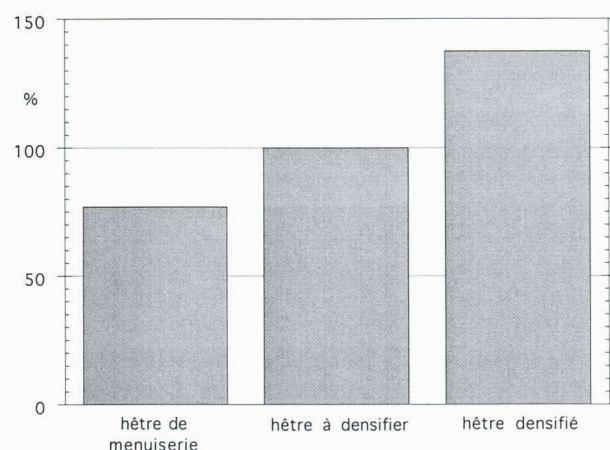


Fig. 4. - Densités apparentes ($h = 5$, moyenne de dix échantillons)

Tableau 1 - Densité apparente à sec ($h = 5$, valeurs moyennes de dix échantillons, erreur: $\pm 2\%$)

Type de bois	densité [g/cm ³]
hêtre de menuiserie	0,63
hêtre à densifier	0,82
hêtre densifié	1,13
hêtre <i>Fagus sylvatica</i> anhydre*	0,64-0,72

* d'après J. Sell & F. Knopf: «Propriétés et caractéristiques des essences de bois», Lignum éd., 1990

données mentionnées dans la littérature spécialisée. L'interprétation des résultats s'appuie d'une part sur les connaissances actuelles du bois et des polymères et sur des images des échantillons testés, prises avec un appareil de macro-photographie et au microscope électronique à balayage.

Le tableau 1 présente les valeurs de densité apparente mesurées sur les trois types d'échantillons testés. Un domaine de valeurs de référence puisé dans la littérature y est également indiqué. Il est à remarquer que la densité du hêtre de menuiserie se situe à la limite inférieure du domaine de référence; les propriétés mécaniques de ce dernier devraient donc être un peu plus faibles que les valeurs référencées. Le hêtre à densifier a, par contre, une densité très élevée qui pourrait faire penser qu'il est imprégné, bien que les images au microscope électronique à balayage ne le montrent pas. Même s'il contient peut-être quelques substances anti-feu ou de protection contre les organismes, ce hêtre est de qualité supérieure.

La figure 4 présente une comparaison des différentes densités des bois testés. Le traitement thermomécanique augmente la densité de 35% à 40%, ce qui est comparable à l'écrasement observé dans le sens radial, après traitement.

Deux types d'essais mécaniques ont été réalisés: des essais de résilience et de flexion trois points. Les premiers informent sur la capacité à résister aux chocs en indiquant l'énergie nécessaire à la rupture par unité de surface; ils

ont été effectués avec la charge appliquée dans le sens soit radial, soit tangentiel. Le second type d'essais permet de mesurer la flèche ($\pm 0,01$ mm) en fonction de la force appliquée ($\pm 0,1$ kN) et d'en déduire la contrainte de traction maximale élastique et celle à la rupture, ainsi que le module d'élasticité en flexion. Ils ont été effectués avec la charge appliquée dans le sens radial.

Pour que le traitement de densification améliore de façon significative les caractéristiques mécaniques du bois, l'augmentation de ces dernières doit être nettement supérieure à l'augmentation de la densité, indiquée par un trait gras sur les graphiques.

Résistance aux chocs (essais de résilience)

Observons tout d'abord l'évolution de la résilience. Si la résistance aux chocs dans la direction radiale est toujours supérieure à celle dans la direction tangentielle, on constate que cette dernière est beaucoup plus sensible au traitement que la première (tableau 2 et fig. 5). Ainsi, l'augmentation après traitement de densification est de plus de 70% dans le second cas, mais elle est seulement de 50% dans le premier, soit proche de l'augmentation de la densité. Les photographies des faciès de rupture (fig. 6 et 7) permettent de mieux comprendre cette différence apparue après le traitement: pour le hêtre densifié, la rupture due à un choc dans la direction radiale se produit partiellement dans le sens parallèle aux fibres, alors

Tableau 2 - Résilience (valeurs moyennes de cinq essais)

Type de bois	résilience tangentielle [J/cm ²]	résilience radiale [J/cm ²]
hêtre de menuiserie	3,8	8,5
hêtre à densifier	8,2	10,0
hêtre densifié	14	15

que pour les deux autres bois, la rupture est uniquement perpendiculaire aux fibres.

