



**HAL**  
open science

## Etude des paramètres de diffusion du bois : approche expérimentale

Martian Asseko Ella, Giacomo Goli, Rostand Moutou Pitti, Joseph Gril, Fournely Eric, Gael Godi

### ► To cite this version:

Martian Asseko Ella, Giacomo Goli, Rostand Moutou Pitti, Joseph Gril, Fournely Eric, et al.. Etude des paramètres de diffusion du bois : approche expérimentale. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280029

**HAL Id: hal-04280029**

**<https://hal.science/hal-04280029>**

Submitted on 10 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Etude des paramètres de diffusion du bois : approche expérimentale

M. ASSEKO ELLA<sup>a</sup>, G. GOLI<sup>b</sup>, R. MOUTOU PITTI<sup>a,c</sup>, J. GRIL<sup>a,d</sup>,  
E.FOURNELY<sup>a</sup>, G. GODI<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Clermont Auvergne Université, CNRS, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France, [martian.asseko\\_ella@etu.uca.fr](mailto:martian.asseko_ella@etu.uca.fr)

<sup>b</sup>University of Florence, DAGRI-Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry, 50145 Firenze, Italia

<sup>c</sup>CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon

<sup>d</sup>Université Clermont Auvergne, INRA, PIAF, F-63000 Clermont Ferrand, France

## Résumé :

*Ce document présente une étude des paramètres de sorption du bois. L'étude est basée sur une approche expérimentale innovante et analytique de la loi de Fick. Elle a été réalisée sur trois essences tropicales africaines, Pterocarpus soyauxii Taub (Padouk), Aucoumea klaineana Pierre (Okoumé) et Milicia excelsq (Iroko) et deux essences tempérées, Abies Alba Mill (Sapin blanc) et Pseudotsuga Menziesii Douglas sous différents paliers d'humidité relative (11, 43, 55, 75, 84 et 97%) à température constante de 20°C. Les teneurs, en eau d'équilibre, ont été obtenus par interpolation. Un tableau d'équilibre hygroscopique de ces essences est proposé.*

## Abstract:

*This paper presents a study of the sorption parameters of wood. The study is based on an innovative experimental and analytical approach of Fick's law. It was carried out on three African tropical species, Pterocarpus soyauxii Taub (Padouk), Aucoumea klaineana Pierre (Okoumé) and Milicia excelsq (Iroko) and two temperate species, Abies Alba Mill (White Fir) and Pseudotsuga Menziesii Douglas under different relative humidity levels (11, 43, 55, 75, 84 and 97%) at a constant temperature of 20°C. The equilibrium moisture contents were obtained by interpolation. A hygroscopic equilibrium table for these species is proposed.*

**Mots clefs : dispositif expérimental, humidité relative, équilibre hygroscopique, bois tropicaux**

## 1 Introduction

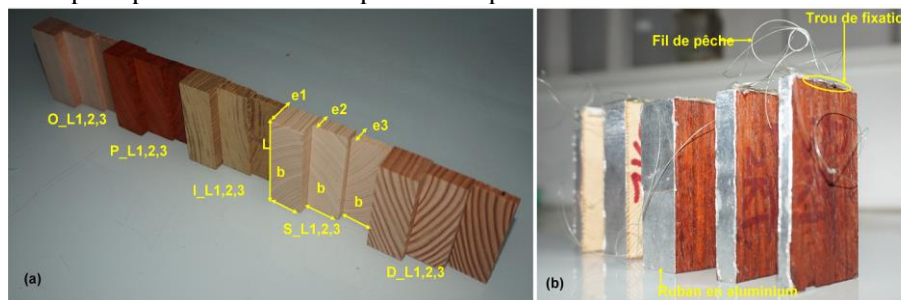
Le bois est un matériau hygroscopique ; ses propriétés mécaniques et physiques dépendent fortement de son état hydrique. L'étude du transfert de la teneur en eau dans un matériau poreux d'un point de vue théorique et expérimental a été largement abordée ces dernières années [1] avec des formulations basées sur la loi de Fick. Dans le bois, l'eau est présente sous forme d'eau libre, sous forme liquide ou de vapeur dans les lumens, et sous forme d'eau liée dans les parois [2]. En dessous du point de saturation des fibres (PSF), le mouvement de l'eau dans le bois est caractérisé par des phénomènes de diffusion. La connaissance des propriétés de l'eau telles que les coefficients de diffusion permet de mieux estimer le flux d'eau désorbé ou adsorbé. Ces propriétés sont impliquées dans plusieurs processus tels que le séchage du bois et les traitements chimiques. Au cours de ce processus de

