

Modélisation des isothermes de sorption, caractérisation des propriétés thermodynamiques et détermination des humidités d'équilibre d'usage des bois tropicaux

M. Simo-Tagne ^{1*}, A. Zoulalian ²
Y. Rogeaume ³, R. Rémond ³ et B. Bonoma ⁴

¹ LERMaB, ENSTIB, Post Doctoral position, University of Lorraine
27 rue Philippe Séguin, P.O. Box 1041, 88051 Epinal, France

² LERMaB, Faculty of Sciences and Technologies, University of Lorraine
Aiguillettes Campus- PO. Box 70239, 54506 Vandoeuvre les Nancy Cedex, Nancy, France

³ LERMaB, ENSTIB, University of Lorraine
27 rue Philippe Séguin, P.O. Box 1041, 88051 Epinal, France

⁴ Higher Teacher Training College, Laboratory of Applied Physics
P.O. Box 47, Yaoundé, Cameroon

(reçu le 10 Janvier 2016 – accepté le 29 Mars)

Résumé - Les bois tropicaux sont largement produits dans le bassin du Congo et en Amazonie et leurs exportations sont source de beaucoup d'argent. Il est important de réduire les pertes suite à une utilisation d'un bon processus de séchage lié aux conditions de l'environnement (température et humidité relative de l'air). Dans ce travail, nous modélisons les isothermes de sorption de six bois tropicaux (Sapele, Afzelia, Obeche, Ebony, Frake et Moabi) en utilisant onze modèles, les points expérimentaux sont pris dans la littérature avec la température de l'air comprise entre 15 et 60°C et l'humidité relative de l'air comprise entre 0.02 et 0.98 %. Selon les valeurs moyennes des erreurs obtenues, les modèles de GAB, Luikov modifié et de Nelson sont les meilleurs modèles recommandés pour traduire les isothermes de sorption des bois tropicaux. Les mauvais modèles sont les modèles d'Halsey modifié, Smith modifié, GAB modifié et le modèle d'Iglesias, Chirife et Halsey. Les modèles qui donnent une description assez satisfaisante sont ceux de Henderson modifié, Oswin modifié et Chung et Pfof modifié. Le modèle de BET est approprié pour estimer la teneur en eau d'équilibre lorsque la monocouche est saturée. Les valeurs des énergies d'activation obtenues sont rangées entre 8420 et 13911 J/mol lors de la désorption et entre 3266 et 6499 J/mol lors de l'adsorption. Les points de saturation des fibres (PSF) et les énergies libres de Gibbs par gramme d'eau adsorbée obtenus décroissent lorsqu'augmente la température à une humidité relative de l'air donnée. Les PSF obtenus sont confinés entre 0.16 et 0.33 kg/kg. Les valeurs moyennes des énergies libres de Gibbs par gramme d'eau absorbée varient de 149 à 206 cal/g. la différence des enthalpies molaires de sorption entre les monocouches et les multicouches au-delà de la saturation de la monocouche est en général supérieure de la différence entre les enthalpies molaires de sorption des multicouches au-delà de la saturation de la monocouche et l'eau à l'état liquide. La teneur en eau d'équilibre au niveau de la saturation de la monocouche est située entre 0.025 et 0.08 kg/kg. A de faibles teneurs en eau, la chaleur isostérique de sorption des bois étudiés est importante et décroît avec une convergence vers 1760 kJ/kg à 40°C lorsqu'augmente la teneur en eau d'équilibre. La température influence la chaleur isostérique de sorption des bois tropicaux étudiés. Les humidités des planches recherchées durant leur séchage sont fonction du milieu d'utilisation (ville, intérieur, extérieur, intérieur conditionné). Ces valeurs sont présentées dans la dernière partie de ce papier.

Abstract - Tropical woods are widely produced in basin of Congo and Amazonian zones and its exportation gives most money. It is important to reduce the losses with using good

* simotagne2002@yahoo.fr

drying in function of environment conditions (air temperature and air relative humidity). In this work, we were modeling sorption isotherms of six tropical woods (Sapele, Afzelia, Obeche, Ebony, Frake and Moabi) using eleven models and experimental data coming from literature with the drying temperature and drying relative humidity ranged from 15°C to 60°C and from 0.02 to 0.98 % respectively. According to the means average error, the best sorption isotherms models are GAB model, Modified Luikov model, and Nelson model, the bad models are Modified Halsey model, Modified Smith model, Iglesias, Chirife and Halsey model and Modified GAB model. The models which can give good descriptions are Modified Henderson model, Modified Oswin model and Modified Chung and Pfost model. BET's model is appropriate to estimate equilibrium water content in the saturation of monolayer. The values of activation energy obtained ranged from 8420 J/mol to 13911 J/mol for desorption and from 3266 J/mol to 6499 J/mol for adsorption. Fiber saturation points (FSP) and Gibbs free energy per gram of sorbed water decrease when increase temperatures at constant relative humidity. The values of FSP obtained ranged from 0.16 kg/kg to 0.33 kg/kg. The means values of Gibbs free energy per gram of sorbed water obtained ranged from 149cal/g to 206cal/g. The difference of the molar sorption enthalpies between the monolayer and the multilayers on top of the monolayer is in general greater than the difference of the molar sorption enthalpies between the multilayers on top of the monolayer and the bulk liquid. The equilibrium moisture content at the saturation of monolayer ranged from 0.025 kg/kg to 0.08 kg/kg. At the lowest water content, isosteric heat of sorption of studied woods is higher and decreases with convergence of all them when increases water content until 1760 kJ/kg at 40°C. Temperature influences the isosteric heat of sorption of studied woods. Water contents to give at each board during drying process are function of air characteristics of the future utilization (town, interior, exterior, conditioned interior). These values are presented at the end part of this paper.

Mots clés: Modélisation - Isothermes de sorption - Paramètres thermodynamiques - Humidités d'usage - Humidité relative - Température - Bois tropicaux.

1. INTRODUCTION

Les forêts tropicales sont présentes dans le bassin du Congo et en Amazonie. Les arbres de ces forêts sont très importants dans la régénération de l'oxygène, et la fixation du gaz carbonique. L'exploitation du bois issu de ces forêts a une importance économique et écologique pour l'humanité en général et pour les riverains en particulier. Par exemple, l'exploitation du bois a longtemps été le deuxième produit d'exportation du Cameroun après le pétrole.

La gestion rationnelle et durable des forêts tropicales est donc souhaitable. En utilisant le processus de séchage, il est possible de stabiliser les produits faits de bois afin de les utiliser longtemps, renforçant ainsi le caractère renouvelable des bois tropicaux tout en satisfaisant les populations riveraines économiquement parlant. Le séchage du bois est un procédé qui permet de réduire la teneur en eau du bois afin d'obtenir une valeur nécessaire à la stabilité du bois, laquelle valeur est fonction des caractéristiques de l'air ambiant. En effet, la teneur en eau des matériaux hygroscopiques en équilibre avec son environnement (aussi appelé teneur en eau d'équilibre) est un paramètre important dans l'étude du procédé de séchage [1]. Ce paramètre permet de déterminer les conditions optimales de stockage [2], de dimensionner et de modéliser plusieurs appareils de traitement et de conditionnement [3, 4]. Les isothermes de sorption d'un produit donné décrit la teneur en eau d'équilibre de ce produit avec l'environnement à une température et pression de l'air connues. La teneur en eau d'équilibre est celle dont l'activité de l'eau dans le produit est neutralisée.

