

FORÊT • NATURE



OUTILS POUR UNE GESTION RÉSILIENTE DES ESPACES NATURELS



Tiré à part du Forêt.Nature n° 161, p. 61-72

LE TRAITEMENT THERMIQUE DES ESSENCES FEUILLUES INDIGÈNES. EFFET SUR LES PROPRIÉTÉS TECHNOLOGIQUES DU BOIS

Caroline Pollet (GxABT-ULiège), **Cécile Verheyen** (LTB-CRAW), **Benoit Jourez** (LTB-CRAW)

The image shows a series of horizontal wooden planks. On the left, five planks are light-colored and labeled 'CHÊNE N°1', 'CHÊNE N°2', 'CHÊNE N°3', 'CHÊNE N°4', and 'CHÊNE N°5' from top to bottom. On the right, five planks are dark brown, representing the same oak species after thermal treatment. The background is a yellowish-brown color.

Le traitement thermique des essences feuillues indigènes

Effet sur les propriétés technologiques du bois

Caroline Pollet¹ | Cécile Verheyen² | Benoit Jourez²

¹ Gembloux Agro-Bio Tech (ULiège)

² Laboratoire de Technologie du Bois (CRA-W)

Nos feuillus ont du potentiel pour concurrencer les essences exotiques en usage extérieur. Les consommateurs recherchent des matériaux propres et locaux. Les traitements thermiques évoluent mais nécessitent de caractériser les nouveaux matériaux obtenus.



Si le bois possède de nombreuses qualités, il n'en demeure pas moins un « matériau vivant » qui réagit avec son environnement. En tant que matériau hygroscopique, sa stabilité varie avec l'humidité relative et celle de l'air ambiant. L'augmentation de la teneur en eau du bois au-delà de 20 à 22 % d'humidité peut favoriser les altérations biologiques du matériau. En effet, le principal atout du bois, son origine biologique, implique aussi certaines limitations à son utilisation en raison des risques de biodégradation (champignons et insectes). La résistance des bois à ces dégradations se nomme : la durabilité.

Cette résistance est naturellement présente dans certains bois tropicaux et dans de rares espèces indigènes. Toutefois, leur disponibilité réduite, associée à des contraintes environnementales, ne leur permet pas de satisfaire les besoins du marché européen. Dès lors, différentes méthodes ont été mises au point afin d'améliorer la durabilité naturelle des bois indigènes. Ces techniques valorisent les essences locales en ouvrant de nouveaux marchés pour leur mise en œuvre en extérieur.

Les traitements chimiques ont prouvé leur efficacité mais leurs inconvénients sur l'environnement et la santé humaine ont conduit à des changements dans ces pratiques de préservation du bois. Les consommateurs recherchent des matériaux propres (exempts de produits chimiques), avec une chaîne d'approvisionnement courte (impact carbone limité).

Le traitement thermique est connu depuis des siècles, les Vikings avaient déjà l'habitude de brûler superficiellement la partie enterrée des piquets de clôture pour les protéger de la dégradation biologique. Les premières études sur le bois traité thermiquement ont été réalisées par Stamm et Hansen à partir de 1930, mais la recherche ne s'intéresse réellement aux traitements thermiques que depuis le début des années '90, en réponse aux interrogations des consommateurs vis-à-vis des traitements chimiques. En effet, le traitement thermique est considéré comme une alternative écologique aux produits de préservation chimiques.

Depuis lors, de nombreux procédés ont été mis au point à travers le monde, principalement en Europe : *Plato®* aux Pays-Bas, *Rétification®* en France, *ThermoWood®* en Finlande, *Thermoholz* en Autriche, *Intemporis®* en Suisse et *Oil Heat Treatment (OHT)* en Allemagne. Ils diffèrent entre autres par l'atmosphère utilisée dans l'enceinte de traitement pour réduire la présence d'oxygène pendant le traitement à haute température et éviter ainsi les risques d'auto-inflammation (utilisation de gaz tels que l'azote, la vapeur d'eau, d'huile, de gaz de combustion ou d'une mise sous vide). Différentes pratiques existent également en fonction de l'environnement (sec ou humide), du mode de transfert de chaleur (conduction ou convection), de la courbe de température et de la durée de traitement. Et sachant que chaque essence réagit spécifiquement au traitement, chaque société développe sa propre recette avec pour conséquence l'apparition sur le marché d'une grande variabilité dans l'offre en bois traités.

À la fin d'un traitement thermique, le bois présente une couleur plus foncée, et dégage une forte odeur de torréfaction, mais celle-ci disparaît avec le temps. La température élevée induit des changements chimiques dans les composants des parois cellulaires du bois, ce qui modifie irréversiblement les propriétés du matériau.

Ces modifications peuvent par ailleurs limiter l'utilisation du bois ainsi traité dans certaines applications structurelles (encart 1). Il ne s'agit donc pas d'une alternative universelle aux traitements chimiques. Néanmoins l'amélioration de la durabilité ainsi que de la stabilité dimensionnelle des bois traités thermiquement offre de nouvelles utilisations nobles aux essences indigènes naturellement moins durables (bardage, terrasse et aménagements extérieurs...).

