

Essai de flexion 4 points : relation entre MOE local-MOE global pour la caractérisation normative des bois de structure

Raoul Spéro ADJOVI LOKO¹, Philippe GALIMARD¹, Jean-Luc COUREAU¹, Alain COINTE¹, Gérard GBAGUIDI AÏSSE²

¹ Université de Bordeaux, i2m, UMR CNRS 5295, F-33405 Talence, France

² Université d'Abomey-calavi, Bénin, LEMA / LAMS

RESUME Cette communication présente une étude concernant la caractérisation du pin maritime selon les normes EN408 et EN 384, nécessaires pour la valorisation des bois de construction. Une confrontation de la configuration de l'essai normalisé est faite avec un nouveau protocole de flexion 4 points, afin d'annuler les effets de l'effort tranchant dans la zone de mesure des déplacements. L'étude a permis de mettre en évidence des difficultés de détermination du modèle d'élasticité du bois par l'EN408 et l'EN384, qui sont généralement dues à des imprécisions de mesures des faibles courbures du tiers central et à la configuration complexe de chargement engendrée par la coexistence du moment de flexion et de l'effort tranchant. La norme anticipe ces difficultés par une relation affine d'ajustement déterminée statistiquement qui ne permet pas de valoriser au mieux les bois par leur classement. Dans le cadre de cette étude, une population de 173 sciages de pin maritime a été testée en rigidité dans le domaine élastique selon l'EN408. Un essai de flexion 4 points original avec une zone d'influence en flexion pure couvrant 75% de la longueur des poutres est proposé. Cette configuration d'essais montre clairement la convergence des mesures, a contrario de la configuration normative, révélant ainsi la fiabilité de l'approche. Les déformations engendrées par la nouvelle configuration de chargement permettent une meilleure estimation du module de flexion pure E_0 . Ainsi, on obtient une augmentation moyenne de la rigidité des poutres de près de 18%, alors que cette valeur est nécessaire au dimensionnement et au classement en résistance du pin maritime.

Mots-clefs module d'élasticité, MOE global et local, flexion 4 points, EN384

I. INTRODUCTION

Afin de déterminer le module d'élasticité de composants de structure en bois conformément à la norme NF EN 408, on peut mesurer la flèche relative du segment central de longueur égale à 5 fois la hauteur de la poutre, situé entre les deux points de chargement. La configuration de chargement est un essai de flexion 4 points. Le module déduit est alors désigné « module d'élasticité local (MOE local) », parce qu'il dépend des propriétés locales du bois dans la zone de chargement générant un moment de flexion constant. La seconde méthode normative pour déterminer le module d'élasticité en flexion, est de mesurer la flèche globale, ce qui est expérimentalement plus aisé. Dans ce cas, la propriété obtenue est le « module d'élasticité global (MOE global) », intégrant les caractéristiques du sciage sur la longueur de l'élément, dépendant alors de l'interaction du moment de flexion avec l'effort tranchant.

Les valeurs caractéristiques des MOE indiquées dans la norme EN338 pour le classement des bois de structure sont définies comme étant celles de MOE locaux (E_0) (flexion circulaire). Cependant, plusieurs études ont prouvé que le MOE local n'est pas forcément pertinent pour décrire le comportement en déformation des structures en bois (Denzler, Stapel, and Glos 2008). Il

y a aussi une forte probabilité de commettre des erreurs de mesures rédhibitoires lorsqu'on le détermine. La faible distance entre les points de référence pour la mesure des déplacements génère probablement des phénomènes de torsion initiale malgré de faibles courbures (Bostrom, Ormasson, and Dahlblom 1996) (Källsner and Ormasson 1999)(Solli 2000). Ainsi, il est préconisé d'utiliser le MOE global, au lieu du MOE local. C'est la raison pour laquelle, une équation pour convertir le MOE global en MOE local est définie dans la norme européenne EN 384 :

$$MOE_{loc} = \left[\sum_{i=1}^n MOE_{glob} / n \right] \cdot 1,3 - 2690 \quad (1)$$

