

Propriétés physiques de bois peu durables soumis à un traitement de pyrolyse ménagée

Sylvie Mouras^{a,*}, Philippe Girard^a, Patrick Rousset^a, Pipin Permadi^a,
Danielle Dirol^b et Gilles Labat^b

^a CIRAD-Forêt, BP 5035, 34090 Montpellier Cedex 1, France

^b CTBA (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement), 10 av. de St Mandé, 75012 Paris, France

(Reçu le 29 Juin 2000 ; accepté le 4 Avril 2001)

Résumé – La pyrolyse du bois à basse température conduit à l'obtention d'un produit solide, intermédiaire entre le bois et le charbon de bois : le bois torréfié. L'objet de cette étude est l'optimisation du procédé et la détermination des caractéristiques du matériau et ses limites d'utilisation. Les paramètres de traitement étudiés sont le temps de palier intermédiaire à 150 °C, la température finale (entre 210 et 230 °C), le temps de palier à la température finale, la présence ou non de vapeur d'eau saturée. Certaines caractéristiques du matériau ont été mesurées pour décrire le comportement physique et mécanique du bois torréfié : humidité, retrait, reprise d'eau, résistance à la compression axiale et à la flexion statique, module d'élasticité. Des tests de résistance à différents agents biologiques (champignons et insectes) ont également été réalisés pour évaluer la durabilité conférée par le traitement thermique. Les résultats montrent que les propriétés acquises par le bois à travers un traitement de torréfaction sont très sensibles aux paramètres du procédé, et en particulier le temps de séjour à la température finale et la présence de vapeur d'eau. Le traitement doit être adapté à chaque essence pour obtenir un compromis entre caractéristique mécanique d'une part et stabilité dimensionnelle et durabilité d'autre part.

traitement thermique / bois / stabilité dimensionnelle / durabilité / propriété mécanique

Summary – **Physical properties of non durable woods with a low temperature pyrolysis treatment.** Wood pyrolysis at low temperature results in a solid product intermediary between wood and charcoal: torrefied wood. The aim of this study was the optimisation of the process and the determination of the material end-use properties and utilisation limits. Residence times, final temperature and atmosphere were the process parameters studied. Some characteristics were measured to describe physical and mechanical behaviour of the material: moisture content, anti-shrink efficiency, compression and bending strength, modulus of elasticity. Resistance to different biological decay agents (fungi and insects) was also measured to estimate the durability conferred by the thermal treatment. The results show that the properties of the material are very sensitive to the process parameters, in particular the residence time and the presence of water vapour in the atmosphere. The thermal treatment must be adapted to the wood species and a compromise must be found in the treatment between mechanical properties on one hand and dimensional stability and durability on the other hand.

low temperature pyrolysis / wood / dimensional stability / durability / mechanical property

* Correspondance et tirés-à-part

Tél. : 33 4 67 61 65 11 ; Fax : 33 4 67 61 65 15 ; e-mail : sylvie.mouras@cirad.fr

1. INTRODUCTION

La pyrolyse du bois à basse température conduit à l'obtention d'un produit solide, intermédiaire entre le bois et le charbon de bois : le bois torréfié. Aussi appelé charbon roux [10] il a d'abord attiré l'attention des scientifiques pour ses qualités énergétiques, et de nombreuses recherches ont été menées pour expliquer le processus de transformation et rationaliser les procédés [4, 5, 9].

Quelques années plus tard, plusieurs centres de recherche se sont intéressés aux propriétés de ce matériau pour envisager une utilisation en bois d'œuvre. En effet, les premiers résultats ont montré que la torréfaction à des températures comprises entre 210 et 250 °C pouvait améliorer la durabilité du bois et réduire son hygroscopicité [7, 8].

Des travaux ont alors porté sur l'analyse et les mécanismes réactionnels des modifications chimiques des constituants du bois en fonction de la température [2, 6, 18]. Les composés du bois les plus instables thermiquement (hémicelluloses) se décomposent en composés secondaires tels que l'acide acétique, acide formique et furfural. À l'issue de cette phase, le bois est dit torréfié, les hémicelluloses, responsables du comportement hygroscopique du bois, sont détruites et des recondensations se sont produites sur la structure de la lignine.

Différentes conditions de traitement ont été décrites dans la littérature : avec vapeur d'eau, sous pression de gaz inerte, sous contrainte (thermo-compression) [11–14, 16, 20, 22]. Toutes aboutissent à une réduction de l'hygroscopicité du bois et à une amélioration de sa résistance aux agents de dégradation. Par contre, on observe parallèlement une réduction des propriétés mécaniques du bois.

Ces travaux scientifiques ont parallèlement abouti à des dépôts de brevets (une quinzaine en tout) et des unités industrielles ont été mises en place. Parmi les principaux brevets européens, on peut citer :

- les brevets du VTT [23] en Finlande, ayant donné naissance à une installation industrielle ;
- les brevets de Armines [1], sur la base des travaux de l'école des mines de St Etienne, concernant le procédé dit de réification. Plusieurs unités industrielles ont vu le jour sur la base de ce procédé sous atmosphère inerte ;
- le brevet de Ruyter aux Pays Bas [19] exploité par Shell puis par la société Plato. Il s'agit ici d'un procédé sous pression de vapeur. Une unité industrielle de

grande capacité a été implantée et commence à produire depuis l'été 2000 ;

- le brevet de Montornès [17] exploité par la société ABC Industries qui n'est plus en activité.