migration de l'eau, il est important de comprendre les phénomènes impliqués, notamment le processus de diffusion de l'eau. Une bonne caractérisation du processus de diffusion nécessite le développement de techniques expérimentales simples et fiables. A ce jour, il existe plusieurs techniques et méthodes expérimentales permettant de suivre l'évolution de l'humidité dans le bois en régime transitoire et en régime permanent, notamment la méthode de pesée et les méthodes électriques. Certaines de ces techniques nécessitent parfois de sortir le bois de l'enceinte et de le peser sur une balance pour estimer sa masse, ce qui peut parfois perturber l'historique de l'humidité des éprouvettes testées. Par ailleurs, les études sur le comportement hydrique des bois tropicaux sont encore assez rares dans la littérature. Quelques travaux ont été réalisés sur le comportement hydrique des bois tropicaux, notamment ceux de [3] qui ont contribué à l'utilisation de l'Eurocode 5 dans la vérification des constructions en bois et leur dimensionnement en milieu tropical. Ces différentes études sont encore insuffisantes pour mettre en évidence ou valoriser les propriétés des bois tropicaux africains. Cela rend difficile l'intégration des bois tropicaux dans certaines normes actuelles comme l'Eurocode 5, où il n'existe qu'une seule table d'équilibre hygroscopique pour le bois [4]. Ce document présente une étude le comportement hydrique des essences des essences tropicales qui met en évidence une approche expérimentale améliorée pour le suivi en régime transitoire de la masse des éprouvettes de bois et pour la caractérisation hydrique de trois espèces tropicales.

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Matériels

Les essais ont été effectués sur 60 éprouvettes de bois au total : 3 feuillus tropicaux, l'Okoumé (O), le Padouk (P), l'Iroko (I) ; et 2 résineux tempérés, le Sapin blanc (S), le Douglas (D). Ces éprouvettes sont réparties dans 2 boîtes d'essais (boîte  $j=1,2$ ), régulées en humidité relative (HR) au moyen de solutions salines, et elles-mêmes placées dans une pièce régulée en température (T) à 20°C et HR de l'ordre de 43%. Dans chaque boîte, des tests sont réalisés sur des éprouvettes de bois d'épaisseurs différentes (Fig.1a) :  $e_1=20$  mm (type 1),  $e_2=10$ mm (type 2),  $e_3=5$  mm (type 3). Pour chaque essence, l'épaisseur des éprouvettes est orientée suivant la direction longitudinale (L) ou transverse (RT). Afin de forcer la diffusion dans le sens L ou RT, nous avons recouvert les 4 autres faces par plusieurs couches de ruban adhésif en aluminium (Fig.1b). Sur l'une des faces supérieures des éprouvettes nous avons laissé un espace pour fixer un fil de pêche à l'éprouvette.



**Figure 1** : Éprouvettes testées (a) ; types et géométrie des éprouvettes ;(b) éprouvettes avec ruban et fil de pêche

#### 2.1.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental consiste en 2 boîtes de plexiglass de dimensions 45x20x20mm et d'un bras mobile équipé d'une cellule de force (Fig.2). Les boîtes sont conditionnées dans une salle à température et humidité constante de 20°C et de 43%. La cellule permet de mesurer un signal électrique, par la suite converti en masse. L'hygrométrie des boîtes est contrôlée aux moyens des solutions salines. Les boîtes sont dotées de capteurs thermo-hygrométriques pour le suivi de HR et de T. Elles disposent également de ventilateurs pour homogénéiser l'ambiance, que l'on arrête durant les mesures. Une grille métallique empêche les éprouvettes de tomber dans le bac de solution saline. Les éprouvettes sont retenues par le fil de pêche sortant par des trous de 10 mm de diamètre sur la face supérieure de la boîte, refermés avec des bouchons en silicone de forme conique qui bloquent le fil. Le bouchon de chaque éprouvette n'est enlevé que le temps de sa mesure de masse, ce qui réduit considérablement les échanges d'air entre l'intérieur de la boîte et la pièce. Dans le cadre de ce travail