La recherche vise à établir des modalités de traitement pour atteindre le meilleur compromis entre les propriétés mécaniques d'une part, la stabilité dimensionnelle et la durabilité d'autre part. Les recherches actuelles se concentrent surtout sur la compréhension de la modification du bois par le traitement, la

RÉSUMÉ

Le traitement thermique offre aux essences de bois indigènes peu durables naturellement de nouvelles possibilités de valorisation. En Europe, il représente une alternative prometteuse à l'utilisation de bois naturellement durables, essentiellement tropicaux, et surtout aux traitements chimiques. Il n'y a cependant pas de traitement thermique universel, il est donc important de quantifier l'effet de ces traite-

ments thermiques sur les propriétés physico-mécaniques et de durabilité fongique des bois. Une partie des résultats d'études réalisées par le Laboratoire de Technologie du Bois du CRA-W et par l'ULiège GxABT sur quatre essences de feuillus indigènes (chêne, frêne, hêtre, bouleau) traitées thermiquement est présentée dans cet article.

modélisation et la prédiction, ainsi que sur le contrôle de la qualité du bois traité thermiquement³.

Depuis quelques années, plusieurs études ont été réalisées conjointement par le Laboratoire de Technologie du Bois du CRA-W et l'Axe de Gestion des Ressources forestières de Gembloux Agro-Bio Tech (ULiège) en collaboration avec différents partenaires industriels tels que la société Scidus à Etalle (Belgique), Dumoulin Bois à Champigny (France) ou encore la société Bois Durable de Bourgogne (France). Les résultats des deux études présentées dans cet article visent à fournir plus d'informations sur les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité de diverses essences traitées de feuillus indigènes d'Europe occidentale (bouleau, frêne, hêtre et chêne).

Matériel biologique

Quatre espèces sont présentées ici : le chêne (pédonculé et sessile, en mélange, *Quercus robur* L. et *Quercus petraea* LIEB.), le frêne (*Fraxinus excelsior* L.), le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et le bouleau pubescent (*Betula pubescens* EHRH.). À l'exception du bois de cœur de chêne, ces espèces ne sont pas résistantes aux champignons lignivores (classe 5 de durabilité) et ne conviennent pas aux usages extérieurs sans traitement de préservation adéquat.

Des éprouvettes (échantillons de bois) ont été façonnées et sélectionnées selon les exigences des normes françaises (NF), européennes (NBN EN) et internationales (ISO) pour les essais mécaniques et de durabilité. Les planches ont été sciées transversalement en deux, formant deux groupes : un groupe non traité (« Blanco ») et un groupe destiné au traitement thermique (« Traité »). Cette méthode d'échantillonnage permet de tester des échantillons appariés (Blanco/Traité) provenant des mêmes planches et évite ainsi la variabilité inter-arbre ou même intra-arbre. C'est donc bien l'effet du traitement sur l'essence qui est étudié.

Si les essais sur les bois traités thermiquement sont maintenant normalisés¹³, lors de nos premières études, la durabilité du bois a été déterminée suivant la spécification technique CEN/TS 15083-1⁵. Dans cette dernière, la durabilité est déterminée sur base de la perte de masse des éprouvettes causée par les champignons lignivores auxquels ces dernières sont exposées durant 16 semaines dans des conditions hygrothermiques contrôlées. En fonction de la valeur médiane de la perte de masse, cinq classes de durabilité sont définies : de la classe 1, très durable, à la classe 5, non durable (encart 2). Les champignons testés sont d'une part, le *Coriolus versicolor* CTB 863 A (également connu sous le nom de *Trametes versico-*

lor (L.) Lloyd), champignon de pourriture fibreuse ou blanche qui dégrade simultanément la cellulose et la lignine, engendrant une couleur blanchâtre et un aspect fibreux, et d'autre part le *Coniophora puteana* BAM Ebw.15, champignon de pourriture brune qui dégrade la cellulose des parois cellulaires, engendrant une pourriture cubique résultant des fissures transversales et longitudinales qui apparaissent sur le bois.



Encart 1. Modification des propriétés par le traitement thermique

Il est actuellement reconnu que les hémicelluloses, plus sensibles à la chaleur, sont davantage dégradées que la cellulose et la lignine. Cependant, les dégradations des celluloses et des lignines sont plus complexes et encore mal comprises⁹. Suite à la dégradation des hémicelluloses, l'humidité d'équilibre du bois est réduite^{7,16}, sa stabilité dimensionnelle est donc améliorée¹⁸ ainsi que sa durabilité vis-à-vis des champignons lignivores^{2,8}. Contrairement au séchage, les traitements thermiques empêchent la réabsorption de l'humidité, réduisant ainsi la sensibilité du bois aux agents de décomposition¹⁷. Cependant, les propriétés physiques et mécaniques sont impactées différemment selon les conditions et l'intensité du traitement thermique^{2,18}. Ainsi, BOONSTRA *et al.*¹ ont montré une augmentation de 5 à 10 % du module d'élasticité (mesure de la rigidité du bois), cette propriété étant principalement influencée par la cristallisation de la cellulose. Par contre, la résistance à la rupture en flexion statique diminue considérablement, jusqu'à une réduction d'environ 50 % selon ESTEVES & PEREIRA⁷ et la résistance à la rupture en flexion dynamique (résistance aux chocs) peut diminuer jusqu'à 80 %¹⁹. CURLING *et al.*⁴ ont montré que la diminution de ces propriétés du bois traité thermiquement était principalement due à la dégradation de l'hémicellulose. Les hémicelluloses sont liées de manière covalente à la cellulose et à la lignine et, par conséquent, leur dégradation peut altérer le complexe¹².

Traitement thermique

Les études présentées ici ont été réalisées en collaboration avec deux partenaires industriels différents : les entreprises françaises *Bois durable de Bourgogne* pour l'étude sur le bois de bouleau et *Dumoulin Bois* pour l'étude sur les bois de chêne, frêne et hêtre.