Malgré les installations industrielles existantes, il n'y a encore pas de production massive de bois torréfié et les utilisations qui en sont faites relèvent souvent encore du stade de la démonstration.

Les applications possibles sont pourtant nombreuses et pourraient permettre la valorisation d'essences à faible valeur marchande ou d'essences difficilement imprégnables. Le traitement thermique représente également une alternative aux produits chimiques de préservation qui sont directement visés par les directives sur la protection de l'environnement. Le procédé de torréfaction ne présente qu'un faible impact sur l'environnement si les rejets gazeux et liquides sont maîtrisés. Par ailleurs, l'élimination des bois torréfiés en fin de vie ne présente aucune difficulté : sa combustion ne génère pas de produits toxiques et on peut valoriser son contenu énergétique, qui est supérieur à celui du bois.

Dans le cadre d'un important programme soutenu par la CEE de 1996 à 1998, plusieurs partenaires scientifiques et industriels se sont regroupés (ABC Industrie (F), Bengolea SA (E), Cirad (F), CTBA (F), Imprelorraine (F), ITC (F), Maderas Vitores (E), Metsäpuu Oy (Fin), Pellerin SA (F), SPT (Fin), VTT (Fin)). L'objectif de ce travail est l'optimisation du procédé pour différents types d'essence pour obtenir un compromis entre les propriétés d'hygroscopie et les propriétés mécaniques qui soit acceptable pour une utilisation en huisseries de fenêtre. Il s'agit donc de déterminer les caractéristiques du matériau dans différentes conditions de traitement, ainsi que ses limites d'utilisation.

2. MATÉRIEL ET METHODES

2.1. Matériau utilisé

Différentes espèces de bois ont été traitées : nous présentons ici les résultats sur le peuplier (*Populus Robusta*) et le Curupixa (*Micropholis* spp., Brésil). Le peuplier est abondant en Europe mais est principalement valorisé dans l'emballage à cause de sa faible résistance aux agents biologiques de dégradation du bois d'une part, et de sa moyenne densité d'autre part. Le Curupixa est une essence brésilienne importée depuis une dizaine d'années en tant que matière première de menuiseries extérieures.

Le volume d'importation en France est d'environ 6000 m³ de sciages par an. C'est actuellement une des principales essences utilisées en France pour la fabrication de fenêtres. Bien que plus résistante que le peuplier, cette essence nécessite quand même un traitement de préservation pour une utilisation extérieure.

2.2. Traitement thermique

Le traitement thermique du bois a été réalisé dans deux réacteurs. Le premier réacteur est un pilote de 1 m³. De l'air chauffé par un brûleur extérieur air-propane est envoyé dans un échangeur de chaleur. Un ventilateur met en circulation l'atmosphère du réacteur (en particulier les gaz de réaction formés au cours du traitement) à travers l'échangeur. Ce système de chauffage du réacteur permet de contrôler parfaitement les paramètres thermiques tout en évitant d'introduire de l'air dans le réacteur.

La température est mesurée en haut, au milieu et en bas du réacteur, ainsi que dans le bois. Le contrôle de la température est géré par le thermocouple situé en haut du réacteur.

Le traitement est conduit en cinq étapes :

1. chauffage de la température ambiante à 150 °C, à une vitesse de 2 °C / min ;

2. palier à 150 °C pour permettre l'homogénéisation de la température dans le bois ;
3. chauffage de 150 °C à la température finale désirée, à une vitesse de 1 °C/ min ;
4. palier à la température finale ;
5. refroidissement.

Le deuxième réacteur utilisé est un four à résistance électrique pouvant être rempli de vapeur d'eau saturée. La présence de vapeur est prévue, à l'origine pour permettre un chauffage rapide du bois en évitant son éclatement, et permettre également d'avoir une atmosphère pauvre en oxygène. Dans ce réacteur, la température est contrôlée par des sondes situées dans le bois, ce qui fait que le temps de palier intermédiaire n'est pas imposé par l'utilisateur mais par la vitesse de séchage du bois.

Les paramètres de traitement étudiés sont le temps de palier à 150 °C, la température finale, le temps de palier à la température finale, la présence ou non de vapeur d'eau saturée au cours de la réaction. Dans le deuxième réacteur, le profil de température est du même type avec un palier entre 100 et 150 °C beaucoup plus long, qui dépend du bois. Le *tableau I* indique les valeurs des paramètres qui ont été utilisées.

Tableau I. Description des traitements appliqués.