Dans la littérature, plusieurs modèles d'isothermes de sorption sont construits pour expliquer le comportement en sorption des produits alimentaires. Ces modèles peuvent

être regroupés en trois catégories: théoriques, semi empiriques et enfin empiriques [5]. Selon Van den Berg *et al.* [6], approximativement 77 modèles de sorption très utilisés sont disponibles dans la littérature mais, il est difficile de prédire le modèle idéal à priori susceptible de mieux décrire les isothermes expérimentales parce que les produits biologiques ont une structure et une composition complexes [4]. Van den Berg *et al.* [6] ont groupé ces 77 modèles en quatre catégories: (1) les modèles de sorption monocouches localisés, (2) les modèles de sorption multicouches, (3) les modèles de sorption utilisés dans la science des polymères et (4) les modèles empiriques [7]. La littérature montre que plus de un modèle de sorption peuvent décrire les isothermes expérimentales. Le meilleur modèle est celui-là qui décrira le mieux les points expérimentaux, avec une relation simple [4]. Selon Lomauero *et al.* [8], [9] et Kaymak-Ertekin *et al.* [4], le modèle de GAB donne les meilleures représentations des isothermes expérimentales de 50 % de fruits, viande et végétaux analysés. Basé sur les hypothèses du modèle de BET, le modèle de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) a été appliqué successivement sur des produits alimentaires variés [10], et il est recommandé par le Projet Européen COST 90 à utiliser afin de caractériser les propriétés de sorption des aliments [11].

Dans le cas du bois, le modèle de Simpson et TenWolde [12] présenté dans les équations (1) a longtemps été utilisé pour décrire les isothermes de sorption des espèces de bois. Ainsi, est-il judicieux de considérer que toutes les espèces de bois placés dans les mêmes conditions de l'air ont les mêmes caractéristiques de sorption?

$$X_{\text{eq}} = \frac{18}{w} \cdot \left(\frac{k_0 RH}{1 - k_0 RH} + \frac{k_0 k_1 RH + 2k_1 k_2 k_0^2 RH^2}{1 + k_0 k_1 RH + k_1 k_2 k_0^2 RH^2} \right) \quad (1)$$

$$w = 349 + 1.29T + 0.0135T^2 \quad (2)$$

$$k_0 = 0.805 + 0.000736T - 0.00000273T^2 \quad (3)$$

$$k_1 = 6.27 - 0.00938T - 0.000303T^2 \quad (4)$$

$$k_2 = 1.91 + 0.0407T - 0.000293T^2 \quad (5)$$

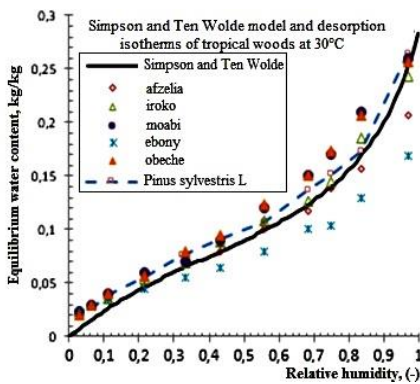
T est la température en °C et RH l'humidité relative.

La figure 1 montre la nécessité de définir les modèles des isothermes de sorption spécifiques à chaque type de bois tropical. En effet, les figures 1a, 1b, 1c et 1d montrent que le modèle de Simpson et TenWolde peut être utilisé pour estimer les isothermes de désorption des bois tempérés, Bekkioui [13] et les travaux de Bekkioui *et al.* [14, 15], mais pas recommandés pour les bois tropicaux. Pour estimer les isothermes de ces derniers, plusieurs travaux dans la littérature utilisent le modèle de GAB [16-20]. Ces travaux présentent des résultats satisfaisants lorsque le modèle est utilisé aux températures expérimentales. Simo-Tagne *et al.* [20] utilisent le modèle de GAB pour prédire les isothermes de sorption des bois d'ayous et d'ebene à des températures de 20°C à 60°C. Bonoma *et al.* [21] utilisent les modèles de Chung-Pfost et de Hernández pour prédire les isothermes de sorption des bois d'ayous et d'ebene respectivement, des paramètres variant en fonction de la température. Fernández *et al.* [22] utilisent le modèle de Henderson modifié pour prédire les isothermes de sorption du bois de frake de 15 à 50°C avec satisfaction.

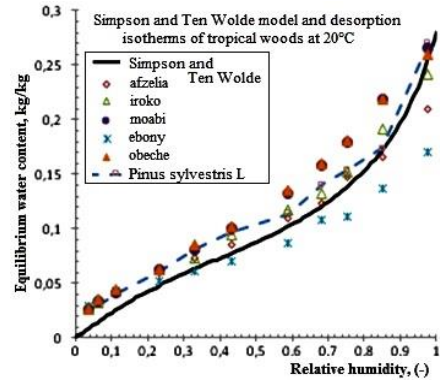
Dans les travaux de la littérature cités, il n'est pas étudié les modèles qui pourraient satisfaire le mieux les isothermes expérimentales. En plus les paramètres thermo-physiques des bois tropicaux ne sont pas suffisamment étudiés. Nous utilisons onze

modèles d'isothermes de sorption afin de corréliser les isothermes expérimentales de six bois tropicaux {sapelli (*Entandrophragma Cylindricum* Sprague), afzelia (*Afzelia* spp.), ayous (aussi appelé Obeche) (*Triplochiton Scleroxylon* K. Schum), ebene (*Diospyros Crassiflora*), fraque (*Terminalia Superba* Engl. & Diels) et moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre)}. Les données expérimentales sont prises dans la littérature [16-19, 21, 22]. Ces espèces de bois sont très lourds (afzelia et ebene), moyens (sapelli et moabi) et légers (ayous et fraque). Les modèles utilisés sont théoriques, semi empiriques et empiriques.

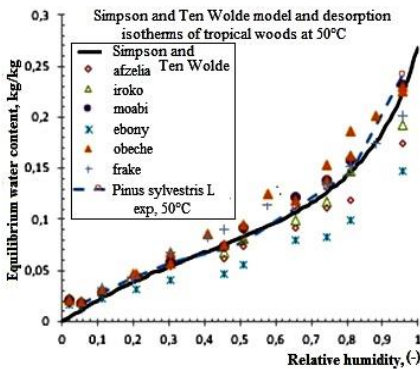
Dans ce travail, notre objectif est de recenser les modèles d'isothermes de sorption les plus indiqués pour corréliser les isothermes expérimentales des bois tropicaux dans toute la plage d'humidité relative, les températures variant continuellement entre 15 et 60°C, aussi de proposer les teneurs d'équilibre des bois à atteindre par les sècheurs en fonction de l'ambiance ou seront utilisées les œuvres en bois afin de les rendre stable, c'est-à-dire durable. Ces corrélations sont aussi importantes d'utiliser pour modéliser et dimensionner les systèmes lorsque les caractéristiques de l'air sont variantes durant les processus comme les séchages solaires et conventionnels. Les teneurs utilisées ici sont celles de la base sèche.



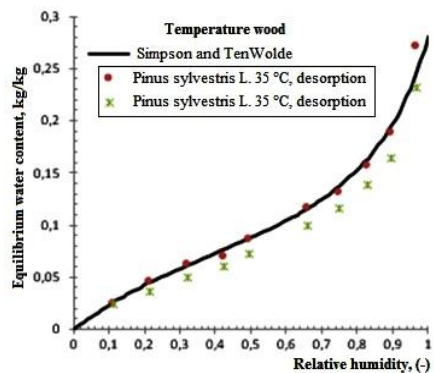
a- Tropical and pinus woods, 30°C [18, 19]



b- Tropical and pinus woods, 20°C [18, 19]



c- Tropical and pinus wood, 50°C, [17, 19]



d- Temperate wood (pinus) 35°C, [16]

Fig. 1: Experimental sorption isotherms of temperate and tropical woods and Simpson and TenWolde model

2. MATERIEL ET METHODE

Une partie des échantillons utilisés ici est issue de la forêt de la région du Sud Cameroun (ayous, fraque, afzelia, moabi et ebene) [18]. Une autre partie (ayous et fraque)

vient d'une scierie espagnole [17]. Les échantillons de *Pinus sylvestris L.* utilisés à 35°C viennent de six arbres d'une forêt espagnole [16]. Les échantillons de *Pinus sylvestris L.* utilisés à d'autres températures viennent de Finlande [19].

