

# Comportement mécanique différé des essences tropicales en ambiances tropicales : Expérimentation et cadre réglementaire

N. MANFOUMBI<sup>a,b</sup>, F. DUBOIS<sup>a</sup>, N. SAUVAT<sup>a</sup>

a. Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes, Axe Génie Civil et Durabilité (GEMH & GCD), Université de Limoges, Centre Universitaire Génie Civil, 19300 Egletons, FRANCE

b. Laboratoire de Mécanique des Matériaux Fibreux, Unité de Recherche en Mécanique des Matériaux, Université des Sciences et Techniques de Masuku, B.P. 901 Franceville, GABON

## Résumé :

Dans le cadre de l'application de l'Eurocode 5 au contexte de la construction bois en environnement tropical, des essais de flexion long-terme, à l'échelle structure, ont été menés en ambiances tropicales sur deux essences tropicales : moabi et ozigo. Trois types d'ambiance ont été sélectionnés : climatisée temporairement, extérieure abritée et extérieure non-abritées. Les résultats obtenus, à terme, permettent une adaptation des coefficients modificateurs et classes de service du code européen. En complément, des essais de sorption et de diffusion, à l'échelle matériau, ont été conduits.

## Abstract :

The present work deals with application of Eurocode 5 to tropical hardwoods in tropical climate. Long-term bending tests were realized in tropical climate on two tropical hardwoods, moabi and ozigo. Three environments were selected: a temporary air-conditioned atmosphere, a sheltered outside atmosphere and a non-sheltered outside atmosphere. The forward obtained results allow an adaptation of the modifiers coefficients and Eurocode 5 classes of service. In addition, sorption and diffusion essays were led.

**Mots clefs :** Eurocode 5, essences tropicales, climat tropical, expérimentation.

## 1 Introduction

Le bois est un matériau hygroscopique. En d'autres terme, il adsorbe et désorbe de l'eau en fonction de l'humidité relative et de la température de l'air qui l'entoure. En effet, plusieurs auteurs [1, 2] ont montré que le comportement physique et mécanique à long terme des structures en bois dépend fortement de son taux d'humidité interne, ce dernier étant lié à l'environnement dans lequel lesdites structures sont exposées. Par conséquent, le calcul des structures en bois exige une meilleure estimation de l'état hydrique pour une connaissance suffisante de ses propriétés mécaniques. Cette spécificité du matériau est prise en compte, dans l'Eurocode 5 [3], par l'utilisation de deux coefficients modificateurs :

- $k_{mod}$  pour les propriétés de résistance : il prend en compte la variation de la résistance du bois en fonction de la durée d'application d'une action et du taux d'humidité de la structure ;
- $k_{def}$  pour les déformations : il définit forfaitairement les effets dus au fluage dans le bois et prend en compte essentiellement le taux d'humidité de la structure.

Dans le cas des déformées, on a :

$$\varepsilon_{fin} = \varepsilon_{inst} - \Delta\varepsilon_{diff} \quad \text{avec} \quad \Delta\varepsilon_{diff} = k_{def} \times \varepsilon_{inst} \quad (1)$$

$\varepsilon_{fin}$  représente la déformation finale ou totale,  $\varepsilon_{inst}$  la déformation instantanée,  $\Delta\varepsilon_{diff}$  la déformation différée.

Pour la prise en compte des variations de l'humidité dans le bois, l'Eurocode 5 préconise trois classes de service :

- la classe de service 1 où le bois ne dépasse que rarement 12% d'humidité ;

- la classe de service 2 : le bois ne dépasse que rarement 20% d'humidité ;
- la classe de service 3 où le bois peut être amené à des humidités supérieures à 20% pour des durées non négligeables.

Si plusieurs études ont été menées sur les bois tropicaux [4, 5, 6] en zones tropicales [7, 8], très peu ont concernés jusqu'ici l'application de l'Eurocode 5 aux essences tropicales en ambiance tropicale notamment en Afrique équatoriale où les climats sont chauds et humides. L'utilisation de l'Eurocode 5 comme code de conception et de calcul des structures en bois tropicaux évoluant dans un environnement tropical requiert une adaptation de la version actuelle de ce code. Le présent travail pose les bases de l'analyse des conditions de transfert de l'Eurocode 5 au contexte des structures en bois tropicaux dans un environnement tropical.