Essence	Temps de palier à 150 °C (min)	Température finale (°C)	Temps de palier à la température finale (min)	Vapeur d'eau saturée	Référence traitement	
Peuplier	30	210	60	Non	P2	
			90	Non	P3	
		220	30	Non	P4	
			60	Non	P5	
	180	220	230	30	Non	P6
				60	Non	P8
		195	220	120	Oui	P IX
				60	Oui	P VIII
Curupixa	30	210	60	Non	C2	
			90	Non	C3	
		220	30	Non	C4	
			60	Non	C5	
	520	210	30	Non	C6	
			120	Oui	C V	
			240	Oui	C VII	

2.3. Mesure des propriétés physiques

Nous avons sélectionné certaines caractéristiques du matériau pour aborder la description quantitative et qualitative du comportement physique et mécanique du bois torréfié. Les caractéristiques choisies sont : l'humidité [24], la masse volumique [25], la stabilité dimensionnelle [26], la résistance à la compression axiale [27], la résistance à la flexion statique [28], le module d'élasticité [29]. La reprise d'eau a également été évaluée sur des éprouvettes de dimensions $150 \times 30 \times 30$ mm dont l'extrémité a été enfouie sur une longueur de 30 mm dans de la vermiculite réhumidifiée à sa capacité maximale de rétention d'eau (350 %). Les éprouvettes ont été laissées dans une pièce climatisée (20 °C, 65 %). Chaque éprouvette a été pesée régulièrement durant 9 jours. La reprise d'eau est exprimée en pourcentage après pesée des éprouvettes au début de l'expérience et durant le conditionnement.

Des tests de résistance à différents agents biologiques ont également été réalisés pour évaluer la durabilité conférée par le traitement thermique. Ils sont résumés dans le *tableau II*.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Propriétés physiques

3.1.1. Détermination de l'humidité et de la masse volumique

Le traitement thermique et le dégagement gazeux qui en résulte ont pour conséquence une perte de masse des

échantillons qui se situe entre 5 et 12 % pour le peuplier et entre 1 et 9 % pour le Curupixa. On obtient les mêmes pertes de masse avec ou sans vapeur d'eau dans le traitement. Ceci correspond à une baisse de la masse volumique du bois.

Avat [2] a observé sur le peuplier, le pin et le douglas que jusqu'à 240 °C, la masse volumique apparente de ces essences n'a pratiquement pas diminué. Les variations notables de masse volumique se situent à partir de 260 °C.

De son côté, Bohnke [3] a constaté sur le pin, le hêtre et le douglas une augmentation à 220 °C puis une diminution à partir de 230 °C de la masse volumique. Deux phénomènes concurrents interviennent qui sont fonction de la température et de l'essence. Dans un premier temps, selon le niveau de température, l'augmentation de la masse volumique est attribuée à une réorganisation des composants macromoléculaires qui se traduit par une plus grande compacité de la matière. Ensuite c'est le phénomène de volatilisation des produits de dégradation qui devient prédominant et qui fait chuter la masse volumique.

L'état d'équilibre hydrique pour l'ensemble des échantillons torréfiés est toujours inférieur à celui des échantillons non traités, comme l'illustrent les valeurs obtenues pour le Curipixa (*figure 1*). Pour chaque humidité relative de l'air (30, 65 et 100 %), la teneur en humidité des échantillons témoins pour les deux espèces se stabilisent respectivement aux environs de 7, 13 et 30 %. Le taux d'humidité du peuplier traité se situe vers 3, 5 et 20 % respectivement. Il n'y a pas beaucoup d'écart entre les différents traitements excepté P6 (150 °C/30 min, 230 °C/30 min, sans vapeur) pour lequel le peuplier

Tableau II. Tests d'évaluation de la durabilité des bois.

Description	Référence de la méthode d'essai	Test réalisé sur
Résistance aux basydiomycètes (champignons de pourriture cubique et fibreuse) : mesure de la perte de masse du bois après 6 semaines d'exposition à différents champignons, en fonction de la nature du bois.	EN 113	Feuillus ou résineux
Résistance aux champignons de pourriture molle : mesure de la perte de masse du bois après 6 semaines d'exposition	ENV 807	
Résistance à <i>anobium punctatum</i> (petite vrillette)	EN 21	Attaque de l'aubier
Résistance à <i>Lyctus Brunneus</i>	EN 20-1	Attaque de l'aubier des feuillus durs riches en amidons
Résistance aux termites (<i>reticulitermes santonenis</i>) Examen visuel et codage (de 0 à 4) du degré de destruction des échantillons	EN 117	Feuillus ou résineux

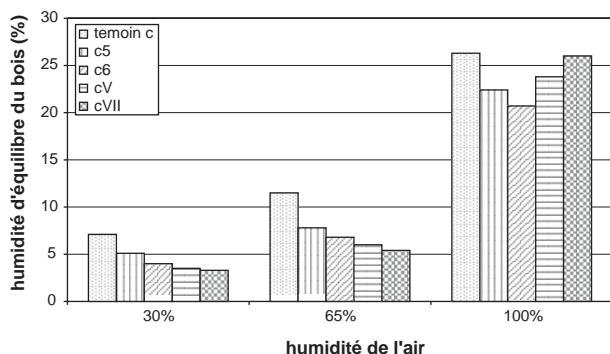


Figure 1. Évolution de l’humidité d’équilibre du Curupixa traité en fonction de différentes conditions climatiques.