Les isothermes de sorption du bois peuvent être déterminées à partir de trois méthodes: gravimétrique, manométrique et hygrométrique [23, 24]. Dans les méthodes gravimétriques, les échantillons sont pesés par une balance et placés dans un environnement contrôlé en humidité relative grâce aux solutions salines et en température grâce à une étuve. En général, chaque point d'humidité relative est déterminé par une solution saline et chaque pesée est effectuée lorsqu'un point d'équilibre est atteint. A une température donnée, chaque solution saline impose une humidité relative de l'air précise comme donné dans les travaux [2, 4]. Dans les méthodes manométriques, l'appareil est constitué d'un échantillon et d'un piston encastrés dans une conduite cylindrique et calibrée. Si l'échantillon est sec, un volume de vapeur connu est introduit dans la conduite à une température et une pression connues. Lorsque l'équilibre est atteint, la pression de la vapeur est de nouveau mesurée afin d'estimer la masse de l'échantillon. Dans les méthodes hygrométriques, à une teneur en eau donnée, l'humidité relative d'équilibre de l'air avec l'échantillon est mesurée. Les données expérimentales utilisées dans ce travail sont obtenues à partir de la méthode gravimétrique et tirées de la littérature [16-19, 21].

Le **Tableau 1** présente les équations utilisées pour modéliser les isothermes de sorption des bois étudiés. Pour obtenir les paramètres relatifs à chaque espèce de bois plongé dans des conditions définies, une forme linéaire est traduite, excepté le modèle de GAB et celui de GAB modifié où un polynôme de degré 2 est utilisé comme suggéré par Akoy *et al.* [2]. Nous avons utilisé le logiciel Microsoft Excel dans sa version 2007 afin de déterminer les valeurs des coefficients des paramètres des polynômes linéaires ou non linéaires. Pour extraire les paramètres thermo-physiques, le modèle semi empirique (modèles de Nelson et de GAB) et le modèle théorique (modèle de BET) sont utilisés comme suggérés dans la littérature [2, 9, 18, 25].

Pour évaluer le degré de fiabilité de chaque modèle à traduire les isothermes expérimentales, l'erreur relative moyenne en pourcent donnée par l'équation (6) est utilisée. Cette erreur sur chaque espèce de bois est évaluée sur tous les points expérimentaux obtenus à toutes les températures étudiées.

$$\text{MRE}(\%) = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|X_{\text{eq}_{\text{exp}_i}} - X_{\text{eq}_{\text{theo}_i}}|}{X_{\text{eq}_{\text{exp}_i}}} \quad (6)$$

Où $X_{\text{eq}_{\text{exp}_i}}$ et $X_{\text{eq}_{\text{theo}_i}}$ sont les valeurs des teneurs en eau expérimentales et prédites respectivement. N est le nombre de points expérimentaux. Le modèle est considéré satisfaisant si la moyenne des N valeurs est inférieure ou proche de 10 % [4].

Chaleur isostérique de sorption

C'est l'énergie totale nécessaire pour extraire une unité de kilogramme d'eau d'un produit biologique comme le bois et de l'évaporer. On l'exprime en kJ/kg et sera représentée par h_s . Pour l'estimer, nous utilisons l'équation (7) suivante comme l'ont fait Thorpe [26] et Li [27].

$$h_s = h_v \left(1 + \frac{P_s}{RH} \times \frac{dT}{dP_s} \times \frac{\partial RH}{\partial T} \Big|_{X_{\text{eq}}} \right) \quad (7)$$

P_s est la pression de vapeur à saturation en Pa et donnée par l'équation (8) [28], h_v est la chaleur latente de vaporisation de l'eau libre en kJ/kg et donnée par l'équation (9) [27]. L'humidité relative de l'air RH est déduite du modèle de Nelson et exprimée à l'équation (10).

$$P_s = \exp\left(25.5058 - \frac{5204.9}{T}\right) \quad (8)$$

$$h_v = 2501.33 - 2.363 T \quad (9)$$

$$RH = \exp\left(-\frac{W_w}{RT} \exp\left(\left(1 - \frac{X_{eq}}{M_v}\right) \times \ln(\Delta G_0)\right)\right) \quad (10)$$

Ainsi, les différentes dérivées qui interviennent dans l'équation (7) sont traduites aux équations (11) et (12).

$$\frac{\partial RH}{\partial T}\bigg|_{X_{eq}} = RH \left(\frac{W_w}{RT} \left(\frac{1}{T} - \left(\frac{C \times X_{eq} \times \ln(\Delta G_0)}{M_v^2} + \frac{A}{\Delta G_0} \left(1 - \frac{X_{eq}}{M_v}\right) \right) \right) \right) \exp\left(\left(1 - \frac{X_{eq}}{M_v}\right) \times \ln(\Delta G_0)\right) \quad (11)$$

$$\frac{dP_s}{dT} = \frac{5204.9}{T^2} \exp\left(25.5058 - \frac{5204.9}{T}\right) \quad (12)$$

Table 1: Sorption isotherms models used in this study and theirs linear or nonlinear forms [24, 27, 29-34]

Isotherms	Expression	Linear or nonlinear forms and plot
Modified Oswin	$X_{eq} = (A + BT) \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^{1/C} \quad (13)$	$\ln(X_{eq}) = \ln(A + BT) + \frac{1}{C} \ln\left(\frac{RH}{1 - RH}\right)$ Plot- $\ln(X_{eq})$ vs $\ln(RH/(1 - RH))$
Modified Smith	$X_{eq} = B + AT + C \ln(1 - RH) \quad (14)$	$X_{eq} = B + AT + C \ln(1 - RH)$ Plot- $\ln(X_{eq})$ vs $\ln(1 - RH)$
Modified Halsey	$X_{eq} = \left(\frac{-\exp(A + CT)}{\ln(RH)} \right)^{1/BT + D} \quad (15)$	$\ln(X_{eq}) = \frac{A + CT}{D + BT} - \frac{1}{D + BT} \ln(-\ln(RH))$ Plot- $\ln(X_{eq})$ vs $\ln(-\ln(RH))$
GAB	$X_{eq} = \frac{K.C.X_m.RH}{(1 - K.RH)(1 - KRH + C.K.RH)}$ $C = C_0 \exp(\Delta H_c/RT) \quad (16) \uparrow$ $K = K_0 \exp(\Delta H_k/RT) \quad (17)$ $X_m = X_{m0} \exp(E_a/RT)$	$\frac{RH}{X_{eq}} = \frac{1}{CKX_m} + \frac{C - 2}{CX_m} RH$ $K \frac{1 - C}{CX_m} RH^2$ Plot- RH/X_{eq} vs RH
Modified Henderson	$RH = 1 - \exp(-A.(T + B)X_{eq}^C) \quad (18)$	$\ln(-\ln(1 - RH)) = \ln(A(T + B)) + C \ln(X_{eq})$ Plot- $\ln(-\ln(1 - RH))$ vs $\ln(X_{eq})$
Modified BET $RH \leq 0.5$	$X_{eq} = \frac{C.X_m.RH}{(1 - RH)(1 - RH + C.RH)} \quad (19)$ $X_m = A + BT$ $C = D.(1/T)^2 + E.(1/T) \quad (20)$	$\frac{RH}{(1 - RH)X_{eq}} = \frac{1}{CX_m} + \frac{C - 1}{CX_m} RH$ Plot- $RH/(1 - RH)X_{eq}$ vs RH