L'entreprise Bois durable de Bourgogne est située à Vendennes-lès-Charolles en Saône et Loire (71) et a été la première en France en 2006 à utiliser le pro-

cédé finlandais ThermoWood® pour le traitement thermique des bois (encart 3). Grâce à leurs installations, la société est aujourd'hui une des plus importantes de France, réalisant le traitement thermique du bois dans deux fours de 20 m³ et offrant la possibilité d'expérimenter de nouvelles recettes dans leur four de 1 m³ de la marque Jartek®.

L'entreprise Dumoulin Bois, située à Champigny-sur-Marne (94), a investi en 2008 dans l'achat d'une unité de thermo-traitement de 10 m³ qui utilise le procédé français Besson®.

Encart 2. Durabilité naturelle et classe d'emploi

La norme européenne CEN/TS 15083-1⁵ définit cinq classes de durabilité naturelle basées sur les pertes de masse mesurées sur des échantillons de bois après une exposition de 16 semaines à des champignons lignivores spécifiques. La perte de masse maximale autorisée pour accéder aux classes de durabilité 1, 2, 3 et 4 est respectivement de 5, 10, 15 et 30 % (correspondant à un bois très durable, durable, modérément durable et légèrement durable) ; au-delà de ce seuil, l'espèce est classée comme non durable. L'aulx est toujours considéré comme non durable, quelle que soit l'essence. Les tests de durabilité ne portent dès lors que sur le duramen du bois.

La durée de service d'un élément en bois dépend non seulement de sa durabilité naturelle vis-à-vis des

organismes lignivores mais aussi de nombreux autres facteurs. Les détails de conception, les conditions climatiques et d'autres éléments peuvent influencer sur la tenue dans le temps. Il n'est ainsi pas opportun de prévoir une durée de service uniquement sur base de la durabilité naturelle. Mais il existe un consensus général sur un niveau minimum de durabilité qui permet d'évaluer une durée de service acceptable.

Les classes d'emploi correspondent aux risques auxquels le bois sera soumis une fois mis en œuvre. L'EN 335¹³ définit cinq classes d'emploi en fonction des conditions d'humidité dans lesquelles le bois est utilisé : à l'intérieur au sec (classe 1), jusqu'à une humidité permanente à l'extérieur en contact avec le sol ou de l'eau

douce (classe 4) voire avec de l'eau de mer (classe 5). La classe d'emploi 2 concerne le bois ou le matériau à base de bois sous abri et non exposé aux intempéries (il peut être soumis à une humidification occasionnelle mais non persistante). La classe d'emploi 3 correspond au bois qui n'est pas en contact avec le sol mais qui, exposé aux intempéries, subit des réhumidifications courtes (3.1) ou longues (3.2).

Le tableau ci-dessous, dérivé de la norme EN 460¹⁵, établit une correspondance entre les classes d'emploi et celles de durabilité naturelle vis-à-vis des champignons lignivores. Il permet de quantifier les risques d'attaques biologiques et de préciser la nécessité d'appliquer un traitement de préservation.

Classes d'emploi	Classes de durabilité					Humidité du bois en service	Exemples d'emplois
	1 Très durable	2 Durable	3 Moyennement durable	4 Peu durable	5 Non durable		
1	ok	ok	ok	ok	ok	H < 20 %	Parquet, menuiseries intérieures
2	ok	ok	ok	[ok]	[ok]	H < 20 %	Charpentes, ossatures
3	ok	ok	[ok]	[ok] à [+]	[ok] à [+]	H > 20 %	Bardages, menuiseries extérieures (parties verticales)
4	ok	[ok]	[+]	+	+	H > 20 %	Poteaux, piquets, menuiseries extérieures (parties horizontales)
5	ok	[+]	[+]	+	+	H > 20 %	Pontons, structures maritimes

ok La durabilité naturelle est suffisante pour l'emploi

[ok] La durabilité naturelle est normalement suffisante; un traitement de préservation peut parfois être recommandé

[+] Un traitement de préservation est normalement recommandé

+ Un traitement de préservation est nécessaire

Les deux entreprises chauffent le bois dans une atmosphère appauvrie en oxygène par programmation de cycles mais les procédés suivis diffèrent principalement par les gaz utilisés pour appauvrir l'atmosphère en oxygène : vapeur d'eau surchauffée pour le procédé ThermoWood® et gaz issus de la dégradation thermique du bois et recyclés pour le procédé Besson®.

Résultats des essais de détermination des propriétés physiques et mécaniques

Les valeurs moyennes des propriétés physiques et mécaniques mesurées pour les éprouvettes Blanco et Traité sont présentées dans le tableau 1.

L'humidité d'équilibre est probablement la caractéristique dont la modification est la plus reconnue. En effet, le traitement thermique réduit le caractère hygroscopique du bois principalement par la dégra-

Encart 3. Phases de traitement du procédé ThermoWood®

Le procédé finlandais ThermoWood® peut être divisé en trois phases (source : *Finnish ThermoWood Association*, 2003).