Le premier type de rupture est dû à une mauvaise cohésion des fibres du bois, conduisant à une fragilité interfibrillaire. Or, un tel phénomène n'est pas observé pour un impact dans le sens tangentiel. Si ce mode de sollicitation bénéficie beaucoup plus du traitement de densification, c'est que, lorsque le bois est densifié, le volume des lumens des cellules de printemps et d'été devient presque équivalent, si bien que le comportement dans l'une ou l'autre des directions transversales est très proche. La figure 8 montre que cette différence de résilience diminue de façon exponentielle avec l'augmentation de la densité. Ainsi, pour une densité correspondant à celle de la paroi cellulaire (1,5 g/cm³), elle serait même nulle.

Comportement mécanique statique

La comparaison des caractéristiques en flexion illustrée par la figure 9 montre que le traitement de densification augmente la résistance à la rupture de 70%, la limite élastique de 80% et le module d'élasticité de 110%, cette dernière augmentation étant particulièrement digne d'intérêt. La comparaison des lignes de rupture indique à nouveau que le bois densifié a tendance à se rompre partiellement dans la direction des fibres, contrairement aux bois

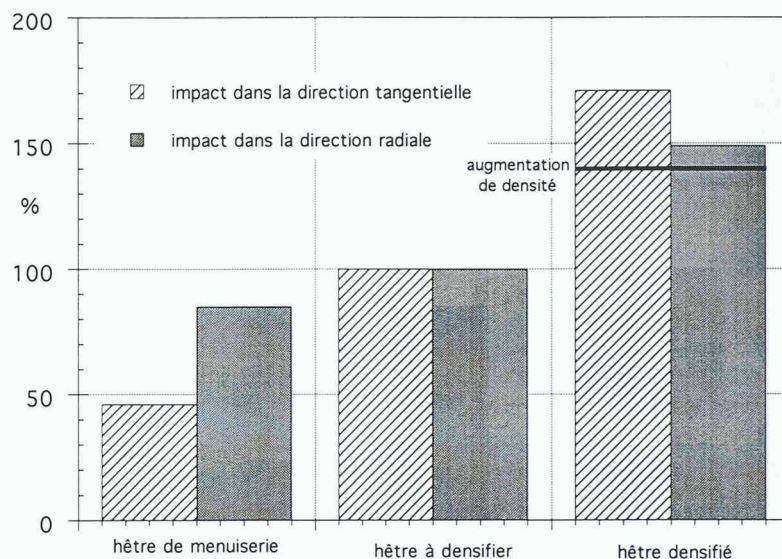


Fig. 5. - Résilience dans les directions radiales et tangentielles

non traités (fig. 10). En mode statique, il existe donc également une fragilité interfibrillaire du bois densifié. Les valeurs de référence qui figurent dans le tableau 3 sont supérieures aux valeurs déterminées aussi bien pour le hêtre de menuiserie que pour le hêtre à densifier; une différence qui est due à la teneur en eau des échantillons testés (alors que les valeurs de référence concernent un bois sec). En effet, les propriétés mécaniques du bois diminuent fortement dans une atmosphère humide: le module d'élasticité, qui est le moins affecté, voit sa valeur chuter de 20% entre l'état sec et l'état humide ($h = 60$ à 80).

On constate que l'amélioration des propriétés mécaniques obtenue par le traitement de densifi-

cation est du même ordre pour l'ensemble de ces propriétés, à l'exception de la résilience radiale, pour laquelle elle est plus faible, et du module d'élasticité, pour lequel elle est plus forte.