## 2 Méthodologie

L'étude comporte une approche expérimentale et numérique. Les essais expérimentaux ont été réalisés sur deux sites : à Egletons en France pour les essais à l'échelle matériau et à Franceville au Gabon pour les essais à l'échelle structure. Deux essences gabonaises ont fait l'objet de cette étude :

- le Moabi (*Baillonella Toxisperma*) : feuillu dense ( $0,87 \pm 0,07$  de densité), non flottable et très dure ne nécessite pas de traitement de préservation contre les insectes même en cas d'humidification permanente [9]. Cette essence est très prisée dans les structures lourdes et meubles de luxe.
- l'Ozigo (*Dacryodes Buettneri*) : feuillu léger ( $0,59 \pm 0,05$  de densité), flottable, nécessite des traitements de préservation contre les insectes et est non conseillé en cas d'humidification permanente ou temporaire [9]. Cette essence est très utilisée en charpente légère et pour la réalisation des contreplaqués.

### 2.1 Caractérisation physique et mécanique des essences étudiées

Des essais destructifs en compression et en flexion quatre points ont été conduits, à Egletons en France, selon la norme NF EN 408 [10], pour la détermination des modules d'élasticité et des résistances mécaniques en vue d'une classification mécanique vis-à-vis de l'Eurocode 5.

Les essais de compression ont été réalisés sur un échantillonnage de 60 pièces de bois par essence sur une presse hydraulique de type Zwick équipée d'un extensomètre. Les dimensions des pièces sont : 20 x 20 x 60 mm<sup>3</sup>. L'échantillonnage de flexion, préalablement conditionné à 65% d'humidité relative (HR) et à une température de 20°C (T°), est composé de 40 pièces de bois par essence de section 10 x 20 mm<sup>2</sup> pour 400 mm de longueur.

Outre les essais de caractérisation mécanique, d'autres essais ont été conduits pour la détermination de la teneur en eau, de la masse volumique et des coefficients de retrait gonflement. Le tableau 1 présente l'ensemble des résultats obtenus.

Essai Mécanique	Flexion 4 points		Compression	
	Ozigo	Moabi	Ozigo	Moabi
Humidité moyenne à l'essai	13,3% $\pm$ 0,8%	13,4% $\pm$ 0,7%	8,4% $\pm$ 0,4%	7,9% $\pm$ 0,4%
Masse volumique à l'essai en kg/m <sup>3</sup>	608 $\pm$ 18	832 $\pm$ 21	583 $\pm$ 33	747 $\pm$ 23
Coefficient retrait/gonflement transversal (RT)	0,18 % $\pm$ 0,06	0,26 % $\pm$ 0,02	0,22% $\pm$ 0,03	0,29% $\pm$ 0,02
Coefficient retrait/gonflement longitudinal (L)			0,03% $\pm$ 0,01	0,02 % $\pm$ 0,01
Coefficient retrait/gonflement volumique			0,47 % $\pm$ 0,06	0,61 % $\pm$ 0,04
Contrainte moyenne de rupture en MPa	69 $\pm$ 9	121 $\pm$ 5	54 $\pm$ 5	76 $\pm$ 5
Module d'élasticité longitudinal en MPa	10728 $\pm$ 1545	15690 $\pm$ 784	12700 $\pm$ 3446	18260 $\pm$ 4326
<b>Valeurs ajustées à 12% d'humidité selon NF EN 384 [11]</b>				
Masse volumique en kg/m <sup>3</sup>	612 $\pm$ 18	838 $\pm$ 23	600 $\pm$ 27	761 $\pm$ 19
Contrainte moyenne de rupture en MPa			48 $\pm$ 4	67 $\pm$ 3
Module d'élasticité longitudinal en MPa	11000 $\pm$ 1537	16140 $\pm$ 796	11770 $\pm$ 3156	16740 $\pm$ 3948

TAB. 1 – Détermination des propriétés physiques et mécaniques

Les résultats obtenus sur les essais destructifs en flexion et en compression permettent de déterminer les valeurs caractéristiques des essences étudiées et donc d'en déterminer un classement selon l'Eurocode 5.

## 2.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental, réalisé à Franceville au Gabon, comporte 24 poutres d'ozigo et de moabi réparties équitablement sur trois sites correspondant à trois ambiances climatiques différentes. Les poutres de section 90 x 180 mm<sup>2</sup> pour 3000 mm de portée reposent sur des plots en béton surmontés par des tubes cylindriques creux. Des petites plaques d'acier sont interposées entre les poutres et les appuis afin de minimiser le poinçonnement. Les poutres sont sollicitées en flexion « 8 points » car chargées en binôme et par essence. Chaque paire de poutre supporte une charge d'une tonne soit un chargement de 500 kg par poutre.