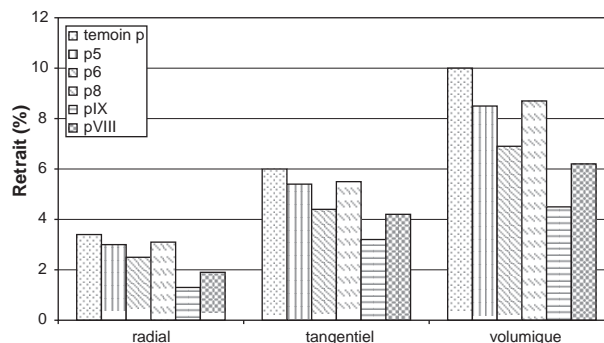


Figure 2. Coefficient de retrait du Peuplier après traitement.

s’équilibre à une humidité un peu plus forte : 4, 8, 26 % respectivement. Les différences sont plus marquées avec le Curupixa : les humidités d’équilibre les plus basses sont obtenues avec les traitements C6 (150 °C/30 min, 230 °C/30 min, sans vapeur), C V (110 °C/520 min, 210 °C/ 120 min, avec vapeur) et C VII (110 °C/300 min, 210 °C/240 min, avec vapeur).

Le bois torréfié a donc perdu en partie son caractère hygroscopique. L’explication donnée par les auteurs est la dégradation des constituants de bois, essentiellement des hémicelluloses qui sont les composants les plus hygroscopiques de la paroi cellulaire. Cette dégradation affecte les groupements hydroxyles des hémicelluloses qui interviennent dans la reprise d’humidité en formant des liaisons –H avec les molécules d’eau. La dégradation des hémicelluloses dépend de la température du bois. Elle commence à partir de 180 °C, et elle se poursuit avec l’augmentation de la température, mais la dégradation est plus lente à 210 °C et 220 °C et elle devient plus significative à partir de 220 °C [2]. Dans notre cas, on observe bien un taux d’humidité plus faible à 230 °C pour les traitement à sec. La présence de vapeur d’eau permet d’obtenir la même valeur d’humidité dès 210 °C.

3.1.2. Influence du traitement sur la stabilité dimensionnelle

Les figures 2 et 3 donnent la valeur des retraits mesurés des deux espèces étudiées. Tous les traitements thermiques permettent de réduire les retraits volumiques du bois en conditions extrêmes. L’importance de cette stabilité acquise est étroitement liée à la durée et à la température finale du traitement.

Les meilleurs résultats sont observés avec les traitements P VIII (110 °C/260 min, 220 °C/ 60 min, avec va-

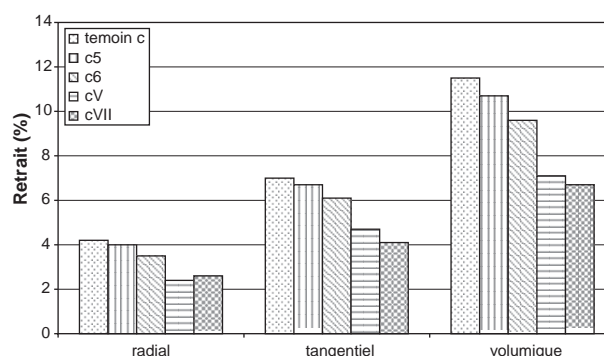


Figure 3. Coefficient de retrait du Curupixa après traitement.

peur), P IX (110 °C/195 min, 220 °C/120 min, avec vapeur), C V (110 °C/520 min, 210 °C/120 min, avec vapeur) et C VII (110 °C/300 min, 210 °C/240 min, avec vapeur), c’est-à-dire avec les traitements ayant des temps de palier longs aussi bien à 150 °C qu’à 220 °C, ainsi que présence de vapeur d’eau saturée.

Pour comprendre l’influence des différents paramètres, on compare les traitements P5 (150 °C/30 min, 220 °C/60 min, sans vapeur), P8 (150 °C/180 min, 220 °C/60 min, sans vapeur), P VIII (110 °C/260 min, 220 °C/60 min, avec vapeur) et P IX (110 °C/195 min, 220 °C/120 min, avec vapeur) du peuplier.

La différence entre les traitements P5 et P8 est la longueur du palier à 150 °C qui est respectivement de 30 minutes et 180 minutes. On observe que les valeurs de retrait sont équivalentes pour ces deux traitements. La durée du palier initial ne semble donc pas jouer de rôle sur les propriétés de retrait/gonflement du bois.

P8 et P VIII diffèrent par le temps de palier à 150 °C et la présence de vapeur d’eau dans P VIII. Si l’on admet

que le temps de palier n'a pas d'influence, les meilleurs résultats de retrait pour P VII pourraient donc être dus à la vapeur d'eau.