Isotherms	Expression	Linear or nonlinear forms and plot
Modified GAB	$X_{eq} = \frac{AB(C/T)RH}{(1-BRH)(1-BRH+(C/T)BRH)} \quad (21)$	$\frac{RH}{X_{eq}} = \frac{1}{ABC/T} + \frac{CT-2}{AC/T}RH + B\frac{1-C/T}{AC/T}RH^2$ Plot- RH/X_{eq} vs RH
Iglesias, Chirife, Halsey	$X_{eq} = A(T \ln(1/RH))^{-B} \quad (22)$	$\ln(X_{eq}) = \ln A - B \ln(T) - B \ln(-\ln(RH))$ Plot- $\ln(X_{eq})$ vs $\ln(-\ln(RH))$
Modified Chung, Pfof	$RH = \exp\left(\frac{-A \exp(-BX_{eq})}{T+C}\right) \quad (23)$	$X_{eq} = -\frac{1}{B} \ln\left(\frac{T+C}{A}\right) - \frac{1}{B} \ln(-\ln(RH))$ Plot- X_{eq} vs $\ln(-\ln(RH))$
Modified Luikov	$X_{eq} = \frac{AT+B}{1-C \ln(RH)} \quad (24)$	$\frac{1}{X_{eq}} = \frac{1}{AT+B} - \frac{C}{AT+B} \ln(RH)$ Plot- $1/X_{eq}$ vs $\ln(RH)$
Nelson	$X_{eq} = M_v \left(1 - \frac{1}{\ln \Delta G_0} \ln\left(-\frac{RT}{w_w} \ln RH\right)\right) \quad (25)$ $\Delta G_0 = AT + B; M_v = CT + D \quad (26)$	$X_{eq} = M_v \left(1 - \frac{1}{\ln \Delta G_0} \ln\left(\frac{RT}{W_w}\right)\right) - \frac{M_v}{\ln \Delta G_0} \ln(-\ln RH)$ Plot- X_{eq} vs $\ln(-\ln(RH))$

X_{eq} est la teneur en eau d'équilibre (kg/kg), RH est l'humidité relative (-). T est la température en Kelvin. A, B, C et D sont les paramètres déterminés expérimentalement, R = 8.314 J/(mol.K) (ou = 1.988 cal/(mol.K)) est la constante des gaz parfaits; $W_w = 18$ g/mol, c'est la masse moléculaire de l'eau; ΔG_0 (cal/g): l'énergie libre de Gibbs par gramme d'eau adsorbée. M_v , une constante du produit qui approxime le point de saturation des fibres lors de la désorption ou de l'adsorption.

$$\Delta H_c = H_0 - H_n \quad \Delta H_k = H_n - H_1 \quad (17)$$

Où, H_0 , H_n et H_1 sont les enthalpies molaires de sorption de la monocouche, des multicouches au dessus de la monocouche et de l'eau vapeur respectivement. E_a est l'énergie d'activation et X_{eq_m} est la teneur en eau à la saturation de la monocouche (kg/kg). R est la constante des gaz parfaits et T est la température absolue [23]. Une fois connues ces isothermes de sorption et les caractéristiques de l'air (température et humidité relative) dans une enceinte, on peut déduire la teneur en eau du bois que le sécheur doit atteindre afin de stabiliser l'œuvre fait de bois durant son usage. Le meilleur modèle obtenu est utilisé à cet effet.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans le **Tableau 2**, nous présentons les paramètres des isothermes de sorption utilisés dans ce travail appliquées aux bois étudiés. En se référant aux moyennes des erreurs relatives obtenues, nous pouvons dire que les meilleurs modèles sont ceux de GAB, Luikov modifié et de Nelson. Les modèles pas recommandés sont ceux de Halsey modifiés, de Smith modifié, de Iglesias, Chirife et Halsey et enfin de GAB modifié. Les modèles qui peuvent donner une bonne description sont ceux de Henderson modifié, de Oswin modifié et enfin celui de Chung et Pfof modifié. La figure 2 présente les

courbes des isothermes de désorption de chaque bois étudié en utilisant les meilleurs modèles.

La figure 3 présente les courbes des isothermes d'adsorption des bois d'ayous et de fraké en utilisant les meilleurs modèles. Nous constatons qu'il est difficile qu'un même modèle puisse traduire les isothermes d'adsorption et de désorption des bois tropicaux avec fidélité. Il importe alors de faire un test sur les trois meilleurs modèles ci-dessus cités chaque fois qu'il est question de modéliser les isothermes d'adsorption ou de désorption des bois tropicaux dans des plages de température et d'humidité relative données.

Les paramètres ΔH_c et ΔH_k représentent les valeurs moyennes de la chaleur de sorption de l'eau dans le bois.

Le paramètre ΔH_c est la différence entre la chaleur de condensation de l'eau et la chaleur de sorption des couches multimoléculaires [9]. Exceptés les bois d'afzelia et d'ayous dans la phase de désorption, les valeurs estimées obtenues sont positives montrant que l'interaction entre la vapeur d'eau et les sites de sorption primaire des bois respectifs est fortement exothermique (l'interaction est endothermique dans le cas des bois d'afzelia et d'ayous dans la phase de désorption). Ce paramètre est très important dans le cas du bois d'ebene montrant la forte liaison entre les molécules d'eau et les sites actifs du bois.

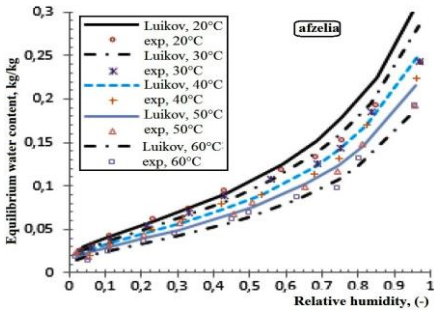
Le paramètre ΔH_k exprime la différence d'enthalpie entre la monocouche et les multicouches de sorption [9]. Excepté le fraké dans les phases de désorption et d'adsorption, ΔH_k est négatif et rangé de -4046 J/mol à -1831 J/mol. Ainsi, la liaison entre la monocouche et la multicouche est endothermique, exception faite sur le cas du fraké qui est exothermique. Sachant que les estimations des valeurs de ΔH_k pour les végétaux variant entre 28900 J/mol et 34500 J/mol et pour les fruits variant entre 14300 J/mol et 22200 J/mol, et sachant que les valeurs de ΔH_c pour les végétaux varient entre 5490 J/mol et 6750 J/mol et pour les fruits varient entre -1300 J/mol et -145 J/mol, les différences relatives des caractéristiques de sorption entre les bois étudiés et les fruits et végétaux sont claires.

La figure 4 présente l'influence de la température sur le point de saturation des fibres, sur l'énergie libre de Gibbs et la teneur en eau au point de saturation de la monocouche. Ces trois paramètres thermo-physiques diminuent linéairement lorsque la température augmente. A 15 °C, les teneurs en eau d'équilibre à la saturation de la monocouche sont rangées de 0.08 kg/kg à 0.04 kg/kg. A 60 °C, elles vont de 0.06 kg/kg à 0.025 kg/kg. Au point de saturation des fibres, l'influence de la température est faible mais pas négligeable. Exception faite à l'ayous, les autres bois étudiés ont des humidités au point de saturation des fibres inférieures à 0.3 kg/kg. Entre 15 et 60 °C, les bois étudiés (sauf l'ayous) ont des humidités au point de saturation des fibres localisées entre 0.15 kg/kg et 0.3 kg/kg. Celles de l'ayous en désorption dans la même tranche de température se situent entre 0.3 et 0.35kg/kg.