Stabilité dimensionnelle

Des essais de gonflement ont été effectués sur du hêtre densifié et sur du hêtre à densifier, dans les trois directions principales du bois (longitudinale, tangentielle et radiale), à l'humidité relative de $h = 76$ et $h = 97$, ainsi que dans de l'eau. Ces expériences permettent de connaître la déformation à 0,001 mm près dans les trois conditions d'humidité. Les essais de gonflement durent plusieurs jours et présentent une dispersion des résultats relativement importante, raisons pour les-

Tableau 3 - Propriétés mécaniques en flexion (valeurs moyennes de trois essais)

Type de bois	contrainte maximale à la rupture $\sigma_{\max, \text{rupt}} [\text{MPa}]$	contrainte maximale élastique $\sigma_{\max, \text{él}} [\text{MPa}]$	module d'élasticité en traction longitudinale [GPa]
hêtre de menuiserie	68	29	6,9
hêtre à densifier	117	53	11,0
hêtre densifié	200	95	22,9
hêtre <i>Fagus sylvatica</i> anhydre*	100-135	—	12,3-16,4

* d'après J. Sell & F. Kropf: «Propriétés et caractéristiques des essences de bois», Lignum éd., 1990

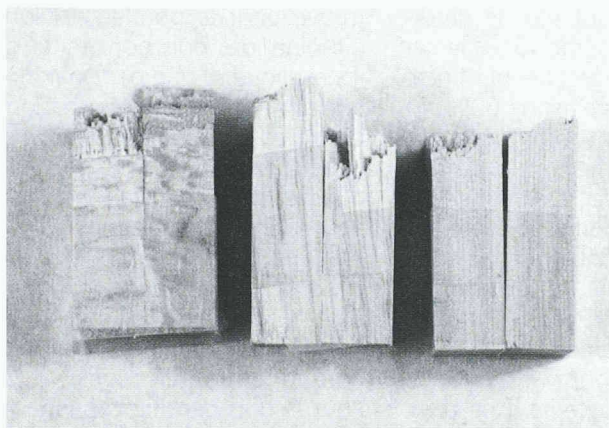


Fig. 6. - Faciès de rupture après impact dans la direction tangentielle (macrophotographie); de gauche à droite: hêtre de menuiserie, hêtre à densifier et hêtre densifié

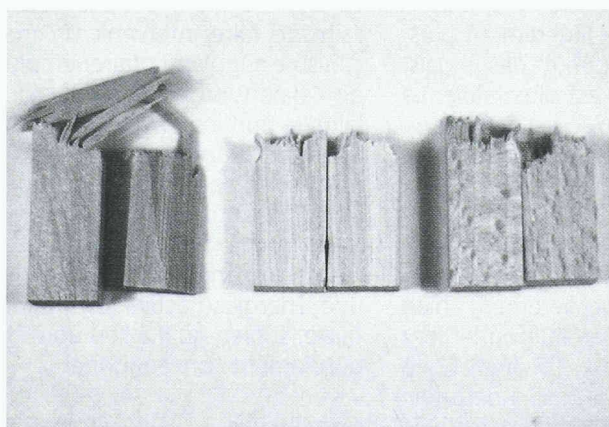


Fig. 7. - Faciès de rupture après impact dans la direction radiale (macrophotographie); de gauche à droite: hêtre densifié, hêtre à densifier et hêtre de menuiserie

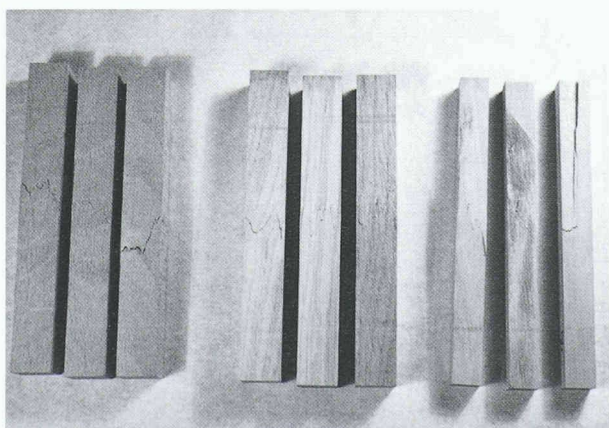


Fig. 10. - Lignes de rupture après essai de flexion (macrophotographie, trois échantillons par type de bois); de gauche à droite: hêtre de menuiserie, hêtre à densifier et hêtre densifié