nous avons réalisé des essais en parallèle dans les deux boîtes en utilisant 6 solutions salines pour des ambiances hygrométriques de 11 %, 43 %, 57%, 75% pour la boîte J1 et de 43%,57%, 75%,84% et 95% pour la boîte J2. Chaque solution saline est préparée avec de l'eau distillée contenant du sel en excès selon la norme NF ISO 483 (2010) [5]. Le (Tab.1) indique les sels utilisés ainsi que leur solubilité dans l'eau, permettant d'estimer la quantité minimale de sel à déposer dans le bac.



Figure 2 : Dispositif expérimental pour essais de diffusion

Tableau 1 : Solutions aqueuses utilisées et humidité relative indiquées selon la norme NF ISO 483 à T=20°C.

Solutions salines	Humidité relative (%) NF EN ISO 483	Humidité relative (%) en J1	Temperature (°C) J1	Relative humidity (%) en J2	Temperature (°C) en J2
Chlorure de lithium LiCl	11	12,42 (±1,19)	20,91 (±0,74)	-	
Carbonate de potassium K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	43	43,83(±0,28)	23,34 (±0,58)	42,03 (±0,4)	20,64 (±0, 45)
Bromure de sodium NaBr	57	57,57 (±1,18)	21,33 (±0,96)	57,81 (±1,05)	23,7 (±0, 53)
Chlorure de sodium NaCl	75	74,04(±1,28)	23,84 (±0,52)	73,47 (±1,28)	23,79 (±0,43)
Chlorure de potassium KCl	84	-		83,41 (±0,62)	23,92 (±0, 71)
Sulfate de potassium K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97	-		94,79 (±1,14)	23,27 (±1, 39)

## 2.2 Méthodes

### 2.2.1 Chargement hydrique et suivi de mesure

Après usinage, les éprouvettes sont recouvertes d'un ruban adhésif et séchées à 104°C à l'étuve pour estimation de la masse anhydre. Après cette étape les éprouvettes sont placées dans les boîtes pour le suivi de masse dans un ordre spécifique (Okoumé, Padouk, Sapin blanc, Douglas et Iroko) et en commençant par les éprouvettes de petite épaisseur jusqu'aux plus grandes. Aux premiers instants de chaque chargement hydrique, nous effectuons plusieurs mesures pour mieux estimer le temps de demi-montée ou de sorption  $t_{0,5}$  et de la teneur en eau adimensionnelle  $w^*_{0,5}$ . Comme cela sera expliqué plus loin, ces deux paramètres sont très importants pour l'estimation des coefficients de diffusion et doivent être estimés très rapidement. La première mesure se fait au bout de 10 minutes après le chargement, la deuxième après 30 minutes et la troisième après 3 heures. Le reste des mesures est effectué deux fois par jour jusqu'à stabilisation de la masse de l'éprouvette. L'estimation de la masse  $m^i$  en (g) d'une éprouvette est donnée par (Eq. 1). La cellule de force fournit les signaux électriques  $x^{io}$ ,  $x^p$  et  $x^q$  de deux écrous de calibration, les masses  $m_p$  et  $m_q$  de ces derniers ayant été mesurés préalablement au moyen d'une balance de précision. Cette procédure permet de s'affranchir des dérives éventuelles du capteur de force, en le recalibrant à chaque fois.

$$m^i = m_p + \frac{m_q - m_p}{x^q - x^p} \cdot (x^{io} - x^p) \quad (1)$$

Après obtention de la masse  $m^i$ , le calcul de l'évolution de la teneur en eau dans le temps  $w(t)$  d'une éprouvette est donnée par (Eq. 2).