Ensuite, entre P VIII et P IX, la durée de palier à 220 °C passe de 60 à 120 minutes. L'échantillon P IX est plus stable. La durée de séjour à la température finale est donc également importante pour les propriétés du bois.

Les résultats sur le Curupixa permettent d'aboutir aux mêmes conclusions.

3.1.3. Reprise d'eau

Les variations de masse dans le temps des éprouvettes de Curupixa immergées dans l'eau sont représentées sur la figure 4 pour le témoin et deux des traitements appliqués.

D'un point de vue cinétique, on voit que le traitement thermique ralentit considérablement la reprise d'eau du bois. Cependant, la courbe reste ascendante, ce qui signifie qu'à terme, le bois traité reprendra la même quantité d'eau que le témoin. Ceci est confirmé également par les mesures d'humidité d'équilibre obtenues en atmosphère saturée, dont les valeurs ne sont pas beaucoup plus faibles après un traitement thermique (figure 1).

Le fait que le bois traité thermiquement reprenne plus lentement l'eau ou l'humidité reste très intéressant pour les emplois du bois en extérieur, où les expositions à l'eau sont souvent de courte durée.

3.2. Influence de la température et du temps de traitement sur les propriétés mécaniques

Les caractéristiques mécaniques sont fortement liées à l'anisotropie du bois, sa densité et son humidité. C'est

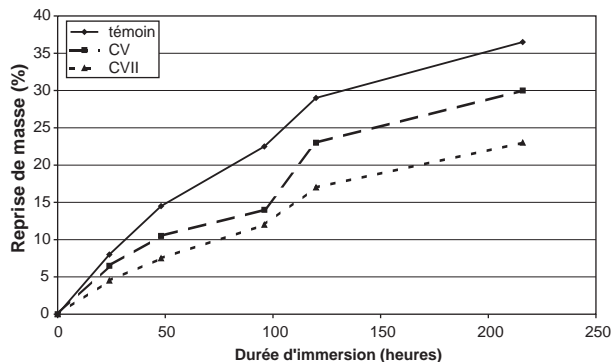


Figure 4. Reprise d'eau dans le Curupixa.

pourquoi les résultats de contrainte à la rupture doivent être comparés en tenant compte des variations de masse volumique et d'humidité d'équilibre des bois traités par rapport au témoin.

3.2. Compression axiale

La compression axiale est étroitement liée à la densité du bois. La courbe des valeurs de contrainte à la rupture en compression axiale, toute essence confondue, en fonction de la masse volumique peut être corrélée avec une droite : les valeurs les plus basses concernent logiquement le peuplier et les plus hautes, le Curupixa (figure 5). Les bois torréfiés suivent également cette droite, c'est-à-dire que la valeur de la résistance à la compression axiale d'un bois torréfié est équivalente à celle d'un bois de masse volumique équivalente.

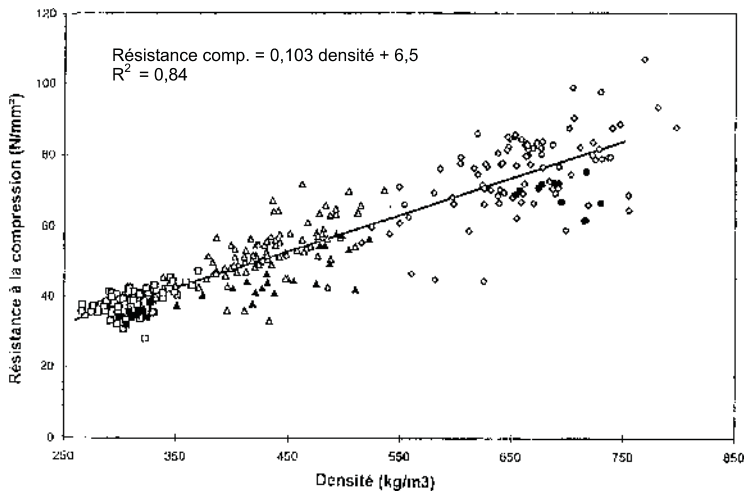


Figure 5. Contraintes de rupture à la compression en fonction de la masse volumique des éprouvettes. ■ peuplier témoin, □ peuplier traité, ▲ épicéa témoin, △ épicéa traité, ● Curupixa témoin, ○ Curupixa traité.

Si on compare les traitements entre eux, il n'y a cependant pas de différence significative entre les échantillons traités selon les deux procédés (résistance de l'ordre de 38 MPa pour le peuplier et de 70 MPa pour le Curupixa).

Bohnke [3] a mesuré par la même méthode la résistance à la compression d'échantillons de bois torréfié : elle constate que la contrainte de rupture en compression reste inchangée jusqu'à 270 °C (avec une importante dispersion des résultats).

3.2.2. Flexion statique et module d'élasticité

Les résistances à la rupture en flexion statique sont données dans le *tableau III*.