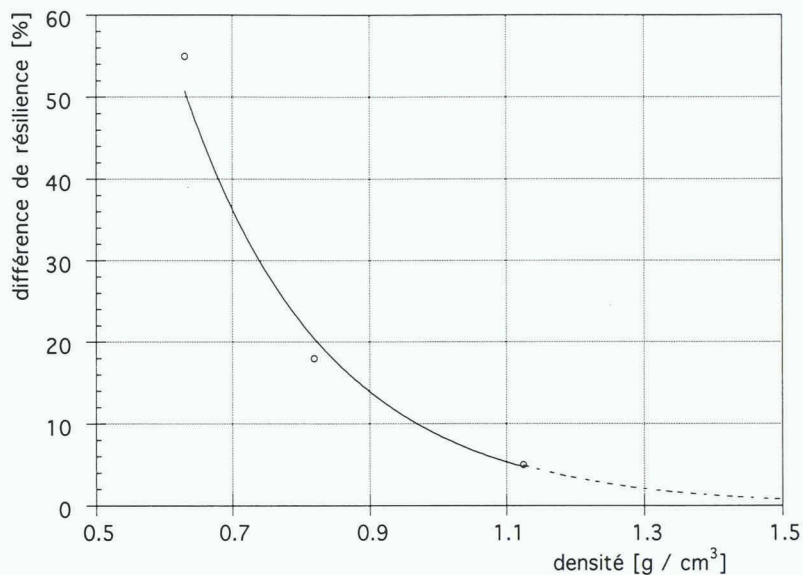


Fig. 8. - Evolution de la différence entre la résilience radiale et tangentielle de hêtres de différentes densités

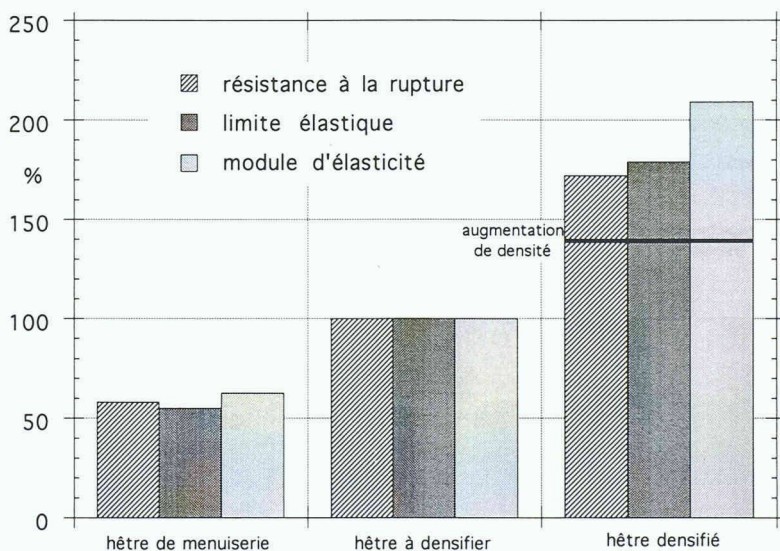


Fig. 9. - Propriétés mécaniques des pièces de hêtre soumises à flexion

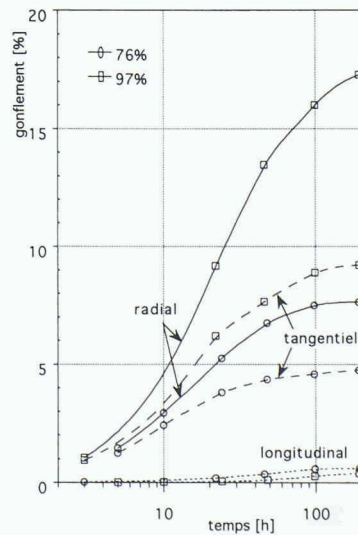
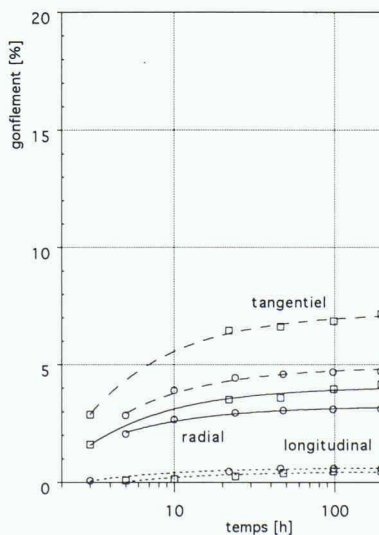


Fig. 11. - Evolution du gonflement du hêtre à densifier (à gauche) et du hêtre densifié pour deux humidités relatives

quelles seuls les bois concernés directement par la densification y ont été soumis.

