

# Caractérisation physique et mécanique de produits intermédiaires pour la fabrication de composites en pin maritime

Raoul Spéro ADJOVI LOKO<sup>1</sup>, Philippe GALIMARD<sup>2</sup>, Gérard GBAGUIDI AÏSSÉ<sup>3</sup>, Alain COINTE<sup>4</sup>, Jean-Luc COUREAU<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Université de Bordeaux, I2M, mail : [raoul-spero.adjovi-loko@u-bordeaux.fr](mailto:raoul-spero.adjovi-loko@u-bordeaux.fr)

<sup>2</sup> Université de Bordeaux, I2M, mail : [philippe.galimard@u-bordeaux.fr](mailto:philippe.galimard@u-bordeaux.fr)

<sup>3</sup> Université d'Abomey-Calavi, LEMA, mail : [gbaguidi.gerard@yahoo.fr](mailto:gbaguidi.gerard@yahoo.fr)

<sup>4</sup> Université de Bordeaux, I2M, mail : [alain.cointe@u-bordeaux.fr](mailto:alain.cointe@u-bordeaux.fr)

<sup>5</sup> Université de Bordeaux, I2M, mail : [jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr](mailto:jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr)

---

## RÉSUMÉ.

Cet article présente un protocole de campagne expérimentale de la caractérisation physique et mécanique d'une population de sciages en pin maritime et ses premiers résultats. L'objectif est de qualifier mécaniquement la ressource à chaque étape de sa transformation depuis l'arbre sur pied jusqu'au produit d'usage, de façon à en optimiser l'emploi. L'une des tâches du projet consiste en l'élaboration de composites structuraux bois lamellé-collé (BLC) optimisés et innovants pour la construction. 173 sciages ont été localisés dans six arbres préalablement caractérisés sur pied. Différents essais non-destructifs de caractérisation mécanique ont été réalisés sur les sciages, dans un premier temps à l'état vert, puis seront répétés sur ces mêmes poutres à l'état sec. L'accent a été porté sur la rigidité, critère souvent dimensionnant de l'emploi du bois en structure. La rigidité des poutres à l'état vert a d'abord été évaluée par un essai de flexion statique original. En suivant, les éléments ont été classés selon leur rigidité dynamique en traction compression par un procédé industriel certifié : le Xyloclass<sup>®</sup>. La rigidité dynamique flexionnelle par méthode vibratoire a ensuite été mesurée. Enfin, toutes les poutres à l'état vert ont été scannées pour obtenir leur géométrie extérieure avant la phase de séchage, afin d'apprécier la nodosité et les variations de section dues au séchage. Les premiers résultats concernent la corrélation des mesures dynamiques. Chaque arbre est caractérisé mécaniquement sur sa hauteur, par billons de 2,5m. Il apparaît une forte dépendance de la rigidité des sciages à sa position dans l'arbre selon la hauteur mais aussi selon le débit dans la section. Cette bonne connaissance de la ressource brute non classée (au sens normatif) doit permettre une conception optimisée de produits structuraux. Cette méthodologie pourra être appliquée à la valorisation de toute ressource locale.

## ABSTRACT.

This paper focuses on an experimental campaign protocol for the physical and mechanical characterization of samples of maritime pine beams. The study is part of the QUALIPIN project which aims at optimising the production of glued laminated wood and other structural composites for construction. The non-destructive characterization tests were performed on 173 beams of green wood, (maritime pine sawn). Bending tests were at first done to determine the bending stiffness. Afterwards, the beams were mechanically ranked using the xyloclass grading machine, the method is based on dynamic response of component excited dynamically in tension. Parallely, dynamic tests by the vibratory method in bending were done in order to be compare with the Xyloclass method. The shape and the external geometry of all components were scanned with the xylprofil machine, in order to evaluate global swelling and shrinkage after the drying protocol.

MOTS-CLÉS: Bois lamellé-collé, essais de caractérisation, rigidité en flexion, classement mécanique, essais dynamiques, module d'élasticité

KEYWORDS: glued laminated wood, mechanical characterization, stiffness, bending behaviour, grading machine, dynamic elasticity.