$$w(t) = \frac{m^i(t) - m_{02}}{m_{01}} \quad (2)$$

### 3 Résultats et analyses

#### 3.1 Estimation de la teneur en eau d'équilibre

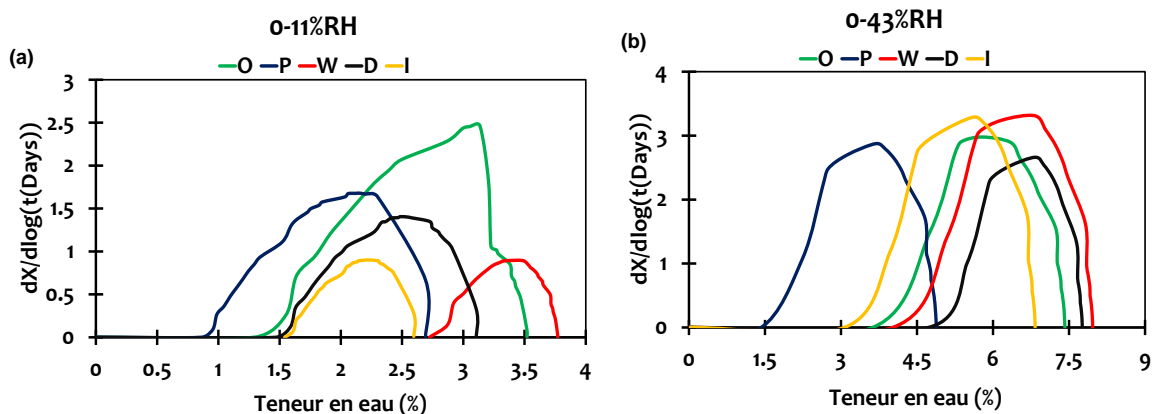
Afin d'éviter d'introduire des erreurs de mesures dans l'estimation de la teneur en eau d'équilibre, il n'est pas très évident de faire une moyenne des dernières valeurs obtenues expérimentalement. De ce fait il est préférable de faire une interpolation de cette valeur. La détermination de la teneur en eau à l'équilibre dans chaque palier s'est faite en considérant une fonction suivant une loi exponentielle  $X(t)$  [6]. Ainsi, en considérant cette fonction  $X(t)$  et les données expérimentales, nous avons minimiser la fonction  $g$  qui évalue les écarts entre les données expérimentales et celles du modèle. Dans notre cas la minimisation de  $g$  a été faite, via le solveur Excel. Cela nous a permis d'avoir une valeur interpolée de MC pour des temps infinis.

$$X(t) = A - B \exp\left(-\frac{t}{C}\right) \quad (3)$$

Avec A, B et C des constantes inconnues, déterminées en minimisant la fonction d'erreur  $g$  comme expliqué ci-dessous. Soit  $t_i$  ( $i = 0..N$ ) les temps de mesure pendant l'étape,  $w_i = w(t_i)$  les mesures de la teneur en eau et  $X_i = X(t_i)$  la valeur modélisée correspondante.

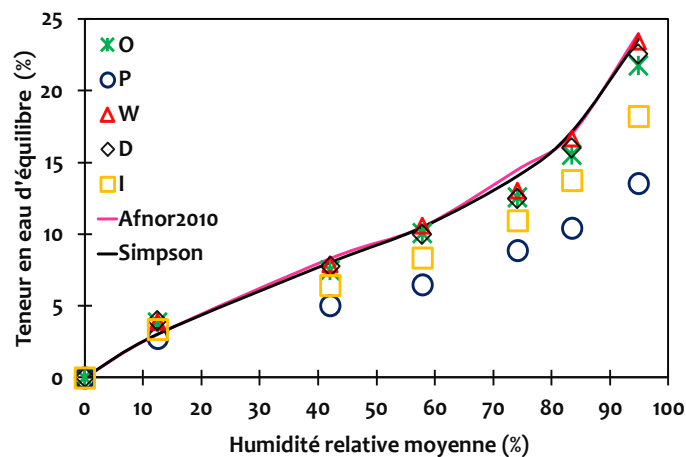
$$g = \sqrt{\frac{1}{N - K} \sum_{i=K+1}^N (w(t_i) - X(t_i))^2} \quad (4)$$

L'estimation de la teneur en eau à l'équilibre s'est faite, en considérant pour chaque palier d'humidité relative la fonction  $X$  qui pour un temps infini tend vers une valeur spécifique, dans notre cas la teneur en eau à l'équilibre. La Fig. 3 présente la dérivée de la fonction analytique  $X$  par rapport au logarithme du temps en fonction de la teneur en eau pour chaque cycle d'humidification : 0-11% (Fig. 3a), 0-43% (Fig. 3b). On observe dans la plupart des cas que la dérivée s'annule à ce point qui est le point d'équilibre ( $w_e$ ). Pour l'estimation de  $w_e$  nous avons considéré uniquement les éprouvettes de type 3 d'épaisseur de 5mm car elles qui arrivent rapidement à l'équilibre.