La figure 11 présente l'évolution du gonflement sous deux atmosphères humides. Pour le hêtre non traité, le gonflement tangentiel est plus important que le gonflement radial qui, lui, est beaucoup plus important que le gonflement longitudinal. Pour le hêtre densifié en revanche, le gonflement radial est le plus important, ce qui est logique puisqu'il s'agit du sens de la compression.

Dans le cas des pièces de bois densifié immergées dans l'eau, il est possible d'observer une déformation permanente et décrite par la relation:

$$D_{perm} = (1 - h_1/h_2) \times 100 [\%]$$

où h_1 est la hauteur de l'échantillon dans le sens de la densification avant l'immersion et h_2 la hauteur dans ce même sens, après avoir immergé l'échantillon dans l'eau jusqu'au gonflement stabilisé, puis l'avoir séché à 105°C. Cette déformation permanente est de 26%, ce qui montre que, compte tenu du taux de la densification, la mémoire de forme n'est pas totale. Le traitement de densification induit donc une certaine plastification permanente dans le matériau, dont le degré peut s'exprimer par la part de densifica-

tion ne subissant pas de déformation permanente. Dans le cas présent, le degré de plastification permanente est de 60%.

Le gonflement comparé du hêtre à densifier et du hêtre densifié dans les directions tangentielles et longitudinales est présenté à la figure 12. Le comportement dans ces deux directions devrait être identique pour les deux types de bois, puisqu'elles n'ont pas été modifiées lors du traitement de compression. A $h = 76$ pour les deux directions considérées et à $h = 97$ pour la direction longitudinale, le gonflement stabilisé apparaît effectivement très proche pour les deux types de bois. Dans les autres cas, le bois densifié gonfle légèrement plus, même si au début des essais, son expansion est plus faible. La figure 13 indique en outre que cette différence augmente avec l'hygrométrie.

Le phénomène où les deux courbes, celui du bois densifié et celui du bois à densifier, se croisent est particulièrement bien illustré par le cas du gonflement tangentiel à $h = 97$ (fig. 12, à gauche). Pour le bois à densifier, le sens de la courbure reste le même, alors que celle du bois densifié change de sens, si bien que ce gonflement est caractérisé par une courbe en «S».

Certes, ce phénomène se re-

trouve pour le gonflement longitudinal des bois non traités et il s'explique, d'une part, par l'interaction entre les déformations dans les différentes directions (coefficient de Poisson) et, d'autre part, par la libération des contraintes internes [5]; il est particulièrement marqué pour la direction longitudinale (fig. 12, à droite), en raison de son faible gonflement par rapport aux autres directions.

Pour le bois densifié cependant, l'allure de l'évolution du gonflement selon une courbe en «S» se retrouve pour toutes les directions, particulièrement aux humidités élevées et dans la direction radiale. Pour expliquer ce phénomène, il semble nécessaire de faire intervenir un mécanisme supplémentaire: en plus de l'expansion de la paroi cellulaire, le gonflement du bois densifié s'accompagne de la déformation de la structure comprimée, puisque la plastification permanente n'est que de 60%. Ce dernier mécanisme nécessite une énergie d'activation importante, si bien qu'il a lieu après le gonflement conventionnel.

Conclusion

Le traitement de densification thermomécanique permet d'augmenter de façon significative les propriétés mécaniques – aussi bien statiques que dyna-