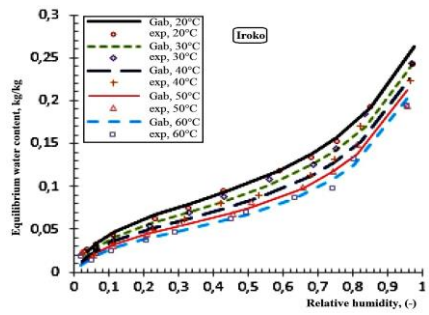
L'énergie libre de Gibbs des bois étudiés varie de 110 à 300 cal/g. Les valeurs moyennes en désorption sont comprises entre 118 cal/g et 206 cal/g. Appliquées sur les bois de frake et d'ayous, l'énergie libre de Gibbs en adsorption est de 174 cal/g pour le frake et 177 cal/g pour l'ayous. La valeur moyenne de l'énergie libre de Gibbs obtenue par Nelson sur les bois tempérés est de 165 cal/g [34].

Table 2: Isotherm parameters and mean relative error obtained using the linear method (nonlinear method for GAB and Modified GAB models)

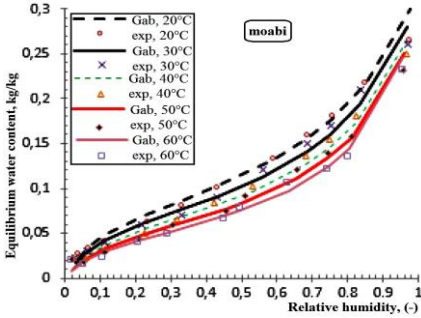
Models	Parameters	Tropical woods											
		Afzelia		Iroko		Ebony		Moabi		Ayous		Frake	
		desorption	desorption	desorption	desorption	desorption	desorption	adsorption	adsorption	desorption	adsorption		
GAB	C_0	31.901	7.4254	0.07341	8.902	100.3365	3.0357	0.76756	1.5189				
	ΔH_s (J/mol)	-1585.247	1799.205	14964.6335	802.114	-7391.3406	1551.8971	6094.7665	4053.4818				
	K_0	2.305	1.597	2.9943	1.870	3.53826	1.869642	0.32482	0.641				
	ΔH_s (J/mol)	-2862.972	-1831.894	-3463.3781	-2208.216	-4045.3993	-2644.432	1600.2818	205.1491				
	X_{mo} (kg/kg)	5.023×10^{-3}	1.22×10^{-3}	2.762×10^{-4}	1.164×10^{-3}	3.461×10^{-4}	7.52×10^{-3}	3.41×10^{-3}	0.020812				
	E_s (J/mol)	12047.120	9926.935	12882.096	10337.483	13910.4126	6498.5052	8420.7271	3266.3254				
MRE(%)	8.235	8.605	8.1315	10.007	16.668	6.541	11.990	6.763					
Modified GAB	A (kg/kg)	0.053	0.0563	0.040312	0.0632	0.082756	0.09772	0.06757	0.07535				
	B	0.767	0.7895	0.7910412	0.800	0.732534	0.661822	0.748383	0.694923				
	C	5539.532	4820.974	7455.14831	3797.391	2914.90246	1725.288	2229.7684	2291.323				
	MRE(%)	17.035	17.574	20.6589	16.880	29.793	7.895	15.472	9.141				
Iglesias, Chirife and Halsey	A	0.24027	0.2211	0.3817	0.2427	0.6764	0.294	0.388	0.137				
	B	0.31	0.377	0.373	0.285	0.401	0.219	0.28	0.206				
	MRE(%)	36.81	56.364	28.794	43.608	33.607	36.511	27.289	46.378				
Modified Chung and Pfost	A	304.2	316.6	252.303	374.2365	305.4396	485.2583	340.7153	391.7				
	B	26	22.349	32.0833	19.1953	17.8785	21.2498	20.522	21.986				
	C	-256.7	-252.8	-267.195	-231.2937	-236.4865	-207.3003	-246.9322	-231.3				
	MRE(%)	10.9442	14.536	10.489	14.213	14.397	12.998	9.189	8.337				
Modified Henderson	A	0.993	0.651	-5.40699	0.27612	0.391	-0.06716	0.20503	0.1605				
	B	-206.7472	-209.217	-353.2312	-161.3896	-220.4859	-722.59	-119.6897	-40.74563				
	C	2.011	1.898	2.1244	1.7734	1.7246	1.628	1.78167	1.71167				
	MRE(%)	11.967	11.427	39.159	13.044	10.251	10.393	7.915	7.648				
Modified Oswin	A	0.298302	0.3001	0.3047107	0.321543	0.3587	-0.1015	0.3614	0.2725				
	B	-0.00072	-0.00071	-0.000778	-0.00075	-0.000859	0.0006	-0.00085	-0.0006				
	C	2.8125	2.672	2.9865	2.499	2.4011	2.7253	2.9727	2.84461				
	MRE(%)	11.088	11.8154	10.837	13.602	16.902	21.464	13.011	12.687				
Modified Halsey	A	-10.26	-9.773	-37.23515	-9.964	-6.915325	-13.7661	-8.8431	-14.0022				
	B	-0.013	-0.0107	-0.0268	-0.0114	-0.0171	-0.0168	-0.0114	-0.0132				
	C	0.014	0.0143	0.09687	0.01641	0.006592	0.0259	0.0131	0.02638				
	D	6.0463	5.2144	10.4649	5.3147	7.2411	7.4114	5.3147	6.3049				
	MRE(%)	21.881	23.385	30.219	25.163	32.126	22.357	22.899	20.06				
Modified Luikov	A	-0.00283	-0.00331	-0.000293	-0.004575	-0.00408	0.00093	-0.00018	-0.000303				
	B	1.1074	1.3154	0.244603	1.8145	1.672	0.0715	0.356303	0.363724				
	C	2.6981	3.333	2.1676	4.735	4.8337	3.933	3.0149	3.0548				
	MRE(%)	7.406	8.9302	18.247	10.6832	13.797	14.427	11.864	10.211				
Modified Smith	A	-0.0007	-0.00061	-0.00079	-0.00075	-0.001	-0.0009	-0.0007	-0.000551				
	B	0.2503	0.2261	0.275589	0.271263	0.341	0.3327	0.2713	0.21698				
	C	-0.052	-0.0604	-0.0426	-0.0702	-0.09343	-0.0627	-0.063	-0.056				
	MRE(%)	20.317	20.726	14.981	23.025	17.028	21.342	15.912	15.508				
Modified BET $RH \leq 0.5$	A	0.1792	0.188	0.144523	0.1885	0.2678074	0.29793	0.2296	0.235225				
	B	-4.37×10^{-4}	-4.53×10^{-4}	-3.6×10^{-4}	-4.42×10^{-4}	-6.765×10^{-4}	-7.62×10^{-4}	-5.21×10^{-4}	-5.79×10^{-4}				
	D	1451×10^8	17.81×10^8	-65.66×10^8	11.921×10^8	20.47×10^8	-13.7×10^8	11.04×10^8	1.96×10^8				
	E	-9.05×10^3	-9.86×10^3	41.27×10^3	-62.9×10^3	-137.5×10^3	82.57×10^3	-7.2×10^3	-1.36×10^3				
	F	1.432×10^3	152.025	-64.74×10^3	94.008	242.220	-116.07	123.6	242.86				
	MRE(%)	12.347	13.559	76.378	11.483	24.699	7.945	7.168	7.202				
Nelson	A	-1.574	-0.65	-4.0002	-0.669	-1.21588	-1.92681	-0.53	-0.85459				
	B	684.10	373.6	1458.592	369.7	524.6895	767.7756	330.012	420.9664				
	C	-0.001	-0.0012	-0.0005	-0.001	-0.00084	-0.0002	-0.00129	-0.0007				
	D	0.5151	0.6056	0.32141	0.5704	0.57083	0.33032	0.66	0.45313				
	MRE(%)	9.102	9.864	10.887	12.174	18.746	11.826	7.527	6.967				