Par ailleurs, cette norme a été élaborée sur des études basées sur des essences résineuses de bonnes qualités mécaniques comme l'épicéa. L'équation (1) est sujette à beaucoup de débats dans son emploi pour les autres essences, principalement pour les bois de plus faible qualité, pour lesquels la nodosité est plus marquée. La vérification de cette équation pour d'autres essences de bois a fait l'objet de plusieurs articles. Denzler *et al.* (Denzler, Stapel, and Glos 2008) ont établi les relations entre MOE locaux et MOE globaux, sur plusieurs essences de bois :

TABLEAU 1. Comparaison des relations entre MOE local et global (Denzler, Stapel, and Glos 2008)

Essences	Nombre échantillons	Relation entre MOE local et global	r ²
Epicéa	3325	MOE _{loc} =1,224 * MOE _{glob} - 1584	0,95
Pin	202	MOE _{loc} =1,197 * MOE _{glob} - 1191	0,97
Mélèze	152	MOE _{loc} =1,142 * MOE _{glob} - 452	0,96
Douglas	268	MOE _{loc} =1,180 * MOE _{glob} - 1245	0,97
Toutes essences	4113	MOE _{loc} =1,206 * MOE _{glob} - 1421	

Les coefficients de ces équations sont tous inférieurs à ceux figurant dans la norme EN384. Les auteurs ont conclu sur la base de leurs travaux que la relation fournie par la norme EN384, tend à sous-estimer « normativement » les MOE locaux pour des bois dont le MOE est inférieur à 11000MPa. Ils précisent qu'une équation du type $MOE_{loc} = 1,2 * MOE_{glob} - 1400$ (Tableau 1), conviendrait mieux. Cependant, en raison de la variabilité des résultats, la relation de la norme EN384 est, pour l'heure, restée inchangée. D'autres auteurs ont trouvé des résultats similaires, donnant des coefficients de corrélation (r²) proche de 0,85 pour des coefficients directeur du modèle linéaire variant entre 1,13 et 1,28. L'ordonnée à l'origine semble plus tributaire de l'essence : approchant les 800 MPa pour l'épicéa seul (Holmqvist and Bostrom 2000), (Solli 2000), tandis que (Nocetti et al. 2013), ont trouvé des valeurs pouvant atteindre 2287 MPa pour des modèles inter essences (sapin blanc, châtaignier, pin corse et douglas). Le mélange de feuillus avec des bois résineux peut également modifier cette valeur à 257 MPa pour l'association épicéa, châtaignier, cumaru, massaranduba, amarante et azobé (Ravenhorst and Van de Kuilen 2009). Dans le but d'établir une relation pour le pin maritime, nous avons étudié, les relations entre les deux MOE pour une population de 173 sciages (60x110x2500mm³) de pin maritime. De plus, l'étude comparative est menée sur la base de 3 protocoles différents de flexion 4 points : un essai normatif (EN408) et une configuration de chargement à plat et sur chant, autorisant une zone de flexion circulaire correspondant à 75% de la longueur des poutres testées (au lieu des 33% pour la norme en vigueur). L'humidité des bois caractérisés est voisine de 9% pour cette campagne expérimentale.

II. ESSAIS DE FLEXION STATIQUES

Les essais ont été réalisés sur une presse électromécanique MTS de capacité 50kN. Les poutres ont été chargées en déplacement imposé en restant dans le domaine élastique. Les temps d'essai ont été volontairement réduits pour limiter tout comportement visqueux et pour augmenter la cadence des expériences. Le suivi des déplacements pour la mesure de trois flèches a été fait par des capteurs à fils *Ak industries CD50* (précision 1/100mm). La flèche circulaire a été mesurée pour estimer les modules d'élasticité des bois par l'analyse des complaisances respectives (inverse de la rigidité).

Dans le cas de l'essai normatif EN408, le chargement consiste en un cycle de charge-décharge entre 0 et 3300N. Un essai de flexion 4 points étendu est présenté dans la figure n°1 pour proposer un autre protocole de qualification sur la population de pin maritime. Les 3 capteurs à fils (C_i) sont placés sur la fibre comprimée entre les appuis dans la zone de flexion pure. Cette nouvelle configuration a trois intérêts : le volume testé est plus représentatif de l'échelle du composant et de sa nodosité, la courbure est plus prononcée, ce qui permet des mesures plus fiables, et l'effort tranchant n'influence pas les déplacements enregistrés. Dans la configuration où la poutre est fléchée à plat, un cycle de charge-décharge entre 0 et 5500N et pour la flexion sur chant la sollicitation varie de 0 et 8500N pour rester dans le domaine élastique. Un système de cales entre les appuis et le bois est placé pour éviter l'indentation biaisant la mesure de la rigidité flexionnelle. Pour les 3 configurations d'étude, les poutres sont chargées en déplacement imposé à une vitesse de 8mm/mn : ($< 0,003h$ mm/s selon l'EN408).