Pour les traitements à faible température et/ou temps de palier court, la contrainte à la rupture en flexion reste quasi stable. Les traitements plus sévères, à partir de 220 °C et 60 min, induisent une baisse de la résistance en flexion, de l'ordre de 15 à 20 %. Les traitements avec vapeur d'eau induisent les plus fortes diminutions de contrainte à la rupture, supérieure à 30 %. On note aussi une dispersion de plus en plus forte des résultats.

Bohnke [3] a obtenu le même type de résultats sur des mesures de propriétés mécaniques réalisées par méthode ultrasonore. Ces résultats sont attribués à deux phénomènes :

- Un changement de la structure de la lignine par recondensation des produits de dégradation : il y a formation temporaire d'un réseau tridimensionnel plus dense qui protège les fibres et retarde le transfert de chaleur.
- Un changement d'état de la cellulose (zone amorphe).

Jusqu'à 230 °C, la réduction de la contrainte est maintenue dans une fourchette de 15 à 20 % en fonction de l'essence, une chute de 50 % et plus est observée au delà de 240 °C.

Ceci a également été démontré par RMN du ^{13}C [21].

En admettant comme précédemment que le temps de palier initial à 150 °C n'a pas d'influence directe sur les propriétés finales du bois, on peut comparer les traitements P5 et P VIII, qui ont la même température finale (220 °C) et le même temps de palier à cette température (60 min). La seule différence entre les deux traitements est la présence de vapeur d'eau. Il semble que la vapeur d'eau favorise une dégradation plus forte du matériau, probablement par hydrolyse.

Le *tableau IV* présente les valeurs du module d'élasticité. Il n'y a pas de réduction significative du module d'élasticité dans les conditions expérimentales étudiées. Ainsi, le module d'élasticité du bois torréfié est sensiblement le même que celui d'un bois non traité. La vapeur d'eau n'a pas d'influence sur le module d'élasticité.

Bohnke [3] a réalisé l'étude du comportement mécanique de bois traités thermiquement (hêtre, peuplier, douglas). Entre autre, elle a mesuré le module élastique longitudinal par méthodes dynamique et statique. Nos résultats sont en accord avec ses observations selon lesquelles le module ne varie pas jusqu'à 270 °C (température maximale étudiée).

Ses résultats sur le bois traité sont accompagnés d'une grande dispersion, ce que nous observons également.

En résumé, le module d'élasticité et la résistance à la compression ne sont pas modifiés par les traitements,

Tableau III. Contraintes de rupture en flexion statique du peuplier et du Curupixa en fonction des traitements.

Traitement	Curupixa		Traitement	Peuplier	
	Moyenne (MPa)	CV (%)		Moyenne (MPa)	CV (%)
Témoin	107,4	13,8	Témoin	53,0	14,9
C2	112,3	21,7	P2	50,9	15,3
C3	103,1	20,5	P3	50,8	14,4
C4	79,7	37,9	P4	50,6	17,7
C5	89,7	24,2	P5	44,4	16,9
C6	90,7	30,9	P6	42,3	9,2
C V	71,8	31,8	P VIII	35,4	28,5
C VII	71,3	36,2	P IX	30,4	27,9

Tableau IV. Modules d'élasticité du peulier et du Curupixa en fonction des traitements.

Curupixa			Peuplier		
Traitement	Moyenne (MPa)	CV (%)	Traitement	Moyenne (MPa)	CV (%)
Témoïn	15462	11,2	Témoïn	7016	8,3
C2	17341	13,2	P2	7108	12,9
C3	17223	13,6	P3	7847	7,6
C4	13459	32,4	P4	7757	6,7
C5	15913	16,5	P5	7407	13,2
C6	17400	18,0	P6	7291	12,7
C V	15666	18,9	P VIII	7646	6,7
C VII	15652	23,3	P IX	7284	10,9

alors que la résistance à la flexion peut être affaiblie pour les traitements trop longs, ou avec vapeur d'eau.

Les propriétés d'élasticité et de compression sont dues aux fibres du bois qui ne semblent donc pas endommagées par les traitements étudiés. Les propriétés de flexion sont influencées par la résistance du bois en surface. Les résultats obtenus semblent indiquer que pour certains traitements, le bois est davantage endommagé en surface qu'au cœur. Étant donné le faible coefficient de transfert thermique du bois, le cœur n'est pas exposé aussi longtemps à la température maximale que la surface.

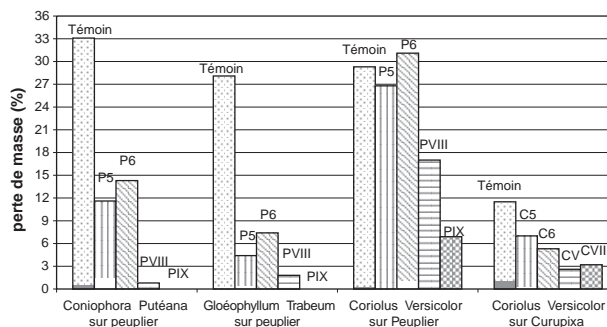
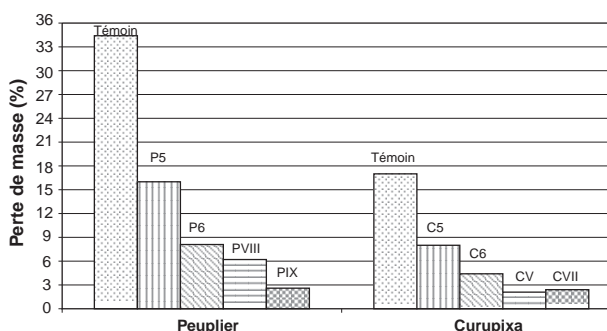
3.3. Essais biologiques