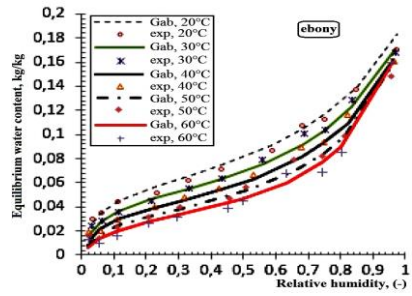
-a- afzelia



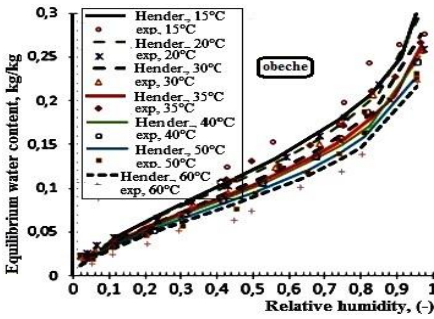
-b- iroko



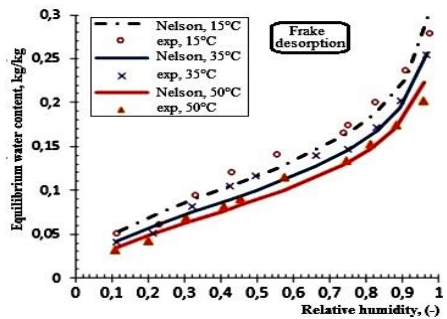
-c- moabi



-d- ebony



-e- obeche



-f- frake

Fig. 2: Experimental desorption isotherms and estimation using the best models obtained (all studied woods).

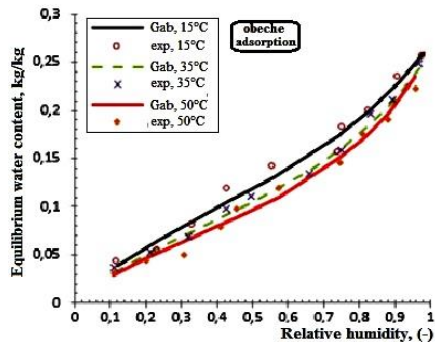
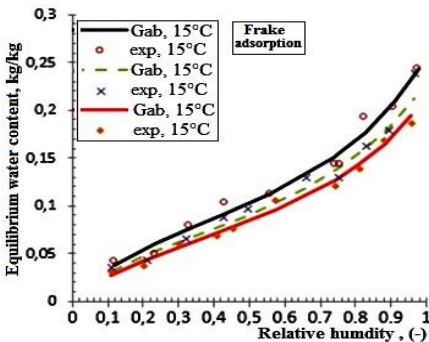
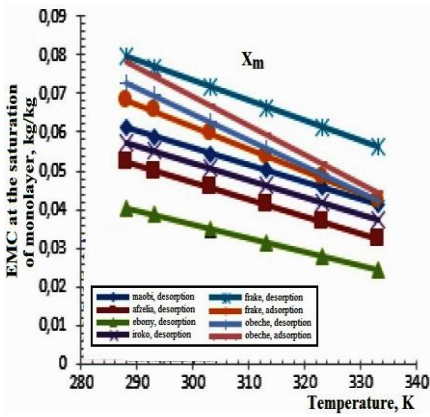
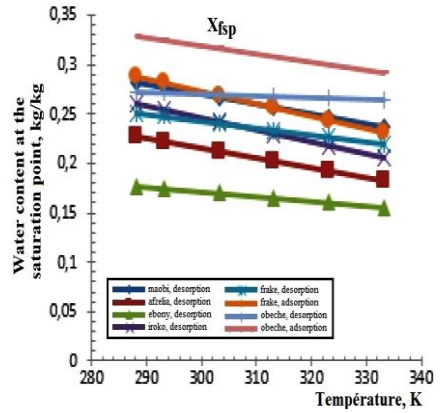


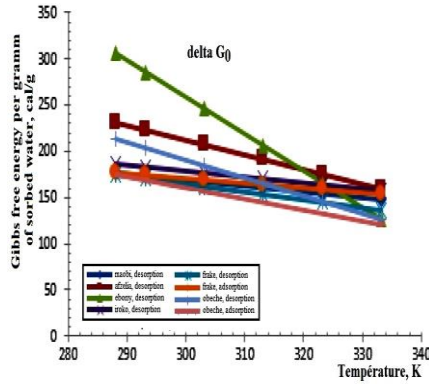
Fig. 3: Experimental adsorption isotherms and estimation using the best models obtained (ayous and frake)



a- EMC on the saturation of the monolayer

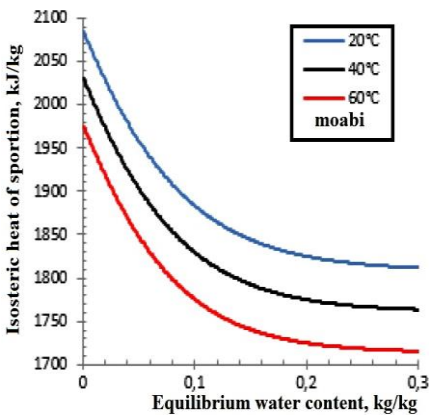


b- EMC on the fiber saturation point

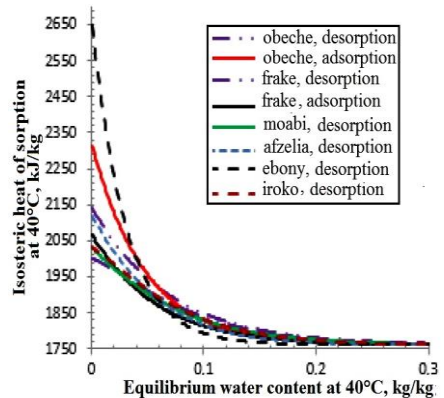


c- Gibbs free energy

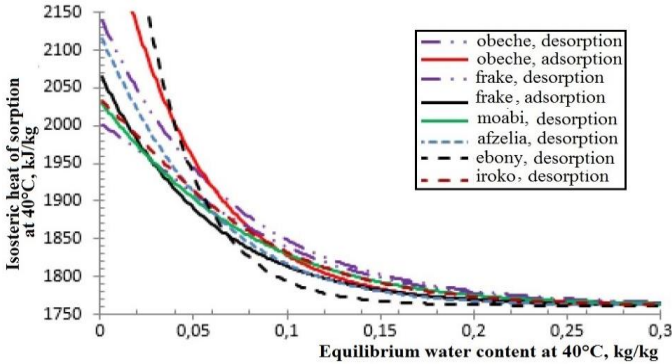
Fig. 4: Influence of temperature on Gibbs free energy, equilibrium water content on the fiber saturation point and on the saturation of the monolayer



a- Influence of temperature



b- Comparison of the isosteric of our wood at 40°C



c- Amélioration of presentation of figure 5b-
 Fig. 5: Isosteric heat of sorption of our studied woods

Les chaleurs isostériques des bois tropicaux étudiés (figure 5) diminuent rapidement lorsque augmente la teneur en eau d'équilibre jusqu'à 0.1 kg/kg, aussi bien dans le processus d'adsorption que de désorption.