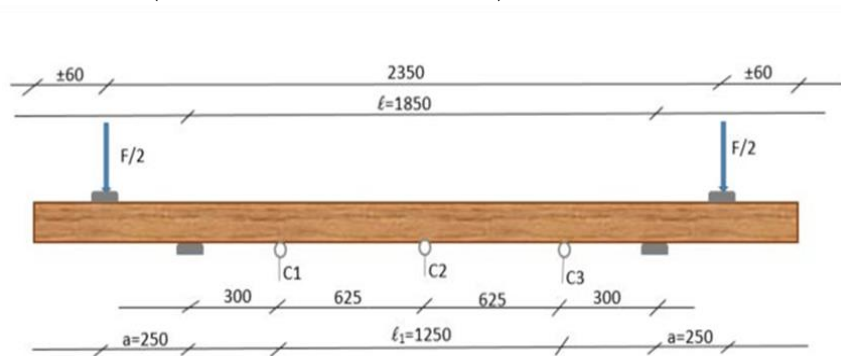


FIGURE 1. Configuration des essais de flexion étendues (dimensions en mm)

III. CORRELATION ENTRE MOE LOCAL ET MOE GLOBAL

Toutes les 173 poutres de la population d'étude ont été testées suivant les 3 configurations de flexion et les corrélations obtenues sont les suivantes (total de 519 essais) :

TABLEAU 2. Relations entre MOElocal/global avec le nouveau protocole expérimental

Essais	Relation	r ²
EN408 (flexion sur chant)	$MOE_{loc}=1,22 * MOE_{glob} - 2505$	r ² =0,58
Flexion étendue sur chant (FCS)	$MOE_{loc}=0,944 * MOE_{glob} + 225$	r ² =0,96
Flexion étendue à plat (FPS)	$MOE_{loc}=0,977 * MOE_{glob} + 229$	r ² = 0,93

On obtient pour la configuration EN 408, une faible corrélation entre les modules local et global. Le coefficient directeur reste similaire aux études précédentes, l'ordonnée à l'origine est

plus marquée et certainement en lien avec la variabilité des bois de moins bonne qualité. Par conséquent, pour le pin maritime, l'estimation au sens normatif du MOE_{local} n'est pas pertinente. De plus, l'interaction de l'effort tranchant et la nodosité influencent l'évaluation du module global. Les précisions biaisent les estimations par les faibles courbures générées par le chargement dans le tiers central. La valeur moyenne du MOE local des 173 poutres est de 10 000 MPa. En utilisant l'ajustement proposé par l'EN384 : équation (1), sur la base du MOE global, nous obtenons une moyenne de 10700 MPa.

Dans le cas des essais présentant une zone de moment circulaire proche de la longueur des poutres (75%), la moyenne atteinte est de 12 700 MPa sur chant, valorisant ainsi l'essence. De plus, les résultats montrent la convergence des mesures par la configuration de chargement entre le module local et le module global qui présente un $r^2 = 0,96$, puisque l'effort tranchant n'influence pas la déformée de la poutre. Par conséquent, la méthode proposée permet de mieux approcher le module de cette essence, où la nodosité est mieux intégrée par un volume significatif dans la zone centrale. Dans le cas du chargement à plat, la moyenne du lot est de 11 100 MPa montrant que les défauts sont plus discriminants sur la hauteur fléchie que sur la largeur fléchie. L'analyse en fréquences cumulées des MOE (local/global) montre la bonne correspondance des valeurs obtenues par le nouveau protocole de flexion 4 points. Les bois de fortes rigidités sont mieux identifiés. On remarque les faibles valeurs des MOE obtenues avec l'EN408. La population étudiée comporte une forte quantité de bois juvénile avec une forte nodosité dans la zone de flexion pure. Ceci justifie la faible corrélation entre MOE local et global (0,58) obtenue par notre essai EN408, en comparaison à la bibliographie, montrant que l'EN408 peut présenter un biais pour les bois de plus faible qualité.