1. Séchage à haute température. Le séchage est la partie la plus longue du traitement (environ une vingtaine d'heures). La durée de la phase de séchage dépend de l'essence, de l'humidité du bois lors de l'entrée dans le four et de son épaisseur. Le séchage à haute température consiste à élever rapidement la température du four à 100 °C en utilisant de l'air chaud, de la vapeur d'eau et un faible taux d'oxy-

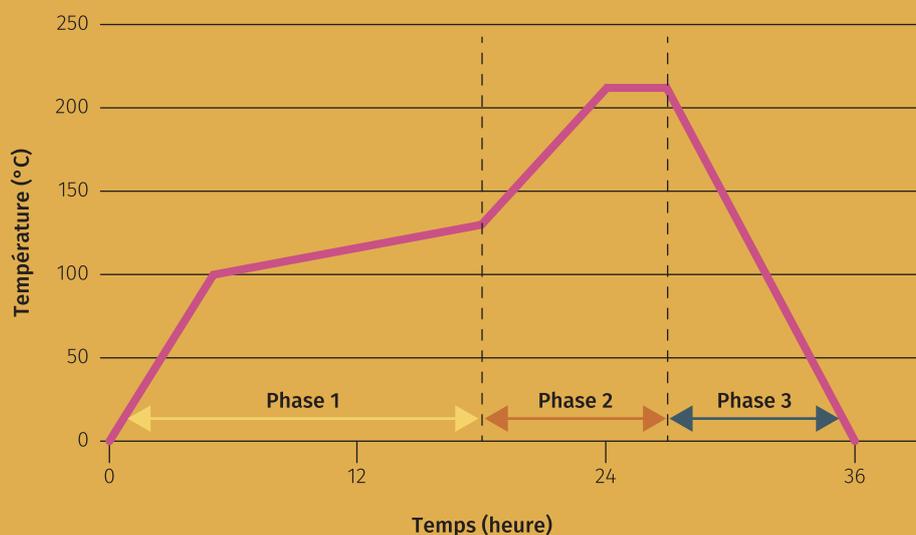
gène. Après avoir atteint 100 °C, la température continue de grimper plus lentement jusqu'à atteindre 130 °C. À la fin de cette phase, le bois est pratiquement à l'état anhydre. Ce type de séchage prépare le bois à subir la montée en température.

2. Traitement thermique. La deuxième phase du traitement est la phase de modification thermique proprement dite. Le bois est élevé à une température fixée entre 180 et 225 °C, durant 2 à 3 heures, en fonction de l'utilisation finale des bois. À ce stade, il est obligatoire que l'atmosphère soit

appauvrie en oxygène afin de provoquer la pyrolyse des bois et non sa combustion.

3. Refroidissement. La durée de cette troisième phase est d'environ 15 heures. La vitesse de refroidissement est contrôlée attentivement car une trop forte différence de température entre le bois et l'air peut induire une fissuration des bois. Le refroidissement est couplé avec une phase de ré-humidification progressive des bois jusqu'aux taux d'humidité du bois en service, souvent entre 4 et 7 % pour du bois traité thermiquement.

Évolution de la température en fonction du temps lors du procédé ThermoWood® (source : *heatwood.se*).





(1) Planches de bouleau avant traitement dans le four Jartek® à l'entreprise Bois durable de Bourgogne. (2 et 3) Traitement des planches de bouleau dans le four Jartek® (1 m³) et les deux grands autres fours Jartek® de 20 m³ de l'entreprise Bois durable de Bourgogne.

dation des hémicelluloses hydrophiles de la paroi cellulaire (diminution du nombre de groupes hydroxyles disponibles pour les liaisons hydrogènes avec l'eau). Les essais avec le bouleau montrent que l'humidité d'équilibre diminue lorsque la température de traitement augmente. Ces modifications conduisent à une plus grande stabilité dimensionnelle des bois traités et ainsi à d'autres possibilités de mise en œuvre dans des applications intérieures et extérieures.

Ces modifications dans les parois cellulaires entraînent également une diminution de la masse volumique à humidité d'équilibre des éprouvettes Traité par rapport à celles Blanco (comparaison de la masse de deux pièces de bois de volume identique conservées dans des conditions identiques). L'infra-densité, rapport entre deux mesures reproductibles (la masse des éprouvettes anhydres et leur volume quand elles sont saturées en eau), a également été mesurée. Celle-ci a augmenté après traitement bien que la masse anhydre du bois ait diminuée, en raison de la dégradation de la paroi cellulaire des constituants¹¹. Ces résultats montrent que la réduction du volume saturé est plus importante que la réduction de masse résultant de la dégradation des constituants cellulaires du bois (en particulier l'hémicellulose).

En parallèle, le retrait volumique total (qui représente la diminution du volume du bois entre l'état saturé et anhydre en rapport avec l'état saturé) diminue considérablement suite au traitement thermique.

La stabilité dimensionnelle du bois peut être calculée par l'efficacité anti-retrait, c'est-à-dire le rapport entre la différence de retraits volumiques (Blanco moins Traité) et le retrait volumique Blanco. Le traitement confère ainsi de 40 à environ 55 % de gain de stabilité pour les espèces étudiées ici. Les résultats de l'étude sur le bouleau montrent aussi que plus les températures atteintes lors du traitement thermique sont élevées, plus la stabilité du matériau est augmentée. La stabilité dimensionnelle est, comme la durabilité, une des principales propriétés améliorées par le traitement thermique. Elle permet en effet de limiter la déformation des ouvrages soumis à de forts changements d'humidité (en extérieur par exemple).

Les propriétés mécaniques sont, elles, influencées différemment : le module d'élasticité en flexion statique et la dureté augmentent légèrement tandis que les résistances à la rupture en flexion statique et dynamique sont fortement réduites.