3.3.1. Résistance aux champignons

Un bois (traité ou non traité) est considéré comme durable si la perte de masse moyenne des éprouvettes exposées aux espèces de champignons de référence est inférieure à 3 %. Les résultats concernant nos essais sont donnés dans les figures 6 et 7.

Les témoins ont accusé une perte de masse suffisante pour valider le test excepté le Curupixa qui est naturellement résistant aux champignons de pourriture brune (perte de masse inférieure à 3 % avec *Coniophora Putéana* et *Gloeophyllum Trabeum*) mais sensible à la pourriture blanche (*C. Versicolor*).

Les résultats obtenus avec le peulier sont bons vis-à-vis des champignons de pourriture cubique et mauvais vis-à-vis des champignons de pourriture fibreuse.

**Figure 6.** Perte de masse après exposition aux basidiomycètes.**Figure 7.** Perte de masse après exposition aux champignons de pourriture molle.

Les traitements P VIII et P IX, lui permettent de résister à la dégradation fongique par les basidiomycètes, excepté par *Coriolus Versicolor*. Seul le traitement P IX (110 °C/195 min, 220 °C/120 min, avec vapeur) permet

d'obtenir une bonne résistance aux champignons de pourriture molle.

Pour le Curupixa, les traitements avec vapeur d'eau permettent d'obtenir une bonne résistance à *C. Versicolor*. Les résultats avec les basidiomycètes en laboratoire sont convenables pour les séries C6 (150 °C/30 min, 220 °C/60 min, sans vapeur), C V (110 °C/520 min, 210 °C/120 min, sans vapeur) et C VII (110 °C/300 min, 210 °C/240 min, sans vapeur). On obtient la même tendance avec les champignons de pourritures molles.

De meilleurs résultats ont été obtenus sur peuplier par un traitement à 250 °C [8], pour lequel des pertes de masse inférieures à 1 % ont été obtenues pour les 3 champignons. Cependant, parallèlement, les caractéristiques mécaniques avaient chuté de 50 %. De bons résultats de durabilité ont été également obtenus avec le procédé PLATO [20] tout en contenant la perte de propriétés mécaniques à moins de 20 %. D'après les auteurs, c'est l'association d'un traitement hydrothermique et d'un traitement thermique sec qui permet d'obtenir ce résultat. Il faut noter aussi que dans ce procédé, les 2 étapes sont limitées à une température de 180 °C, ce qui est en dessous des températures de dégradation des composés du bois. D'autres auteurs enfin ont obtenu de mauvais résultats de durabilité vis-à-vis des champignons après traitement thermique [15].

Il semble que les traitements à la vapeur d'eau soient plus efficaces pour améliorer la durabilité du bois. Cependant, un traitement sans vapeur d'eau dont les températures et les temps de palier seraient optimisés devrait permettre d'obtenir un résultat équivalent.

3.3.2. Résistance aux insectes

3.3.2.1. Résistance à *Anobium punctatum*

Cet insecte commun des mobiliers s'attaque essentiellement aux bois durs, le peuplier est cependant sensible à ce type d'agression. Les résultats montrent une bonne efficacité des traitements puisque dans tous les cas on obtient un taux de mortalité des larves de 100 %.

3.3.2.2. Résistance à *Lyctus Bruneus*

Cet insecte peut se développer dans les bois durs (riches en amidon). La norme européenne EN 20-1 a été appliquée sur le Curupixa. Pour l'ensemble des traitements, aucun développement larvaire n'a été constaté même après une exposition supplémentaire d'un mois.

3.3.2.3. Résistance aux termites

Le bois est considéré comme résistant aux termites si l'ensemble des cotations est inférieure ou égale à 1. Après examen des échantillons, les résultats montrent l'inefficacité générale du traitement de torréfaction vis-à-vis des termites.

4. CONCLUSION

Ce travail a permis d'étudier l'évolution de propriétés et caractéristiques du bois torréfié en fonction des paramètres du traitement thermique.

Les propriétés acquises par le bois à travers un traitement de pyrolyse ménagée sont très sensibles aux paramètres du procédé, et en particulier :

- le temps de séjour à la température finale ;
- la présence de vapeur d'eau.

La présence de vapeur d'eau facilite l'amélioration de la durabilité et de la stabilité mais favorise également la diminution des propriétés mécaniques.

Le traitement doit permettre d'atteindre un compromis entre caractéristiques mécaniques d'une part et stabilité dimensionnelle et durabilité d'autre part. Les conditions de traitement doivent être adaptées à l'essence de bois considérée.