Par analogie aux classes de service de l'Eurocode 5, trois ambiances climatiques sont proposées :

- une ambiance climatisée en opposition au milieu chauffé : le climat équatorial étant chaud et humide, la tendance dans les bâtiments administratifs ou d'habitation est plutôt à la climatisation ;
- une ambiance extérieure abritée ;
- une ambiance extérieure non-abritée.

Chaque site dispose d'un capteur thermo-hygrométrique pour la mesure de la température et de l'humidité ambiantes. Les capteurs de déplacement sont placés à mi-travée en face inférieure des poutres. Une centrale d'acquisition disposée sur chaque site assure l'enregistrement en continue des données.



FIG. 1 – Dispositif expérimental à l'échelle structure pour les essais en flexion

## 3 Résultats partiels et discussion

Les résultats présentés ne sont que partiels du fait que les données des essais complémentaires sont en cours d'acquisition et de traitement.

### 3.1 Evolution des conditions climatiques dans les trois environnements

Le tableau 2 présente une synthèse des conditions climatiques dans les trois ambiances prédéfinies depuis près de deux ans. Ces grandeurs statistiques sont extraites des données obtenues grâce aux capteurs thermo-hygrométriques installés sur chaque site. Outre les pics de température en période d'ensoleillement, on note que les ambiances extérieures abritée et non-abritée sont quasiment équivalentes. Si l'ambiance climatisée peut être assimilable à la classe de service 1, les deux ambiances extérieures se prêtent plutôt à la classe 3 au regard des valeurs des humidités relatives.

Ambiance	Climatisée		Extérieure Abrité		Extérieure Non-Abritée	
	HR (%)	T (°C)	HR (%)	T (°C)	HR (%)	T (°C)
Valeur maxi	83,1	30,3	100	37,6	100	43,2
Valeur mini	36,2	17,3	37,6	17,9	27,4	11,9
Moyenne	59	23	81	25	78	26
Ecart Type	11,4	3,2	12,6	3,1	14,5	3,7
Médiane	63	24	84	24	80	25
Mode	69	25	91	22	76	27

TAB. 2 – Valeurs moyennes et écarts types des humidités et températures enregistrées pour les différentes ambiances

### 3.2 Comportement différé en flexion « 8 points »

Pour l'analyse du comportement différé, les valeurs des flèches ont été moyennées par binôme pour tenir compte de l'effet de la dissymétrie possible engendrée par le principe de chargement. Pour chaque ambiance, on détermine par essence l'évolution dans le temps du coefficient  $k_{def}$  correspondant au binôme de poutre à partir des courbes individuelles des flèches données par les capteurs de déplacement. L'expression de  $k_{def}$  en fonction du temps est obtenue par la relation (2) :

$$k_{def}(t) = \frac{\varepsilon_{fin}(t)}{\varepsilon_{inst}} - 1 \quad (2)$$

$\varepsilon_{fin}(t)$  est la déformation finale en fonction du temps.