Les valeurs du module d'élasticité en flexion statique des éprouvettes Traité sont significativement plus élevées que celles Blanco, de 6 % pour le chêne et le frêne et jusqu'à 11 % pour le hêtre. Cependant, le traitement thermique ne montre pas d'effet significatif sur le module d'élasticité du bois de bouleau quelle que soit la température de traitement. L'augmentation de la rigidité induite par le traitement des bois peut être un avantage pour une utilisation en structure. Cet effet est attribué notamment à une augmentation de la

Tableau 1. Propriétés physiques et mécaniques mesurées sur des éprouvettes normalisées « Blanco » et « Traité » de chaque espèce (H, humidité d'équilibre ; ρ_{12} , masse volumique du bois à 12 % d'humidité ; R_s , infra-densité ; β_{vol} , retrait volumique total ; E, module d'élasticité en flexion statique ; σ_f , résistance à la rupture en flexion statique ; K, résistance à la rupture en flexion dynamique ; N, dureté).

Four	Espèce	Temp. (°C)	Blanco/ Traité	H (%)	ρ_{12} (kg/m ³)	R_s (kg/m ³)	β_{vol} (%)	E (MPa)	σ_f (MPa)	K (J/cm ²)	N (-)
Besson®	Chêne	190	Blanco	12,2	701	547	14,8	12868	94	6	1,4
			Traité	5,1	638	559	9,1	13587	48	2,6	1,6
			%*	-58	-9	2	-39	6	-49	-57	9
	Frêne	220	Blanco	11,4	694	545	15	13521	108	8,5	1,9
			Traité	5,2	623	558	8,9	14342	80	3,4	2,3
			%*	-54	-10	2	-41	6	-26	-60	22
	Hêtre	215	Blanco	11,8	702	552	17,4	14613	112	9,7	1,6
			Traité	5,1	673	587	10,5	16272	77	4,3	1,8
			%*	-57	-4	6	-40	11	-31	-56	17
Jartek®	Bouleau	180	Blanco	11,94	648	521	18	15042	98	4,5	1,13
			Traité	8,43	653	541	14	15625	73	1,1	1,38
			%*	-29	1	4	-22	4	-26	-76	22
	Bouleau	200	Blanco	11,96	661	523	18	15240	102	4,4	1,12
			Traité	6,91	639	550	11	15206	51	0,8	1,41
			%*	-42	-3	5	-39	0	-50	-82	26
	Bouleau	220	Blanco	11,71	654	510	18	14706	99	4,3	1,12
			Traité	5,53	602	545	8	15007	40	0,7	1,3
			%*	-53	-8	7	-56	2	-60	-84	16

* Différence relative par rapport au Blanco $((T-B)/B)$



Au-dessus : planches de bouleau Blanco et Traité à 220, 200 et 180 °C.

En dessous : planches de chêne, hêtre et frêne Blanco et Traité.



quantité de cellulose cristalline, résultant de la dégradation préférentielle de la cellulose amorphe¹. YILDIZ & GÜMÜSKAYA (2007) ont montré que la proportion de la forme la plus dense de cellulose augmente avec une intensité croissante du traitement thermique.

L'augmentation de la dureté est de l'ordre de 20 % pour la plupart des espèces étudiées (sauf pour le chêne) et ne varie pas significativement avec la température de traitement dans le cas du bouleau. Cette augmentation de la dureté peut être expliquée par la réticulation de la lignine : la dureté du bois résulte, au moins en partie, de la lignification des parois cellulaires. En pratique, la dureté correspond à la résistance du bois à l'écrasement, l'amélioration de cette propriété est donc intéressante pour des usages tels que les planchers ou les terrasses.

Le traitement thermique a un effet sur la résistance à la rupture en flexion statique pour toutes les espèces étudiées ; la diminution induite par le traitement allant d'environ 25 % jusqu'à atteindre 60 % pour le bouleau traité à 220 °C. Mais c'est sur la contrainte de rupture en flexion dynamique, que l'effet du traitement thermique est le plus important : la résistance du chêne, du hêtre et du frêne a diminué d'environ 60 % et d'environ 80 % dans le cas du bouleau. Ainsi, le bois devient plus cassant suite au traitement thermique. Cela peut s'expliquer notamment par l'apparition de nombreuses microfissures formées pendant le

traitement²⁰. La réduction de la résistance à la rupture en flexion statique et dynamique limite l'utilisation des bois traités dans les applications structurales, mais n'est pas restrictive pour une utilisation en bardage. Dans certains cas, cependant, ce problème peut être contourné en augmentant les sections du bois.

Résultats des tests de durabilité

Les pertes de masse subies par les éprouvettes (Blanco et Traité) après 16 semaines d'exposition au champignon sont présentées dans le tableau 2. Conformément à la norme, les classes de durabilité ont été déterminées sur la base des valeurs médianes des pertes de masse les plus importantes induites par le champignon le plus agressif, soit ici le *Coriolus versicolor*. Le bois de cœur de chêne a gagné deux classes de durabilité et est devenu très durable (classe 1) après le traitement thermique. La durabilité du frêne est passée de la classe 5 à la classe 1, passant de « non durable » à « très durable ». Le hêtre a gagné deux classes de durabilité et est devenu « modérément durable ». Le traitement à 180 °C est inefficace du point de vue de la durabilité pour le bois de bouleau. Le traitement à 200 °C ne fait gagner qu'une classe de durabilité, tandis que celui à 220 °C permet au bouleau de passer en classe 3 de durabilité.

Le traitement thermique prévient la dégradation du bois par des champignons lignivores, en les privant de l'humidité nécessaire à leur croissance. L'augmentation de la durabilité s'explique principalement par :

- la réduction de l'hygroscopicité qui limite l'adsorption d'eau par la paroi cellulaire,
- la dégradation de l'hémicellulose, qui est une source importante de nutrition,
- des réarrangements au sein du complexe lignine-carbohydrate qui perturbent la reconnaissance du substrat par les champignons lignivores,
- la production d'extraits à effet fongicide.