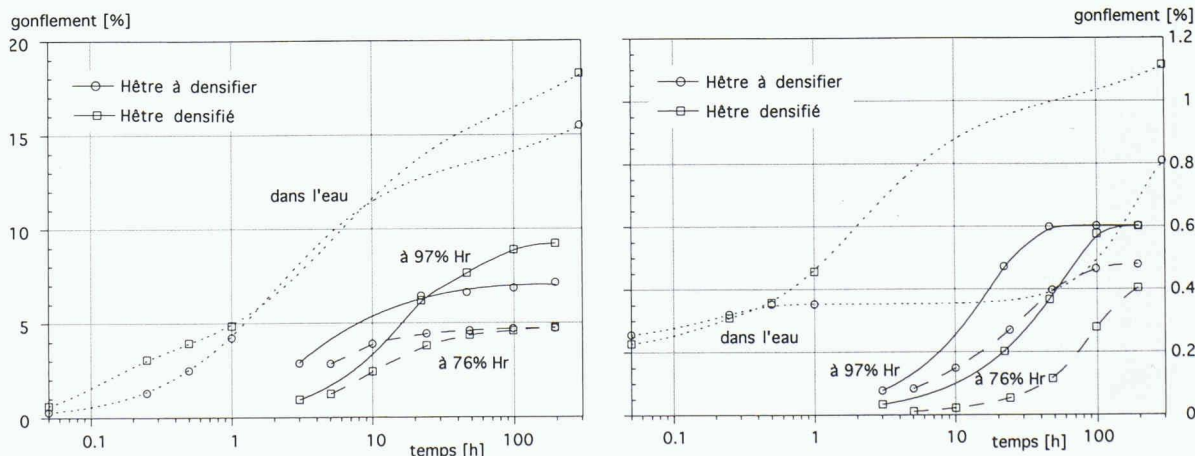


Fig. 12. - Gonflement tangentiel (à gauche) et longitudinal du hêtre à densifier et du hêtre densifié pour trois conditions hygriques

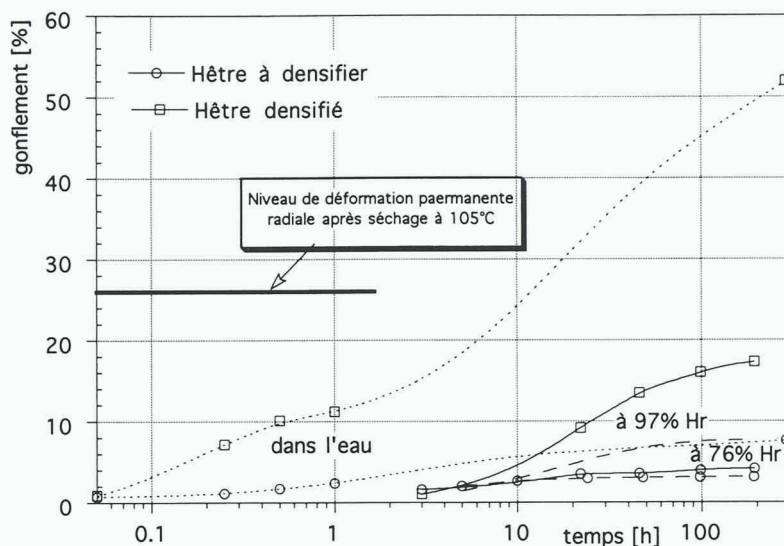


Fig. 13. - Gonflement radial (direction de densification) pour trois conditions hygrométriques

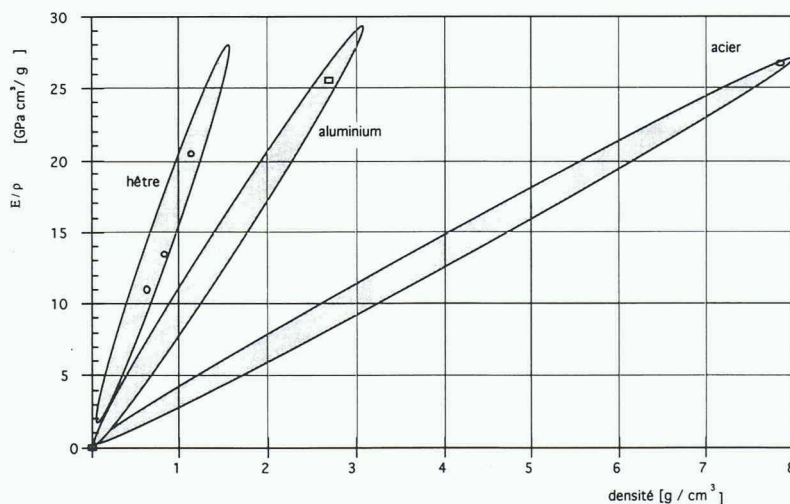


Fig. 14. - Domaines de performance du bois et de deux matériaux métalliques

miques – du bois, comme le résume le tableau 4, et ce, pour un taux de densification de 40%.