Au-delà de 0.1 kg/kg, la diminution devient faible jusqu'à atteindre 1765 kJ/kg à 40°C, et 1720 kJ/kg à 60°C. A des teneurs en eau inférieures à 0.1 kg/kg, les chaleurs isothermiques à des faibles températures, aussi bien en désorption qu'en adsorption sont supérieures que celles trouvées à des fortes températures.

En dessous de 0.07 kg/kg, les chaleurs isostériques en désorption sont suffisamment supérieures que celles obtenues dans la phase d'adsorption. Au-dessus de 0.07 kg/kg, on observe une faible différence entre ces chaleurs isostériques. Initialement lorsque la teneur en eau d'équilibre est égale à 0.001 kg/kg, les chaleurs isothermiques sont proches de 2795 kJ/kg pour le bois d'ebene, de 2140 kJ/kg pour le bois d'ayous, de 2553 kJ/kg pour le bois d'afzelia, et de 2020 kJ/kg pour les bois de frake, d'iroko et de moabi.

La figure 6 présente les températures et les humidités relatives de l'air extérieur de 5 villes tropicales (Yaoundé, Libreville, Bafoussam, Douala et Kinshasa). Il vient que ces caractéristiques diffèrent d'une ville à l'autre, et même d'un mois à l'autre. Ainsi, le séchage du bois à utiliser à l'extérieur doit être mené afin d'atteindre une teneur en eau moyenne fonction de la ville. Aussi, il en est de même pour le séchage du bois qui doit être utilisé à l'intérieur.

La figure 7 présente comme exemple les évolutions des caractéristiques de l'air à l'intérieur d'une maison non conditionnée dans la ville de Douala, lesquelles sont comparées avec les caractéristiques de l'air extérieur.

Les caractéristiques de l'air intérieur des habitats conditionnés sont généralement amenées à des valeurs satisfaisant au confort thermique des occupants. Les bois séchés à destination de ces enceintes doivent alors tenir compte de ces valeurs-là. Le **Tableau 3** ci-dessous donne les caractéristiques de l'air pour s'assurer d'un confort thermique dans les villes de Douala et de Yaoundé.

Tableau 3: Zone de confort thermique des villes de Yaoundé et de Douala [41]

Ville	Yaoundé	Douala
Acceptabilité thermique	23.28 < T ₀ < 27.21°C	24 < T ₀ < 28.13°C
	HR=60% à 27.21°C	HR=60% à 28.13°C
	HR=70% à 23.28°C	HR=69% à 24°C

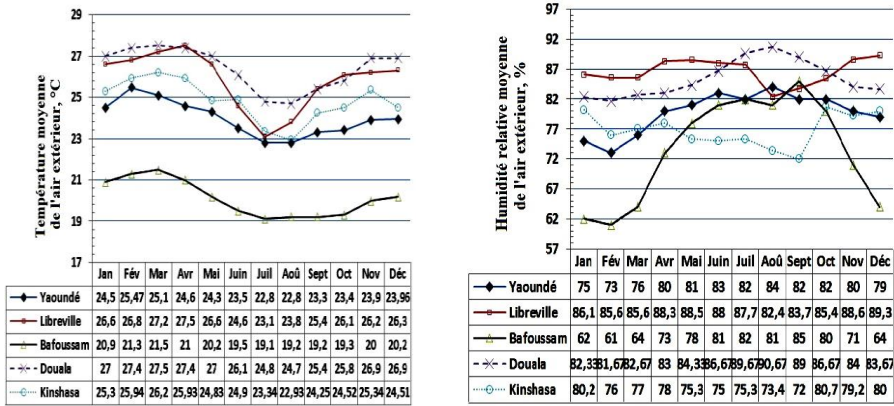


Fig. 6: Températures et humidités relatives de l'air extérieur moyennes de 5 villes tropicales au cours de l'année [35-39]

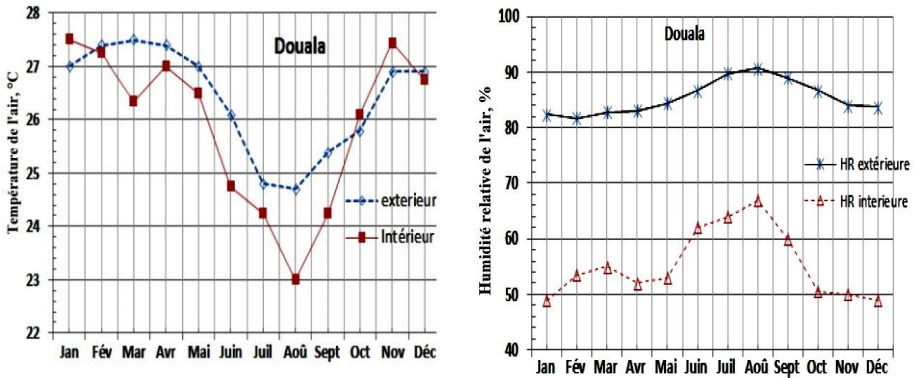


Fig. 7: Températures et humidités relatives de l'air extérieur moyennes de la ville de Douala au cours de l'année [40]

La figure 8 présente les teneurs en eau d'équilibre du bois d'iroko données par les isothermes de désorption dans les conditions des 5 villes d'étude, dans le cas d'une utilisation extérieure.

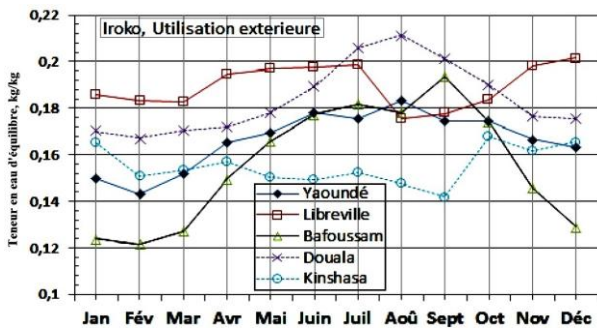


Fig. 8: Teneur en eau d'équilibre du bois d'iroko dans les villes d'étude, pour une utilisation extérieure

A partir des isothermes, une figure similaire peut être faite pour chacune des autres essences. Celle-ci est donc faite à titre indicative. Il vient qu’il est difficile de stabiliser ce bois dans la ville de Bafoussam lorsqu’il est utilisé à l’extérieur. Les autres villes offrent des valeurs d’équilibre moins fluctuantes le long de l’année que celles obtenues dans la ville de Bafoussam. Son usage n’est donc pas conseillé à l’extérieur dans la ville de Bafoussam. Pour les autres villes, les huiles protectrices doivent néanmoins être utilisées afin de diminuer d’avantage les fluctuations.