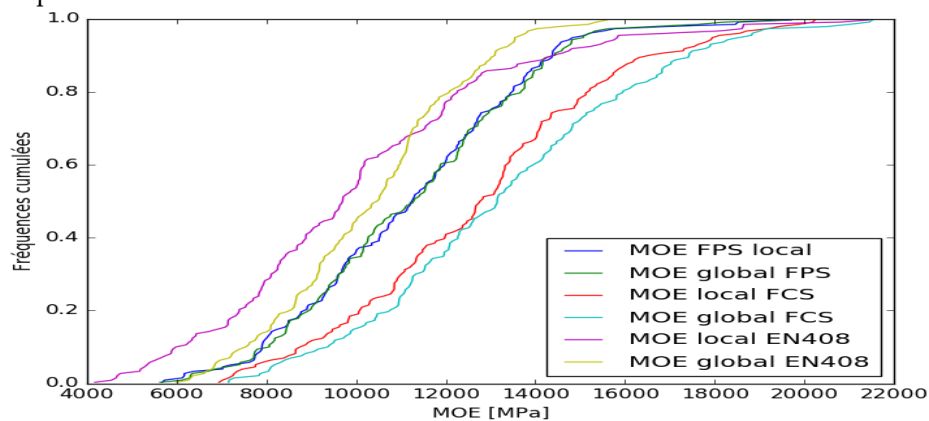


FIGURE 2. Fréquences cumulées des MOE pour tous les essais

IV. CONCLUSION

L'étude montre que les mesures des modules d'élasticité local et global proposées par l'EN408 sont très sensibles aux conditions limites et aux mesures des faibles courbures. Pour ces raisons, la norme EN384 propose une équation d'ajustement, dont l'utilisation reste sujette à débat dans le domaine de la valorisation des essences. De plus, l'effort tranchant et la nodosité influencent sensiblement la rigidité flexionnelle. Par conséquent, l'ajustement normatif peut dévaloriser les performances mécaniques de certaines essences pour leur utilisation en bois de structure. Dans le cadre de la caractérisation, un essai de flexion 4 points recouvrant près de 75%

de la longueur des poutres permet une meilleure détermination du module E_0 . Dans le protocole expérimental proposé, le champ de déplacement n'est généré que par un moment circulaire permettant une analyse par la théorie des poutres sans interaction avec l'effort tranchant. La rigidité en flexion mesurée du pin maritime est ainsi augmentée de près de 18% par rapport, ce qui peut se répercuter sur des changements de classes de résistances supérieures et sur le dimensionnement des poutres aux états limites de service.

V. BIBLIOGRAPHIE

Bostrom, L., S. Ormasson, and O. Dahlblom. 1996. "On Determination of Modulus of Elasticity." In *CIB W18 Meeting 29, Bordeaux, France*, Bordeaux.

Denzler, Julia K., P. Stapel, and P. Glos. 2008. "Relationship between Global and Local MOE." In *International Council for Research and Innovation in Building and Construction*, St Andrews, Canada, 247–55.

Holmqvist, C., and L. Bostrom. 2000. "Determination of the Modulus of Elasticity in Bending of Structural

Timber-Comparison of Two Methods." In *6th World Conference on Timber Engineering*, Whistler, Canada, Whistler.

Källsner, B., and S. Ormasson. 1999. "Measurement of Modulus of Elasticity in Bending of Structural Timber." In *RILEM Symposium on Timber Engineering*, Stockholm, Stockholm, 639–48.

Nocetti, Michela et al. 2013. "Relationship between Local and Global Modulus of Elasticity in Bending and Its Consequence on Structural Timber Grading." *European Journal of Wood and Wood Products* 71(3): 297–308.

Ravenhorst, G., and J-W.G Van de Kuilen. 2009. "Relationship between Local, Global and Dynamic Modulus of Elasticity for Soft and Hardwoods." In *CIB W18 , Meeting 42, Dübendorf, Suisse*.

Solli, K. 2000. "Modulus of Elasticity-Local or Global Values." In *6th World Conference on Timber Engineering*, Whistler, Canada, Whistler.