---

## 1. Introduction

Le projet Qualipin 'Qualité du bois de pin maritime' (référence exacte du projet Région) étudie la qualité du Pin maritime en abordant l'ensemble de la chaîne de valeur de l'arbre jusqu'à l'élaboration de composites structuraux, d'usage structural. L'objectif est de valoriser une ressource brute en la caractérisant mécaniquement à chaque étape de sa transformation depuis l'arbre sur pied de façon à optimiser la conception de produits finaux structuraux. Une des tâches du projet consiste à qualifier les sciages à l'état vert et à l'état sec, issus de six arbres préalablement testés in situ selon un protocole expérimental original. La campagne expérimentale, objet de la présente communication, a pour but de caractériser physiquement et mécaniquement la population de sciages à l'état vert de pins maritimes en utilisant les moyens de la plateforme Xyloplate (ANR-10-EQP-16). 173 sciages (60x110x2500mm<sup>3</sup>) ont été caractérisés individuellement sur la base d'essais de flexion statique quatre points, d'essais vibratoires en flexion et traction/compression. Chaque sciage a été scanné pour obtenir son enveloppe extérieure et sa nodosité avant une phase de séchage prévue sur deux mois. De plus, chaque débit a été repéré dans les grumes récoltées pour localiser la qualité du bois selon sa position dans l'arbre sur pied.

En dehors de la présence de bois juvénile ou de bois de compression, ce sont principalement les nœuds qui affectent la qualité mécanique du bois de pin maritime, en résistance mais également en flexion [CAS 05]. Les modules d'élasticité obtenus sont mis en relation avec la nature du bois (bois juvénile, aubier, bois de compression). Cela pourrait permettre l'optimisation de la fabrication de poutres lamellées collées par un suivi et une caractérisation continue de la qualité des débits dans le processus de fabrication. Ce travail tient aussi compte de la localisation initiale des bois dans les grumes. Ainsi, l'analyse de la qualité du bois recouvre le continuum arbre-produit d'usage. Les 173 poutres doivent être séchées et une nouvelle campagne expérimentale suivant le même protocole que celui effectué sur les poutres à l'état vert sera faite. A cause du retrait/gonflement dû au séchage, une définition de la qualité des déformations des lamelles entre les bois verts initiaux et les bois obtenus après séchage sera proposée : cela permet d'établir des critères de tolérance des produits intermédiaires pour la fabrication de composites comme le LC, BMR, mais également des poutres treillis qui représentent un potentiel intéressant pour la valorisation de la ressource.

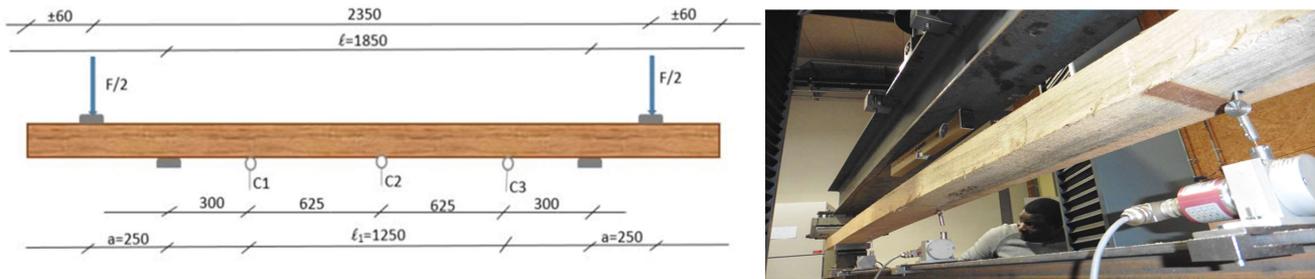
Nous pourrions alors croiser les propriétés physiques et mécaniques entre l'état vert et le séchage en relation avec la fonctionnalité du composant de structure final.