Éprouvette de chêne Blanco (1) et Traité (2) juste avant la rupture en flexion statique. Essai de dureté (3). Essais de résistance à la rupture en flexion dynamique (choc) (4). Éprouvettes de bouleau Blanco et Traité destinées aux essais mécaniques (5).



Tableau 2 – Pertes de masse médianes (%) (et écarts-types entre parenthèses) causées par *Coniophora puteana* et *Coriolus versicolor* sur les éprouvettes normalisées (Blanco et Traité) de chaque espèce et classification selon la CEN/TS 15083-1 (2005).

	Perte de masse médiane (%)				Classe de durabilité (CEN/TS 15083-1/2005)*	
	<i>Coniophora puteana</i>		<i>Coriolus versicolor</i>		Blanco	Traité
	Blanco	Traité	Blanco	Traité		
Chêne (190 °C)	1,3 (0,7)	0,9 (0,7)	11,3 (7,6)	4,2 (3,1)	3	1
Frêne (220 °C)	11,9 (4,6)	0,22 (0,6)	31,7 (2,4)	1,79 (6,0)	5	1
Hêtre (215 °C)	29,4 (7,4)	0,4 (2,0)	37,2 (3,5)	13,2 (8,5)	5	3
Bouleau (180 °C)	43,70 (3,99)	35,06 (6,43)	35,81 (3,95)	33,53 (5,76)	5	5
Bouleau (200 °C)	44,84 (3,57)	13,82 (6,45)	35,57 (3,54)	18,16 (4,92)	5	4
Bouleau (220 °C)	41,60 (4,45)	0,40 (0,50)	35,12 (3,01)	12,88 (4,65)	5	3

* La perte de masse maximale autorisée pour accéder aux classes de durabilité 1, 2, 3 et 4 est respectivement de 5, 10, 15 et 30 % (correspondant à un bois très durable, durable, modérément durable et légèrement durable) ; au-delà de ce seuil, l'espèce est classée comme non durable.

Éprouvettes de bouleau Blanco (à gauche) et Traité (à droite) en contact avec le *Coniophora puteana* (1). Préparation et conditionnement des éprouvettes destinées aux essais de durabilité en chambre conditionnée (2 et 3).

Le traitement thermique est généralement plus efficace contre les champignons de pourriture brune, du fait de la destruction des hémicelluloses qui constituent une partie de leur source d'énergie. La cellulose et les lignines commencent à se dégrader à 260 °C et restent donc accessibles aux champignons de pourriture blanche qui dégradent préférentiellement ces deux constituants. Un traitement thermique plus sévère que ceux actuellement réalisés serait inutile à cause des importantes dégradations que subiraient certaines propriétés mécaniques. Trouver un équilibre acceptable entre l'augmentation de la durabilité et la réduction des propriétés mécaniques est primordial (encart 2). Après traitement, seuls le frêne et le chêne pourraient être utilisés en classe d'emploi 5. Le hêtre et le bouleau traités à 220 °C passent en classe d'emploi 2 voire 3.



Encart 4. Scidus

Fort de sa philosophie « Made in Belgium et 100 % naturel », Scidus, labellisé « bois local », est actuellement la seule entreprise réalisant le traitement thermique du bois en Wallonie.

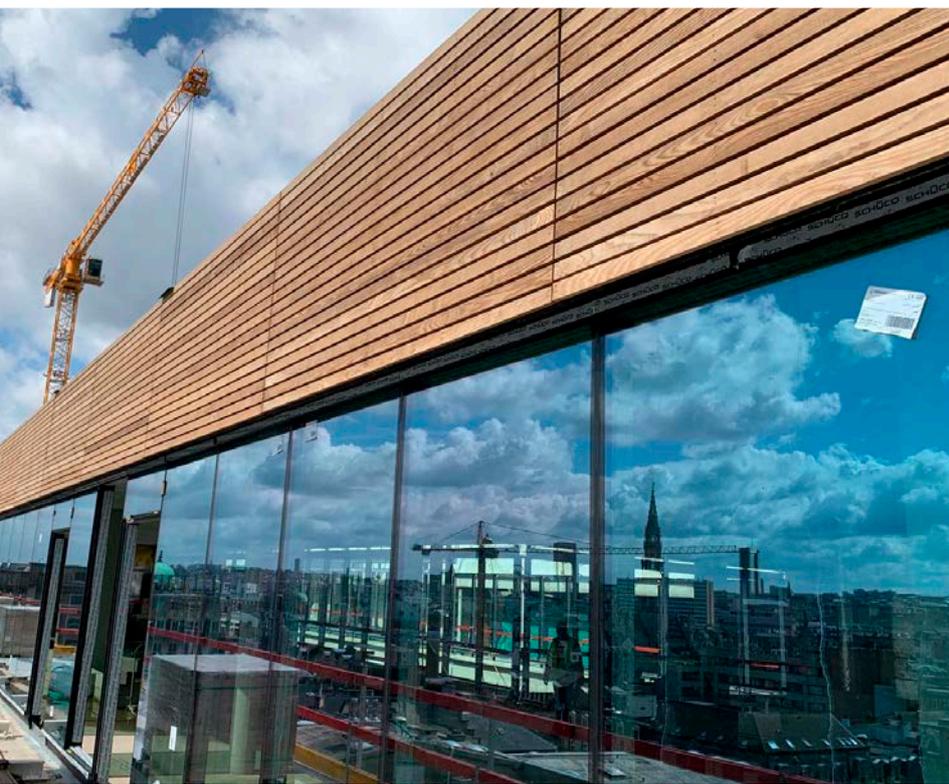
Pour les dirigeants de Scidus, le bois local est actuellement encore sous valorisé et sous exploité. En créant de nouveaux matériaux grâce au traitement thermique, ce bois peut être valorisé en produits de type « terrasse », « bardage » ou « parquet ». Leur décision d'investir dans cette technologie a été guidée par leur volonté de favoriser l'économie locale et de participer à la dé-carbonisation en minimisant les transports. Leur choix s'est porté sur deux fours de thermo-traitement sous vide, d'une capacité comprise entre 18 et 24 m³ de bois.