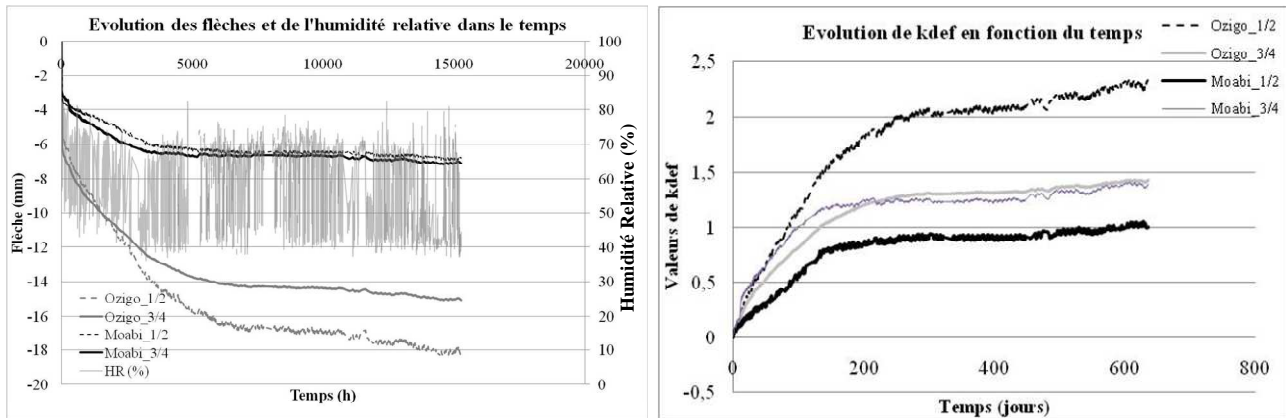


FIG. 2 – Ambiance climatisée : évolution des flèches et des coefficients  $k_{def}$  en fonction du temps

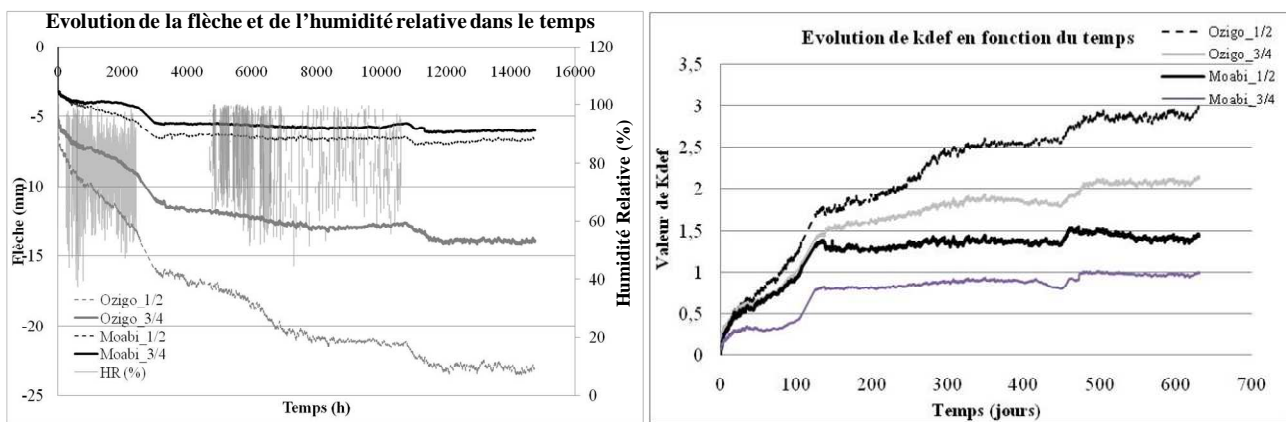


FIG. 3 – Ambiance extérieure abritée : évolution des flèches et des coefficients  $k_{def}$  en fonction du temps

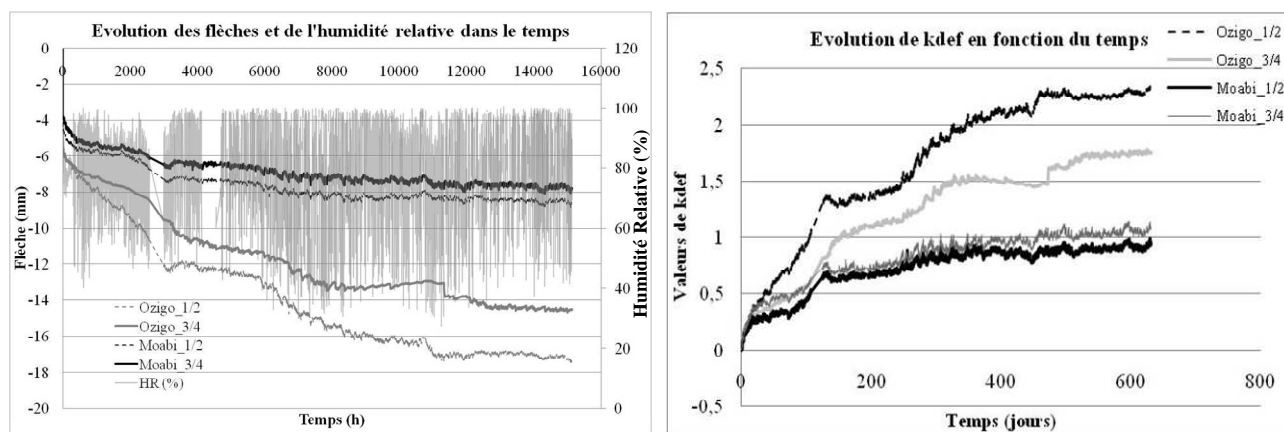


FIG. 4 – Ambiance extérieure non-abritée : évolution des flèches et des coefficients  $k_{def}$  en fonction du temps