Par ailleurs, la pyrolyse ménagée ne permet pas de résoudre tous les problèmes des bois peu durables :

- le traitement ne confère pas de résistance aux termites ;
- la résistance à certains champignons (pourriture fibreuse notamment) n'est pas toujours assurée, sauf à réduire sensiblement les propriétés mécaniques ;
- la reprise d'humidité est plus lente que pour un bois natif mais à terme, dans des conditions extrêmes, le bois torréfié peut reprendre la même quantité d'eau.

Les résultats obtenus permettent de penser qu'on peut optimiser le procédé étudié ici et améliorer encore les aspects durabilité et stabilité dimensionnelle.

Remerciement : Les auteurs remercient la Commission Européenne pour le soutien financier qu'elle a bien voulu apporter à cette étude, les sociétés Pellerin et Metsäpuu Oy (menuiseries industrielles) pour leur contribution et leur implication dans la réalisation de ce travail, ainsi que le VTT en Finlande, qui a également largement participé à ce travail avec ses propres installations.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Armines, Brevets n° FR 2604942, FR 2751579, FR 2751580.
- [2] Avat F., Contribution à l'étude des traitements thermiques du bois (20–300 °C). Transformations chimiques et caractérisations physico-chimiques, Mémoire de thèse de l'École des Mines de Paris et de St Étienne, France, 1993, 240 pages.
- [3] Bohnke I., Étude expérimentale et théorique des traitements thermiques du bois : Caractérisation physico-mécanique du bois traité, Mémoire de thèse de l'École des Mines de Paris et de St Étienne, France, 1993.
- [4] Bourgeois J.P., Le bois torréfié, Forêt entreprise 25 (1985).
- [5] Bourgeois J., Guyonnet R., Études des utilisations énergétiques du bois torréfié, Rapport d'étude de l'École des Mines de St Étienne, France, 1986.
- [6] Bourgeois J., Guyonnet R., Bartholin M.C., Wood sciences and technologie 23 (1989) 303–310.
- [7] Deon G., Étude sur le bois torréfié, Éd. Cirad-forêt, Paris, France, 30 p., 1989.
- [8] Dirol D., Guyonnet R., The improvement of wood durability by retification process, Étude du CTBA, Paris, France, n° IRG/WP avril 1993
- [9] Doat J., Le bois torréfié, Éd. Cirad-forêt, Paris, France, Bois et Forêts des Tropiques 208 (1985) 57–67.
- [10] Dupont J., in : Le bois carburant. Société nationale d'encouragement à l'utilisation des carburants forestiers, France, 1941, pp. 19–25.
- [11] Espagnet C., Thieffin T., Morlier P., Quatrième colloque Sciences et Industries du bois, Nancy (1996) 461–468.
- [12] Feist W., Sell J., Wood and Fiber Science 19(2) (1986) 183–195.
- [13] Giebeler E., Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung, Holz als Roh und Werkstoff 41 (1983) 87–94.
- [14] Inoue M., Normioto M., Tanahashi M., Rowell R.M., Wood and Fiber Science 25(3) (1993) 224–235.
- [15] Kamdem D.P., Pizzi A., Guyonnet R., Jermannaud A., The International Research Group on Wood Preservation, Section 4: Processes, IRG/WP 99–40145, June 1999.
- [16] Mitchell Ph., Wood and Fiber Science 20(3) (1988) 320–335.
- [17] Montornes, Brevet n° FR 2720969.
- [18] Neya B., Deon G., Loubinoux B., Conséquences de la torréfaction sur la durabilité naturelle du bois de hêtre, Cirad-forêt, Paris, France, Bois et Forêts des Tropiques 244 (1995) 67–72.
- [19] Rem, Van Der Poel, Ruyter, Brevet n° 95-US-5451361, 96-US-5555642, 97-US-5633299.
- [20] Tjeerdsma B.-F., Boonstra M., Militz H., IRG/WP, Section 4, Processes, 29^e réunion annuelle 1998, 13 p.
- [21] Tjeerdsma B.-F., Boonstra M., Pizzi A., Tekely P., Militz H., Holz Roh Werkstoff 56 (3) (1998) 149–153.
- [22] Viitaniemi P., Jämsä S., Industrial Horizons VTT, Dec. 97 (1997) 23.
- [23] VTT, Brevet n° 94-FI-945338, 94FI-002209, 94FI-002210.
- [24] Norme NF B 51004 : Bois – Détermination de l'humidité (1985).
- [25] Norme NF B 51005 : Bois – Détermination de la masse volumique (1985).
- [26] Norme NF B 51006 : Bois – Détermination du retrait (1985).
- [27] Norme NF B 51007 : Bois – Essai de compression axiale (1985).
- [28] Norme NF B 51008 : Bois – Essai de flexion statique – Détermination de la résistance à la flexion statique de petites éprouvettes sans défaut (1987).
- [29] Norme NF B 51016 : Bois – Essai de flexion statique – Détermination du module d'élasticité en flexion statique de petites éprouvettes sans défaut (1987).