**Figure 3 :** Détermination de la teneur en humidité d'équilibre à la fin de chaque pour les humidités de 11% et 43% des éprouvettes de 5 mm d'épaisseur : (a) 0-11% HR, (b) 0- 43%HR, O= Okume, P=Padouk, W= Sapin blanc, D=Douglas, I= Iroko) elles qui arrivent rapidement à l'équilibre.

La Fig. 4 montre les différentes valeurs de la teneur en eau (MC) à l'équilibre pour chaque éprouvette. Les valeurs de la teneur en eau trouvées ont été comparées à des valeurs de la littérature, celles données par les abaques d'équilibre hygroscopique AFNOR 2010 et un modèle prédictif de la teneur en humidité à l'équilibre. Ce modèle que nous avons utilisé, est basé sur les paramètres de sorption du modèle de Hailwood [7] pour deux hydrates. Son modèle permet d'estimer la teneur en eau à l'équilibre en fonction de la température (T) et de l'humidité relative (HR).



**Figure 4 :** Teneur en eau à l'équilibre de chaque espèce (croix verte, O= Okume, cercle bleu ; P= Padouk, triangles rouges ; W=Sapin blanc, diamant noir, D = Douglas, carré jaune, I= Iroko, ligne continue rose ; modèle Afnor 2010 ; ligne continue noire, modèle Simpson [9])

Dans notre cas, nous avons utilisé (T) et (RH) donnés par le Tab. 1. Il apparaît que pour certaines essences, les valeurs de MC trouvées à partir de ce modèle sont proches des valeurs prescrites par la charte d'équilibre hygroscopique AFNOR 2010, qui reste la principale référence pour l'estimation de la teneur en eau d'équilibre [2] du bois. Or, cette norme est surtout valable pour les résineux tempérés. Ainsi, sur cette figure, les valeurs de la teneur en eau pour le Sapin blanc, le Douglas et l'Okume sont très proches des valeurs prédites par le modèle de Simpson dans la plupart des cas. Cependant, ces valeurs sont légèrement différentes avec l'Iroko, cette différence est encore plus importante avec le Padouk. Ceci peut être justifié par la teneur en extractibles de ces deux espèces par rapport à celle du Sapin blanc, du Douglas et de l'Okoumé. Selon le CIRAD [8], le Padouk et l'Iroko sont des essences très durables grâce à leur résistance aux champignons, aux insectes et aux termites. Le duramen de Douglas est considéré comme durable vis-à-vis de certains insectes tandis que le Sapin et l'Okoumé sont peu durables. Par ailleurs, plusieurs études ont montré que la durabilité d'une essence est liée à la teneur en extractible et au type de lignine [9]. En considérant également le CIRAD [8], nous pouvons suggérer que les teneurs extractibles du Padouk et de l'Iroko semblent être plus élevées que celles des trois autres espèces. En parallèle selon Chong [10] il existe un lien entre la teneur en extractibles et la teneur en eau à l'équilibre. Il a montré que la valeur de la teneur en humidité d'équilibre du bois riche en matières extractives était inférieure à celle du bois sans matières extractives. Ceci explique pourquoi la teneur en eau du Padouk et de l'Iroko est inférieure à celle des autres espèces testées. Ces résultats mettent donc en évidence le fait que le modèle d'estimation de la teneur en eau proposé par AFNOR 2010 et Simpson [11] pour une température de 20°C ne sont pas adaptés au Padouk et à l'Iroko, mais qu'ils restent applicables à l'Okume.