Dans l'ensemble, comme le montre l'évolution des coefficients  $k_{def}$  sur les figures 2, 3 et 4, les valeurs proposées par l'Eurocode 5, respectivement 0.6, 0.8 et 2 pour les classes de service 1, 2 et 3 sont largement dépassées au bout de 650 jours notamment pour l'ozigo dans les trois ambiances. La comparaison des valeurs de  $k_{def}$  en classe de service 1 aux valeurs obtenues en ambiance climatisée montre, malgré la correspondance affichée en termes de température et d'humidité relative, une nette différence qui pourrait trouver une explication dans l'analyse des états hydriques des essences étudiées. L'étude des isothermes de sorption, des cinétiques de diffusion hydrique ainsi que l'étude du fluage et recouvrance en cours de réalisation apporteront plus d'éclairage aux premières observations.

#### 4 Conclusion et perspectives

Le travail initié dans le présent papier est un travail en cours d'acquisition et d'analyse de données. Les premiers résultats, quoique encore insuffisants pour conclure, montrent déjà la réelle nécessité d'adapter les classes de service proposées par Eurocode 5 au contexte de la construction bois en ambiance tropicale. Toutefois, les résultats déjà obtenus dans le cadre de ce travail permettent de :

- Isoler et comprendre les phénomènes différés [12] et leur évolution dans le temps sous conditions climatiques variables.
- Caractériser mécaniquement les deux essences étudiées (moabi et ozigo) vis-à-vis de l'Eurocode 5.
- Identifier les différentes classes de service à travers les données climatiques et les courbes d'équilibre hydrique (en cours).
- Etablir les fonctions de fluage à partir des flèches globales (en cours).

Cette étude fournit une base de données pertinente pour le développement et le calibrage des modèles prédictifs de la réponse structurelle d'éléments fléchis sous climat variable. A terme, l'objectif de ce travail est de proposer un document d'adaptation de l'Eurocode 5 pour les feuillus tropicaux en ambiance tropicale.

#### Références

- [1] Kollmann F.F.P., Côte W.A., "Principles of wood science and technology", Volume 1: Solid wood, Berlin, Springer-Verlag, 1984.
- [2] Rémond R., Passard J., Perré P., "The effect of temperature and moisture content on mechanical behavior of wood: comprehensive model applied to drying and bending", European Journal of Mechanics A/Solids, vol. 26, 2007, p. 558-572.
- [3] AFNOR, NF EN 1995-1-1 : 2005, Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments, AFNOR, 2007.
- [4] Lawniczack M., Raczkowski J., Etude sur quelques bois tropicaux des tensions de désorption apparaissant pendant le retrait perpendiculaire aux fibres, Bois et Forêts des tropiques, n° 82, 1962, CIRAD-Forêt, p. 53-58.

- [5] Themelin A., Comportement en sorption de produits ligno-cellulosiques, Bois et Forêts des tropiques, n° 256 (2), 1998, CIRAD-Forêt, p. 55-67.
- [6] Almeida G., Hernandez R. E., "Changes in physical properties of tropical and tempered hardwoods below and above the fiber saturation point", Wood Science and Technology, vol. 40, 2006, p. 599-613.
- [7] Foudjet A., Bremond C., "Creep of four tropical hardwoods from Cameroon", Wood Science and Technology, vol. 23, 1989, p. 335-341.
- [8] Ayina O., Morlier P., « Un modèle visco-élastique simplifié de fluage à long-terme des poutres en bois sous climat tropical humide », Annales GC Bois, vol. 3, 1998, p. 11-17.
- [9] CIRAD., TROPIC 5.0 : Atlas des bois tropicaux, Département Forêt du CIRAD, 2003.
- [10] AFNOR, NF EN 408 : Structures en bois – Bois de structure et bois lamellé-collé – Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques, AFNOR, 2009.
- [11] AFNOR, NF EN 384 : Structures en bois – Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique, AFNOR, 2009.
- [12] Manfoumbi N., Sauvat N., Dubois F., « Découplage expérimental des déformations d'éléments bois sous chargement hydrique et mécanique variable », European Journal of Environment and Civil Engineering, Soumis et accepté en 2010.