Les principales essences sciées et thermo-traitées sont le peuplier, le hêtre et le frêne. Le volume de grumes sciées est passé de 5000 m³/an au démarrage des activités de la scierie Scidus, anciennement Dusausoit il y a environ 5 ans, pour passer à un volume compris entre 12000 et 15000 m³/an actuellement. Le rendement de sciage est approximativement de 40 %. Ce qui signifie que le volume de bois thermo-traité est passé de 2000 m³ d'avivés traités par an (il y a 5 ans) à un volume approximatif compris entre 4800 et 6000 m³/an.

À la question de l'avenir du bois traité, M. Dubois répond : « L'avenir du bois torréfié est selon nous très prometteur. On constate de plus en plus une évolution des mentalités de favoriser l'économie locale et un intérêt grandissant pour les produits à fort caractère écologique et social. Pourquoi utiliser des essences exotiques alors que nous pouvons utiliser des essences locales pouvant présenter, après transformation, des propriétés semblables ? » Mais il reste conscient que : « Le traitement thermique du bois nécessite de réaliser différentes démarches d'amélioration continue du procédé de thermo-traitement par "essais/erreurs" afin d'affiner la recette utilisée pour traiter le bois. ».

Caractéristiques des deux fours : les deux fours de thermo-traitement de marque « WDE Maspell » sont disposés sur des pesons pour le suivi de la perte de masse de la charge en cours de traitement. La pyrolyse est réalisée sous un vide partiel contrôlé pour éviter la carbonisation des avivés.





Conclusion

Les bois traités thermiquement par les procédés français Besson® et finlandais ThermoWood® ont montré une amélioration de la stabilité dimensionnelle et de la durabilité fongique (excepté pour le traitement à 180 °C du bouleau qui finalement ne montre pas un intérêt réel), principalement attribuée à la dégradation des hémicelluloses lors du processus de modification thermique. Après traitement, le frêne et le chêne pourraient être utilisés en classe d'emploi 5, tandis que le hêtre et le bouleau traité à 220 °C passent en classe d'emploi 2 voire 3, ce qui permettrait d'étendre leur usage en extérieur, par exemple en bardage ou en mobilier de jardin. De plus, l'amélioration de la stabilité dimensionnelle après traitement pour ces espèces offre également la possibilité de les utiliser en structures non porteuses comme les châssis de fenêtre ou les portes qui nécessitent une grande stabilité dimensionnelle. Ainsi, cela autoriserait, pour ces espèces de feuillus indigènes traitées par un traitement thermique spécifique mis au point par les entreprises, des usages réservés à certaines essences tropicales ; et ce serait une alternative à l'usage de produits biocides utilisés lors des traitements de préservation « classiques ».

Ne pas oublier cependant que le traitement a des effets variables sur les propriétés mécaniques. Le bois modifié thermiquement est légèrement plus rigide mais surtout plus cassant (diminution des résistances

à la rupture en flexion statique et dynamique), ce qui en limite l'utilisation dans certaines applications structurelles. Par contre, l'amélioration de la durabilité des bois traités est intéressante pour des usages tels que les planchers ou les terrasses.

Ces résultats doivent encourager le développement du traitement thermique en Wallonie. Toutefois, des analyses supplémentaires doivent être menées afin de valider les résultats. En effet, l'ajustement des paramètres de traitement (température, durée, humidité initiale du bois) permettra d'augmenter le potentiel en donnant un produit homogène répondant au mieux aux exigences des consommateurs mais il faudra tester également les effets de ces ajustements. D'autres essais sont à l'étude, notamment

en ce qui concerne la durabilité face aux insectes xylophages (capricorne des maisons, *Hyloterpes bajulus* sur le bois des résineux) ou encore la tenue dans le temps de la durabilité conférée. L'élaboration de normes pour la caractérisation de nouvelles propriétés des bois traités thermiquement, ainsi qu'une méthode rapide pour vérifier l'intensité et l'efficacité du traitement, seraient également importantes pour satisfaire ce marché porteur. ■

Bibliographie

- 1 Boonstra M.J., Van Acker J., Kegel E., Stevens M. (2007). Optimisation of a two-stage heat treatment process : durability aspects. *Wood Science and Technology* 41(1) : 31-57.
- 2 Candelier K., Dumarçay S., Pétrissans A., Desharnais L., Gérardin P., Pétrissans M. (2013). Comparison of chemical composition and decay durability of heat-treated wood cured under different inert atmospheres : nitrogen or vacuum. *Polymer Degradation and Stability* 98(2) : 677-1.
- 3 Candelier K., Tevenon M-F., Petrisans A., Dumarçay C., Gérardin P., Petrisans M. (2016). Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. *Annals of Forest Science* 73(3) : 571-583.
- 4 Curling S.F., Clausen C., Winandy J. (2001). *The effect of hemicellulose degradation on the mechanical properties of wood during brown rot decay*. IRG/WP, 01-20219.
- 5 CEN/TS 15083-1 (2005). *Durability of wood and wood-based products. Determination of the natural durability*