La caractéristique qui est la plus influencée par le traitement de densification est le module d'élasticité qui voit sa valeur doubler. Le comportement à la rupture est par contre moins affecté, ce qui s'explique par l'ap-

parition d'une fragilité intermédiaire se manifestant par une rupture partiellement parallèle aux fibres aussi bien en mode statique qu'en mode dynamique. Cette fragilité est très probablement due à la présence de contraintes internes induites par le procédé de densification. Néanmoins, la densification thermomécanique permet d'atteindre des niveaux de performance très élevés, comme illustré par la fig. 14. Celle-ci représente le diagramme d'équivalence d'une propriété donnée des matériaux, ici le module spécifique (module d'élasticité relatif à la densité, E/ρ) par rapport à un paramètre, ici la densité. Dans le domaine des transports, où la consommation d'énergie est liée au poids, plus le module

spécifique est grand pour une même densité, plus le niveau de performance est élevé. 26

L'intérêt serait encore plus grand si les bois destinés à la densification étaient de moins bonne qualité que celui utilisé par l'entreprise mentionnée. En effet, en densifiant du bois de menuiserie, il serait possible de tripler son module élastique.

L'instabilité dimensionnelle est le principal point faible observé sur le bois densifié, particulièrement aux humidités relatives élevées et pour autant qu'il y soit exposé pendant plusieurs jours. A $h = 97$ par exemple, le gonflement radial stabilisé du bois densifié est de près de 20%, alors qu'il est de 5% seulement pour le hêtre à densifier.

Le traitement thermomécanique ne permet d'atteindre qu'une plastification permanente de 60%, le reste de la déformation étant lié à des contraintes internes qui se libèrent lorsque les cellules de bois entrent en contact avec des molécules d'eau. Ces contraintes sont concentrées aux plis de déformation des cellules et peuvent conduire à des dégâts locaux (fig. 15), qui peuvent également jouer un rôle dans le mécanisme de rupture.

En conséquence, le bois densifié selon ce type de procédé ne peut être utilisé sous une humidité élevée, ce qui réduit grandement son champ d'application. Néanmoins, une exposition de quelques heures seulement à une humidité proche de la saturation ou en contact avec de l'eau n'induit pas de déformation permanente, puisqu'un tel phénomène exige une énergie d'activation. Les applications envisageables des bois densifiés thermomécaniquement se réduisent à des produits courants, comme les manches de couteau ou de hache, les poignées de porte ou les baguettes de tambour, qui sont souvent en matière plastique en raison de leur

Tableau 4 - Amélioration des propriétés mécaniques du hêtre densifié par rapport au hêtre à densifier

<i>Propriétés dynamiques</i>	
Résilience dans le sens radial	+ 50%
Résilience dans le sens tangentiel	+ 70%
<i>Propriétés statiques (flexion)</i>	
Résistance à la rupture	+ 70%
Limite élastique	+ 80%
Module d'élasticité	+110%

coût. Les performances mécaniques de ce matériau sont donc difficilement exploitable technologiquement en raison de l'instabilité dimensionnelle mentionnée.

Pour réduire l'instabilité dimensionnelle du bois densifié, on a généralement recours à des méthodes d'imprégnation avec des résines synthétiques [6], qui sont des sources de pollution importantes lors de leur élimination. Cependant, le même but peut être atteint par un procédé plus écologique qui permet d'obtenir un bois densifié dont la plastification permanente est élevée, améliorant non seulement sa stabilité dimensionnelle, mais également son comportement à la rupture. Pour y parvenir, il faut comprimer le bois en présence d'un plastifiant qui abaisse les températures de transition vitreuse du bois [7]. Or, le plastifiant le plus commun pour le bois est l'eau. Depuis longtemps, elle est utilisée pour cintrer les pièces de bois destinées à la construction de navires ou de meubles. La densification du bois en présence de vapeur d'eau surchauffée offre, en effet, la possibilité d'obtenir facilement un matériau à plastification permanente élevée [8]. Seul un espace étanche où a lieu la compression est nécessaire au bon déroulement de la densification. Des essais récemment effectués sur du hêtre de menuiserie au Laboratoire des matériaux de construction de l'EPFL ont montré que, sous certaines conditions, la plastification permanente obtenue avec ce type de procédé est proche de 100% pour des taux de densification de 60%. Au vu de ces résultats encourageants, il serait souhaitable que ce procédé plus écologique connaisse une application industrielle.