## 2. Campagne expérimentale

### 2.1 Essais de flexion statiques

Les essais dynamiques sont souvent corrélés aux essais statiques, qui relèvent du cadre réglementaire (norme EN408), afin de disposer d'une alternative au classement mécanique du bois, l'essai dynamique étant beaucoup plus simple à mettre en œuvre. Cependant, des écarts sont rencontrés entre les valeurs de modules dynamiques et celles des modules statiques. La capacité de classement des méthodes dynamiques reste entière, alors que l'essai statique de référence de flexion quatre points n'est pas remis en cause. malgré ses limites : afin de déterminer le module global d'élasticité en flexion pure  $E_0$  du matériau bois d'une poutre de construction, on peut mesurer la flexion circulaire sur une zone inférieure au tiers de la poutre. La valeur obtenue représente la moyenne de modules locaux de cette zone considérée comme représentative de l'ensemble de l'échantillon testé. L'alternative normative est de faire l'estimation à partir de la mesure de flèche globale incluant les déformations de cisaillement. Nous proposons d'augmenter la zone d'influence en flexion pure afin que la mesure de la flèche circulaire intègre une plus grande zone possible (1,85 m) sur nos poutres de 2,5 m. Ainsi, nous obtenons un module de flexion pure pour une dimension plus représentative des conditions d'usage et du volume total sollicité par les méthodes dynamiques. Les essais ont été réalisés sur une presse électromécanique MTS de capacité 50kN. Les poutres ont été chargées en déplacement imposé (3mm/mm) dans le domaine élastique conformément à la norme EN408. Le temps d'essai a cependant été volontairement réduit pour limiter tout comportement visqueux et pour augmenter la cadence des expériences statiques. Le chargement consiste en un cycle de charge-décharge entre 0 et 5000N. Le suivi des déplacements pour la mesure de trois flèches a été fait à l'aide de capteurs à fils *Ak industries CD50*. On peut donc en déduire la flèche circulaire et l'évolution du module d'élasticité le long des poutres par l'analyse des complaisances respectives. Un montage d'essai spécifique a été réalisé et les poutres ont été testées à plat.

La configuration de l'essai se présente comme suit :



**Figure 1 :** Configuration de l'essai (en mm) : a, distance entre un point de chargement et l'appui le plus proche ;  $l$ , portée en flexion ;  $l_1$ , longueur de base de mesure de module d'élasticité ; C1, C2 et C3, positions des capteurs de déplacements.

L'essai statique choisi est donc une adaptation de la configuration de l'essai normatif (EN408) afin d'accroître la corrélation des mesures avec les résultats dynamiques, plus représentatifs de la rigidité d'ensemble de la poutre, cette dernière

### 2.2 Essais vibratoires

Le module d'élasticité longitudinal dynamique a été également déterminé par deux essais vibratoires : en traction compression et en flexion.

La mesure du module élastique longitudinal s'effectue par analyse du spectre de vibrations des poutres soumises à une excitation mécanique en traction ou en flexion ([CASS 98], [MVOG 08], [ASSO 13]). Le module d'élasticité est estimé suivant la formulation de Bernoulli habituellement utilisée pour les vibrations de flexion des poutres longues ( $L/h \gg 1$ ). Les appuis très souples sont utilisés pour se rapprocher au mieux de l'hypothèse de poutre flottante ([CASS 98], [BRAN 02]).

Pour le mode de sollicitation en flexion, le module d'élasticité dynamique en flexion (MOEf) est déterminé par la formulation de Bernoulli qui néglige la déformation de cisaillement dû à l'effort tranchant ( $L/h \geq 20$ ). La formule de calcul du module élastique est donnée en flexion suivant le modèle de Bernoulli par :

$$M O E_f = \varphi S \frac{(2\pi L^2 f_k)^2}{I X_k} \quad \text{où :}$$

$\varphi$  est la masse volumique de la poutre testée (kg/m<sup>3</sup>),  
 $S$  l'aire de la section transversale (mm<sup>2</sup>)  
 $L$  la longueur de la poutre (mm),  
 $f_k$  la fréquence du  $k$ ème mode de vibration longitudinale (Hz)  
 $I$  le moment d'inertie de la section transversale (mm<sup>4</sup>)

$$X_k = \left[ (2k + 1) \frac{\pi}{2} \right]^2$$



Figure 2 a: Mesures vibratoires en flexion

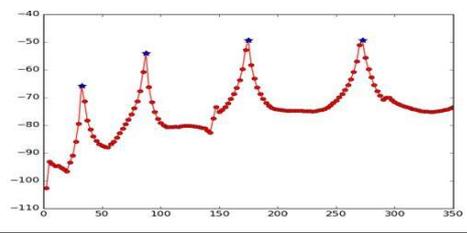


Figure 2 b: Exemple de réponse fréquentielle et identification des pics

Les essais vibratoires en traction ont été réalisés sur une machine de classement Xyloclass®. Cette machine est un dispositif de classement des bois de structure certifié pour le pin maritime à partir d'une vibration longitudinale en traction. Ce protocole de caractérisation permet des cadences plus soutenues que le protocole en flexion dynamique. Sa capacité de classement mécanique est validée sur le principe, par la normalisation européenne. Le Xyloclass permet d'estimer pour chaque poutre de la population, la fréquence du premier mode propre en traction, ce qui permet de déterminer le module d'élasticité (Et ou MOEt) à partir des masses, des dimensions (longueur, largeurs, hauteurs), mesurées automatiquement dans le processus.