POINTS-CLEFS

- ▶ Le traitement thermique est considéré comme une alternative écologique aux produits de préservation chimiques du bois.
- ▶ L'amélioration de la stabilité dimensionnelle et de la durabilité conférée des bois traités offre de nouveaux débouchés dans la mise en œuvre en extérieur aux essences indigènes naturellement non durables.
- ▶ La recherche va aider les industriels à définir des procédures de traitement en visant le meilleur compromis entre les propriétés mécaniques d'une part, la stabilité dimensionnelle et la durabilité d'autre part.

of solid wood against food-destroying fungi, test methods. *Basidiomycetes*. Brussels: European Committee for Standardization.

- ⁶ **CEN/TS 15679** (2008). *Thermal Modified Timber - Definitions and characteristics*. European Committee for Standardization, Brussels.
- ⁷ **Esteves B.M., Pereira H.M.** (2009). Wood modification by heat treatment : a review. *BioResources* 4(1) : 370-404.
- ⁸ **Fojutowski A., Noskowiak A., Kropacz A.** (2009). Physical and mechanical properties and resistance to fungi of scots pine and birch wood modified thermally. *Drewno - wood* 52(181) : 43-62.
- ⁹ **Hill C.A.S.** (2011). *Wood Modification: chemical, thermal and other processes*. Wiley, Chichester.
- ¹⁰ **Kolin B., Stevanovic T.** (1996). The effect of temperature, density and chemical composition upon the limit of hygroscopicity of wood. *Holzforschung* 50(3) : 263-268.
- ¹¹ **Korkut S., Karayilmazlar S., Hiziroglu S., Sanli T.** (2010). Some of the properties of heat-treated sessile oak (*Quercus petraea*). *Forest Products Journal* 60(5) : 473-80.
- ¹² **Lawoko M., Henriksson G., Gellerstedt G.** (2006). Characterization of lignin-carbohydrate complexes (LCCs) of spruce wood (*Picea abies* L.) isolated with two methods. *Holzforschung* 60 : 156-161.
- ¹³ **NBN EN 113-2-2021**. *Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Méthode d'essai vis-à-vis des champignons basidiomycètes - Partie 2 : Détermination de la durabilité inhérente ou améliorée*. Bruxelles, Bureau de normalisation.
- ¹⁴ **NBN EN 335** (2013). *Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : Définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois*. Bruxelles, Bureau de normalisation.
- ¹⁵ **NBN EN 460** (1994). *Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois- Durabilité naturelle du bois massif- Guide d'exigences de durabilité du bois pour son utilisation selon les classes de risque*. Bruxelles, Bureau de normalisation.

- ¹⁶ **Niemz P., Hofmann T., Rétfalv T.** (2010). Investigation of chemical changes in the structure of thermally modified wood. *Maderas. Ciencia y tecnología* 12(2) : 69-78.
- ¹⁷ **Poncsák S., Kocaepe D., Bouazara M., Pichette A.** (2006). Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science and Technology* 40(8) : 647-63.
- ¹⁸ **Romagnoli M., Cavalli D., Pernarella R., Zanuttini R., Togni M.** (2015). Physical and mechanical characteristics of poor-quality wood after heat treatment. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 8 : 884-891.
- ¹⁹ **Sandberg D., Kutnar A.** (2016). Thermally modified timber: recent developments in Europe and North America. *Wood Fiber Sciences* 48 : 28-39.
- ²⁰ **Stanzl-Tschegg S., Beikircher W., Loidl D.** (2009). Comparison of mechanical properties of thermally modified wood at growth ring and cell wall level by means of instrumented indentation tests. *Holzforschung* 63 : 443-448.

Les auteurs tiennent à remercier Madame A. Bauvin, Messieurs L. Hadj et Y. Delzant pour leur assistance technique, ainsi que les sociétés Bois durable de Bourgogne et Dumoulin Bois pour la réalisation des traitements thermiques.

Les résultats synthétisés dans cet article proviennent des travaux de fin d'études de Maxime Ninane et Martin Boedts. Le travail de Maxime Ninane a également été publié dans la revue *BASE (Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement)* :

- **Ninane M., Pollet C., Hébert J., Jourez B.** (2021). Physical, mechanical, and decay resistance properties of heat-treated wood by Besson® process of three European hardwood species. *BASE* 25 (2) : 129-139.
- **Boedts M.** (2016). Influence de la température de traitement thermique du bois de bouleau sur ses propriétés physico-mécaniques et de durabilité. Travail de Fin d'Études. Gembloux Agro-Bio Tech.
- **Ninane M.** (2012). Étude des propriétés physico-mécaniques et de la durabilité de bois modifiés thermiquement. Travail de Fin d'Études. Gembloux Agro-Bio Tech.

Crédits photos. Laboratoire de Technologie du Bois (61, 63, 66, 67, 68 et 69), Scidus (70 et 71).

Caroline Pollet¹

Cécile Verheyen²

Benoît Jourez²

caroline.pollet@guest.uliege.be

¹ Gembloux Agro-Bio Tech, ULiège
Passage des Déportés 2 | B-5030 Gembloux

² Laboratoire de Technologie du Bois,
Centre wallon de recherches agronomiques
Avenue Maréchal Juin 23 | B-5030 Gembloux