**Tableau 2 :** Tableau d'équilibre hygroscopique des essences testées pour une température de 20°C

W <sub>e</sub> species	Average relative humidity (%)					
	0-12	12-44	44-57	57-74	74-83	83-95
W <sub>e</sub> O	3.8±0.6	7.5±0.2	10.0±0.8	12.6±0.4	15.5±0.4	21.7±0.8
W <sub>e</sub> P	2.8±0.1	5.0±0.3	6.5±0.6	8.9±0.4	10.4±0.8	13.6±0.9
W <sub>e</sub> W	3.9±0.2	7.9±0.2	10.6±1	13.0±0.4	16.6±0.3	23.4±0.6
W <sub>e</sub> D	4.0±0.5	7.8±0.5	10.0±0.9	12.5±0.6	16.1±0.9	22.6±0.9
W <sub>e</sub> I	3.4±0.5	6.6±0.5	8.3±0.9	10.9±0.3	13.8±0.3	18.2±0.5



Par la suite, nous avons proposé une table d'équilibre hygroscopique pour les essences dont les propriétés d'humidité ne peuvent pas être bien écrites par le modèle AFNOR 2010, à savoir l'Iroko et le Padouk. Le Tab. 2 présente les valeurs moyennes de la teneur en eau (MC) à l'équilibre et leurs écarts types obtenus pour différents cycles d'humidification des espèces testées. Ce tableau reste valable pour une température de 20°C et dans les 6 plages d'humidité relative considérées. De manière générale, il apparaît que si l'on se base sur l'AFNOR 2010 [5] pour estimer le MC de certaines espèces tropicales africaines riches en matières extractibles, il est possible que leurs valeurs estimées soient surestimées comme nous l'avons vu pour le Padouk et l'Iroko.

## 4 Conclusion

Ce document présente une nouvelle approche expérimentale innovante pour l'étude de la diffusion hydrique du bois. Cette approche vient en complément des autres techniques expérimentales qui existent. Le dispositif permet de réaliser plusieurs mesures sans perturber les conditions expérimentales et l'état hydrique des éprouvettes testées. Sur ce dispositif nous avons effectué des essais de diffusion hydriques en adsorption sur des essences et déterminer leur teneur en eau. Ces valeurs ont été comparé aux valeurs des modèles d'estimation de la teneur eau d'équilibre de la littérature. Parmi les essences tropicales testées seules les valeurs des teneurs en eau de l'okoumé le Sapin blanc et le Douglas se rapprochent de celle prédites par les modèles. En revanche elles sont différentes de celles du Padouk et de l'Iroko.

## Références (16 gras)

- [1] K. C. Nadler, E. T. Choong, and D. M. Wetzel. Mathematical modeling of the diffusion of water in wood during drying. *Wood and fiber science*, 17(3) :404–423, 1985.
- [2] N. D. Nelson. Extractives produced during heartwood formation in relation to amounts of parenchyma in *juglans nigra* and *quercus rubra*. *Canadian Journal of Forest Research*, 5(2) :291–301, 1975.
- [3] Manfoumbi Boussougou, N. et al. (2014) 'Experimental and numerical aspects in diffusion process characterization in tropical species', *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(9), pp. 963–982. doi: 10.1080/19648189.2014.917993.
- [4] Varnier, M. (2019) Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : de la science du bois à l'ingénierie To cite this version : HAL Id : tel-02303304 Thèse de doctorat de l'Université de Limoges.
- [5] AFNOR (2010). NF EN 1995-1-1/NA. Eurocode 5: Design and calculation of wooden structures - Part 1-1: general - Common rules and rules for buildings - National annex to NF EN 1995-1-1:2008 - General - Common rules and rules for buildings
- [6] Siau J.F. (1984) Steady-State Moisture Movement. In: *Transport Processes in Wood*. Springer Series in Wood Science, vol 2. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-69213-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-69213-0_6)
- [7] AJ Hailwood and S Horrobin. Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. *Transactions of the Faraday Society*, 42: B084–B092, 1946.
- [8] J. Gérard, D. Guibal, S. Paradis, M. Vernay, J. Beauchêne, L. Brancheriau, I. Châlon, C. Daigremont, P. Détienne, D. Fouquet, et al. Ebene d'afrique. *Tropix*, 7, 2011.
- [9] C Antwi-Boasiako, JR Barnett, and AJ Pitman. Relationship between total extractive content and durability of three tropical hardwoods exposed to *coriolus versicolor* (linnaeus) quelet. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 7(1) :9–13, 2010.
- [10] Elvin T Choong and Suminar S Achmadi. Effect of extractives on moisture sorption and shrinkage in tropical woods. *Wood and Fiber science*, 23(2) :185–196, 1991
- [11] William T Simpson. Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *Wood and fiber science*, 5(1) :41–49, 1973.