## 2.4 Mesure de profil par la machine Xyloprofil

L'enregistrement de l'enveloppe extérieure de chaque poutre a été fait sur la machine Xyloprofil qui intègre un système de mesure presque continue des dimensions des sections des poutres par capteurs laser. Ce type d'acquisition permet de reconstruire la forme des pièces pour vérifier la rectitude d'un sciage (déformations longitudinales, gauchissement, tuilage...), contrôler la qualité d'un profil d'usinage ou encore réaliser la volumétrie des échantillons. (www.xylomeca.fr)

La photographie des faces extérieures est également réalisée pour la localisation des défauts et plus particulièrement des nœuds. Les 173 poutres composant la population ont été passées sur la machine xyloprofil et leurs profils ont été mesurés. L'objectif ici est de référencer le profil des lamelles à l'état vert. Une nouvelle mesure effectuée sur les lamelles séchées permettra de quantifier les déformations résultantes, en croisant les données obtenues à l'état humide et à l'état sec pour chaque lamelle. Ces informations seront ensuite corrélées à la rigidité des composants, et feront aussi l'objet d'une étude pour optimiser la réalisation de composites à base de bois.

## 3. Premiers résultats des mesures dynamiques

### 3.1 Qualification générale de l'échantillon à l'état vert

#### 3.1. a: Variabilité de l'échantillon

La figure 3 fait apparaître la variabilité comparée de la masse volumique moyenne de chaque poutre et du module vibratoire de 157 résultats exploités.

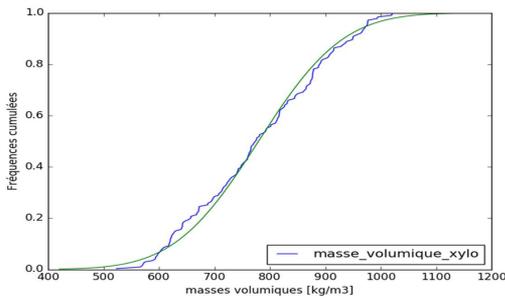


Figure 3a: Fréquences cumulées des masses volumiques

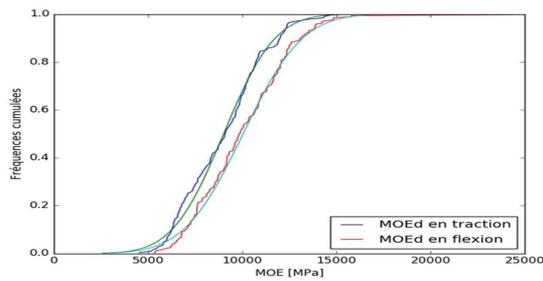


Figure 3b: Fréquences cumulées des modules dynamiques déterminés par des essais de traction (MOEt) et des essais de flexion (MOEf).

#### 3.1.b: Corrélation des variables

La figure suivante montre les corrélations de trois paramètres mesurés le module dynamique obtenu par vibration en traction/compression MOEt, et par flexion MOEf, ainsi que la masse volumique. Cette dernière reste un faible indicateur des deux modules avec un  $R^2$  voisin de 0,5. Les modules MOEt et MOEf sont corrélés avec un  $R^2=0,9$ . Malgré une pente de 1 pour la droite de régression, les mesures ne sont pas interchangeables, n'assurant pas la bijectivité des deux mesures.