Nous espérons également que, d'ici quelques années, les pièces de bois commercialisables, densifié par ce type de procédé

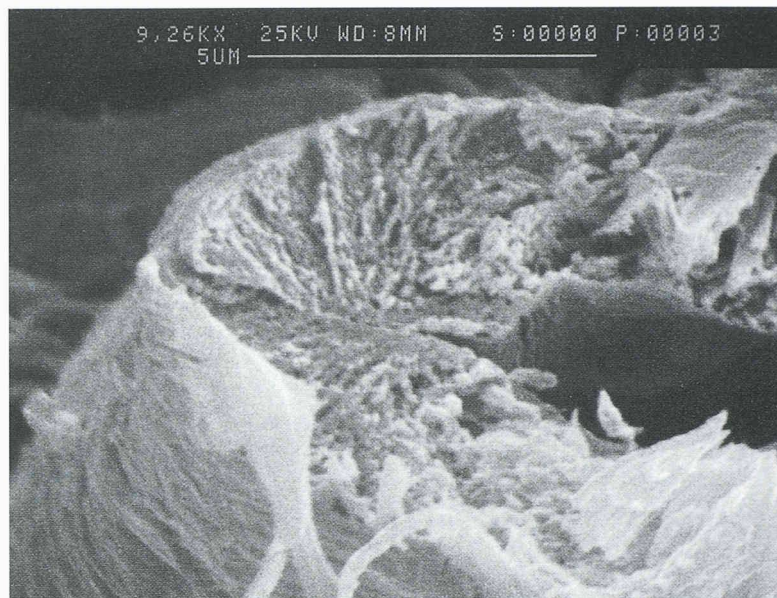


Fig. 15. - Ecrasement d'une cellule de bois après traitement thermomécanique, photographie prise au microscope électronique à balayage

pourront atteindre des dimensions plus importantes.

Les possibilités d'application d'un matériau aussi écologique que le bois et offrant des propriétés mécaniques qui pourraient être proches de celles de l'aluminium sont larges et ne devraient pas laisser indifférentes les entreprises novatrices de notre pays.

Dans le domaine de la construction en bois, les assemblages sont les points faibles des ouvrages et les ingénieurs ont le plus souvent recours à l'acier pour les renforcer. Or le bois densifié pourrait remplacer certaines pièces métalliques comme les rivets maintenant ensemble trois poutres. On peut également imaginer que seule l'extrémité des poutres destinées à l'assemblage soit densifiée, afin de renforcer ce dernier. Une autre application du bois densifié dans la construction se trouve dans les éléments de structure des serres: la stabilité hygrique de ce matériau, ses bonnes caractéristiques mécaniques et sa faible conductivité thermique sont autant d'atouts pour ce genre d'application.

Dans le domaine des transports, des matériaux alliant de bonnes propriétés mécaniques et une faible densité sont recherchés. Là encore, le bois densifié est un excellent candidat à de telles applications, qui résident essentiellement dans les éléments de structure de l'habitable des véhi-

cules, notamment les armatures, le plancher ou la couverture. D'autres applications sont également envisageables dans l'ameublement ou le domaine du sport, mais elles sont très spécifiques et nécessiteraient un développement plus spécialisé, surtout en ce qui concerne les caractéristiques esthétiques et les possibilités de revêtement.

Bibliographie

- [1] SEBORG, R. M., MILLET, M. A. & STAMM, A. J.: «Heat stabilized compressed wood - Staypack», *Mechanical Engineering*, 67 (1945) 1, pp. 25-31
- [2] GORING, D. A. I.: «Thermal Softening of Lignin, Hemicelluloses and Cellulose», *Pulp and Paper Magazine of Canada*, 64 (1963) 12, pp. T517-T527
- [3] KOLLMANN, F. F. P., KUENZI, E. W. & STAMM, A. J.: «Principles of Wood Science and Technology, II: Wood Based Materials», Berlin, Springer-Verlag, 1975, 703 p.
- [4] GRIL, J.: «Mécanismes physico-chimiques responsables des grandes déformations du bois», Groupement scientifique «Rhéologie et mécanique du bois», CNRS-INRA-CTBA-CTFT, 1989, pp. 16-19
- [5] SKAAR, C.: «Wood-Water Relations», Berlin, Springer-Verlag, 1988, 283 p.
- [6] LEIJTEN, A. J. M.: «Mechanical and Physical Properties of Densified Veneer Wood for Structural Applications», TU Delft, 1963, 28 p.
- [7] BACK, E. L. & SALMÉN, L.: «Glass Transition of Wood Hold Implications for Molding and Pulp Processing», *TAPPI*, 65(1982)7, pp. 107-110
- [8] IIDA, I., NORIMOTO, M. & IMAMURA, Y.: «Hygrothermal Recovery of Compression Set», *Mokuzai Gakkaishi*, 30 (1984) 5, pp. 354-358