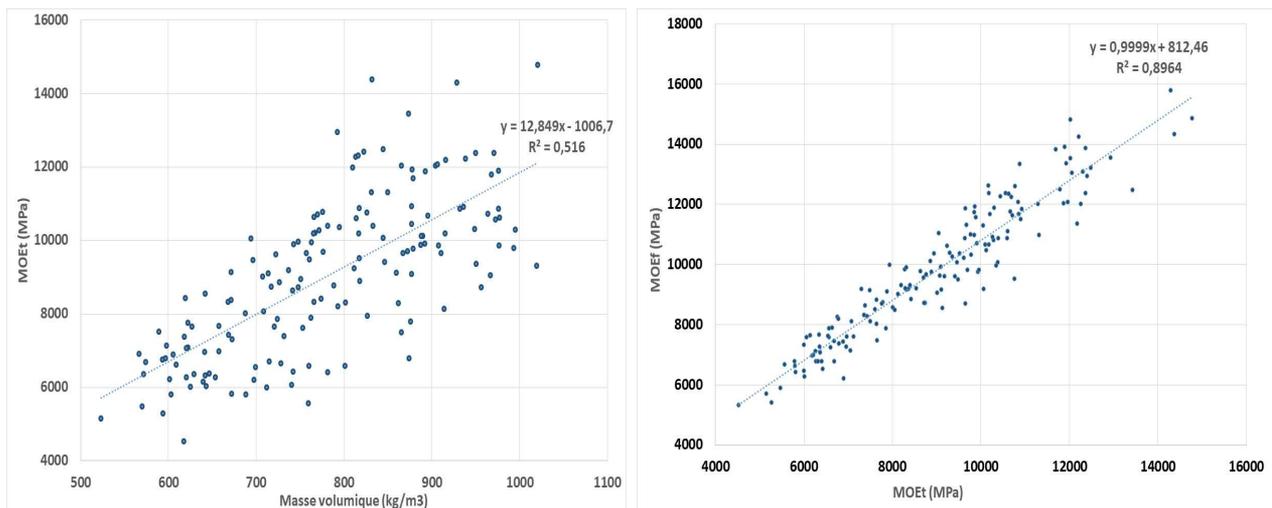


Figure 4 : Corrélations entre les masses volumiques et les modules dynamiques

### 3.2 Répartition intra-arbres de la rigidité du matériau selon sa localisation

On choisit ici de représenter le module de flexion selon la localisation de la poutre

Les figures 5 et 6 montrent la répartition du MOEf en fonction de la position du sciage dans la hauteur de l'arbre et dans la section de l'arbre. Les six tronçons représentés sur la figure 5 ont une longueur correspondant à la longueur des poutres sciées, soit 2,5 m. Cette représentation montre la variabilité décroissante du module depuis les billes de pied jusqu'au sommet. La bille de pied fait apparaître les modules les plus élevés, mais aussi les modules les plus faibles correspondant à la présence du bois juvénile avec un module moyen inférieur de 20%. Ces faibles valeurs de bois juvénile sont mises en évidence dans la figure 6 : les sciages de cœur (code blanc) ont des modules généralement plus faibles que les sciages de rives. En revanche, la représentation ne permet pas de mettre en évidence un effet du vent dominant sur la répartition des modules.

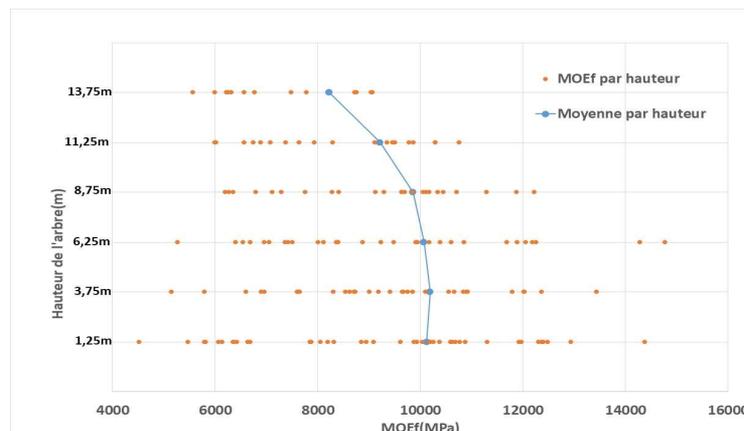


Figure 5 : MOEf des sciages représentés en tête des billons selon leur position en hauteur dans l'arbre

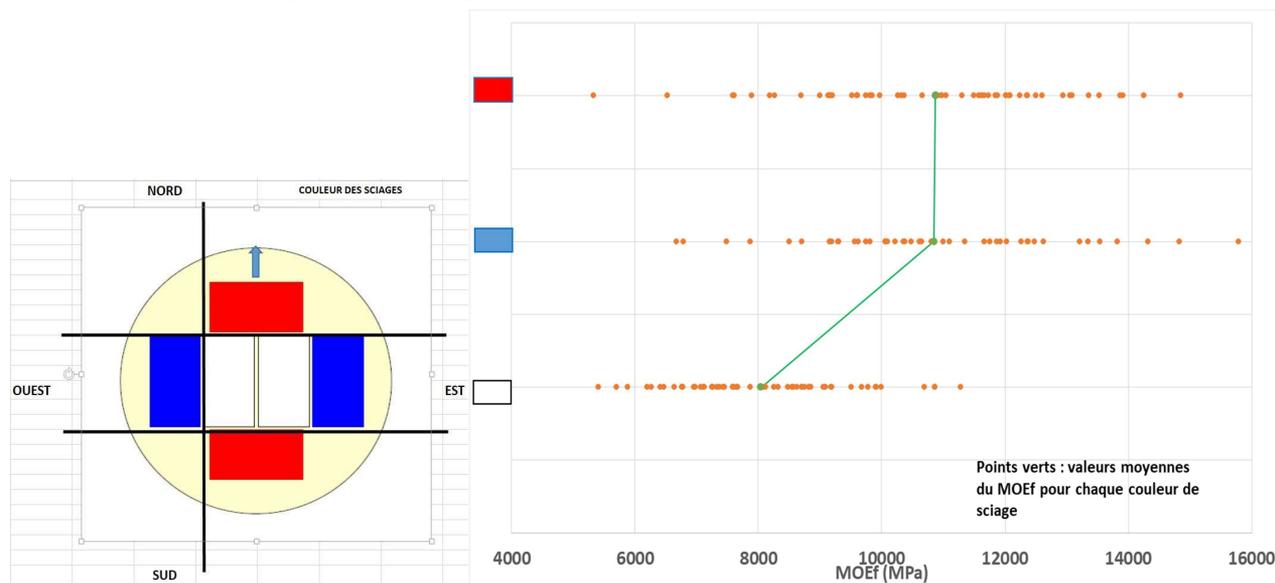


Figure 6 : MOEf en fonction de la position du sciage dans la section

### 4. Conclusion

Afin d'optimiser l'utilisation d'une ressource ligneuse en tenant compte de sa variabilité, 173 sciages de 2,5 m de long ont été tirés de six arbres choisis comme échantillonnage. L'objectif est de concevoir des composites lamellés-collés de rigidité équivalente à la classe structurale normative GL28. La rigidité des sciages a été évaluée par un essai de flexion statique original représentatif de la rigidité globale et par deux mesures vibratoires en traction/compression et en flexion.

Les premiers résultats obtenus sur les rigidités dynamiques des sciages à l'état vert montrent que la masse volumique est mal corrélée ( $R^2=0,5$ ) aux modules alors que les modules en traction et en flexion le sont ( $R^2=0,9$ ) sans pour autant que l'ordonnancement soit respecté. La répartition intra-arbre montre une rigidité et sa dispersion décroissantes avec la hauteur du sciage dans l'arbre. La position dans la grume et du vent dominant n'apparaît pas encore significatif dans l'état actuel de l'analyse des résultats. En complément de l'analyse des essais statiques, une nouvelle campagne de mesure sur les sciages ramenés à l'état sec doit être effectuée.

L'issue du projet est de fournir des critères de suivi de la qualité mécanique de la ressource non classée structurellement dans le but de concevoir des éléments composite bois de structure validés pour la construction.

### 5. Bibliographie

- [ASSO 13] ASSOUDO, A., *Caractérisation du matériau bois de structures utilisé en construction par la méthode vibratoire : une technique de mesure non vibratoire*, Afrique SCIENCE, 09(2) (2013), 11-22.
- [BRAN 02] BRANCHERIAU L., *Expertise mécanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique*, Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée-Aix Marseille II, 2002.
- [CAST 05] CASTERA, P., *La qualité du bois de pin maritime*, Forêt méditerranéenne, t. XXVI, n°1, mars 2005.
- [CASA 98] CASAGRANDE S., *Evaluation non destructive par une analyse vibratoire des performances mécaniques de bois reconstitués*, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 1998.
- [MVOG 08] MVOGOJ., *Regroupement mécanique par méthode vibratoire des bois du bassin du Congo*, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2008.

http : //www.xylomeca.fr