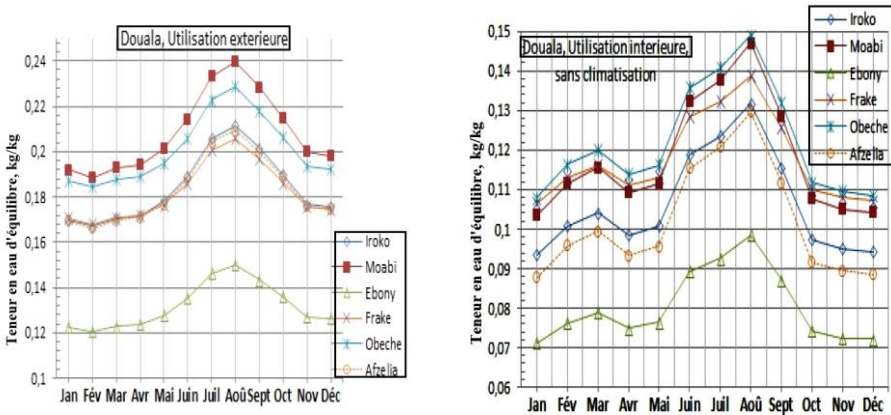


Fig. 9: Teneur en eau d’équilibre des bois d’étude dans les conditions de la ville de Douala, pour une utilisation extérieure et interne sans climatisation

La figure 9 présente les évolutions au cours de l’année des teneurs en eau d’équilibre des bois d’étude dans la ville de Douala données par les isothermes de sorption. Il vient que le bois d’ébène s’équilibre avec l’environnement extérieur entre 12% et 15% de teneur en eau, mais avec une stabilité proche de 13% en Janvier, Février, Mars, Avril, Mai, Novembre et Décembre. Quel que soit le type de bois, une absorption importante de l’eau pour s’équilibrer avec l’environnement est faite entre les mois de Mai et Octobre, aussi bien pour une utilisation externe qu’interne.

En ces périodes, si les œuvres en bois ne sont pas protégées, le phénomène de gonflement va s’opérer créant ainsi des destructions ou des frottements pour les œuvres en bois mobiles comme les fenêtres et les portes en bois. Ces défauts se font beaucoup ressentir sur la plupart des bois tropicaux à cause de leurs faibles porosités. Aussi, on constate que les teneurs en eau d’équilibre des bois sont faibles lorsque l’utilisation doit être faite en interne, par rapport à une utilisation externe. Le séchage doit donc être poussé lorsque l’œuvre en bois est destinée à une utilisation intérieure.

Puisque les œuvres en bois sont fabriquées pour être utilisées durant tous les mois et ceci pendant plusieurs années, des teneurs en eau d’usage doivent être dégagées et proposées aux artisans du bois. La logique veut qu’on utilise la moyenne des teneurs d’équilibre obtenues sur une essence de bois tout le long de l’année, en distinguant les milieux d’utilisation (extérieur ou intérieur).

Pour tenir compte des variations, une plage est recommandée, laquelle est présentée ici par l’écart type. Le **Tableau 4** présente les teneuses en eau d’usage à atteindre durant le séchage du bois d’iroko pour une utilisation extérieure faite dans les villes d’étude. Entre parenthèses sont représentées les écarts types. Il est clair que plus l’écart-type est faible, plus la valeur indiquée doit être atteinte durant l’opération de séchage, à l’exemple des villes de Libreville et de Kinshasa.

Tableau 4: Teneurs en eau d'usage du bois d'iroko en fonction des villes pour une utilisation extérieure

Iroko, utilisation extérieure					
Villes	Yaoundé	Douala	Bafoussam	Libreville	Kinshasa
\bar{X}_{eq} (kg/kg)	0.166 (0.013)	0.184 (0.016)	0.158 (0.026)	0.190 (0.009)	0.155 (0.008)

Tableau 5: Teneurs en eau d'usage des bois d'étude en fonction du milieu d'utilisation pour la ville de Douala (intérieur non conditionné)

Bois		Iroko	Moabi	Ebène	Frake	Ayous	Afzélia
\bar{X}_{eq} (kg/kg)	utilisation	0.184	0.208	0.132	0.182	0.201	0.183
Ecart type	extérieure	(0.016)	(0.018)	(0.011)	(0.013)	(0.016)	(0.015)
\bar{X}_{eq} (kg/kg)	utilisation	0.106	0.118	0.080	0.118	0.122	0.102
Ecart type	intérieure	(0.013)	(0.015)	(0.009)	(0.011)	(0.014)	(0.014)

Tableau 6: Teneurs en eau d'usage des bois d'étude Pour une utilisation interne dans les villes de Yaoundé et de douala (intérieur conditionné)

Yaoundé						
Bois	Iroko	Moabi	Ebène	Frake	Ayous	Afzélia
X_{eqmin}	0.184	0.208	0.132	0.182	0.201	0.183
X_{eqmax}	(0.016)	(0.018)	(0.011)	(0.013)	(0.016)	(0.015)
Douala						
X_{eqmin}	0.106	0.118	0.080	0.118	0.122	0.102
X_{eqmax}	(0.013)	(0.015)	(0.009)	(0.011)	(0.014)	(0.014)

Le **Tableau 5** présente les teneurs en eau d'usage de nos bois pour des utilisations interne et extérieure dans la ville de Douala, l'intérieur étant non conditionné. Nous constatons que d'un bois à l'autre et d'une utilisation à l'autre, les teneurs en eau d'usage indiquées sont distinctes. Les teneurs d'usage recommandées pour une utilisation extérieure sont inférieures du double de celles recommandées au même bois pour une utilisation interne, la différence se situant entre 3 et 5% d'humidité.

Le **Tableau 6** présente les teneurs d'usage recommandées dans les villes de Douala et de Yaoundé pour une utilisation interne avec l'air conditionné dans les critères du confort thermique. Il est clair qu'une moyenne se situant entre 11 et 13% de teneur en eau est recommandée dans ce cas pour les bois de Fraké, Ayous, Afzélia, Iroko et Moabi. Celle du bois d'ebene est proche de 9%.

4. CONCLUSION

Cette étude appliquée aux bois tropicaux nous permet de conclure que:

- * Les modèles de GAB, de Luikov modifié et de Nelson sont les trois meilleurs modèles de notre liste à utiliser pour estimer les isothermes de sorption des bois tropicaux dans des plages de température et d'humidité relative données;
- * Il est possible d'avoir des résultats intéressants avec les modèles de Henderson modifié, de Oswin modifié et de Chung et Pfof modifié;
- * Les teneurs en eau au point de saturation de la monocouche varient linéairement en fonction de la température de l'air avec des valeurs rangées de 0.02 à 0.08kg/kg, les températures de l'air de séchage se situant entre 15 et 60°C;

- * Les valeurs des énergies d'activation obtenues sont rangées de 8420 à 13911 J/mol pour la désorption et de 3266 à 6499 J/mol pour l'adsorption;
- * Les humidités au point de saturation des fibres sont rangées de 0.16 à 0.33kg/kg;
- * Les valeurs moyennes des énergies libres de Gibbs par gramme d'eau adsorbée sont rangées de 149 à 206 cal/g;
- * La température influence la chaleur isostérique de sorption;
- * A des faibles teneurs en eau, la chaleur isostérique de sorption est élevée et diminue jusqu'à 1765 kJ/kg à 40°C lorsque la teneur en eau décroît;
- * Les teneurs en eau d'usage des bois sont fonction du type de bois et des caractéristiques de l'air où l'œuvre fait en bois sera utilisé. Lorsque le confort thermique est assuré aussi bien dans la ville de Yaoundé que de Douala, une teneur en eau de 12 à 13 % des bois d'étude est recommandée, sauf celle du bois d'ébène qui est de 9 %;
- * Pour une utilisation interne avec air non conditionné, les teneurs recommandées sont inférieures de celles suggérées lorsque l'enceinte est conditionnée, les différences se situant entre 0.5 et 2%.

Remerciements- L'auteur principal remercie l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux (OIBT) pour le financement qu'il a bénéficié (Réf : 012/15A).

REFERENCES

- [1] R.A. Chayjan and M. Esna-Ashari, 'Modeling of heat and entropy sorption of maize (cv. Sc704): neural network method', Research in Agricultural Engineering, Vol. 56, N°2, pp. 69 - 76, 2010.
- [2] E. Akoy, D. Von Hörsten and M. Ismail, 'Moisture adsorption characteristics of solar-dried mango slices', International Food Research Journal, Vol. 20, N°2, pp. 883 - 890, 2013.
- [3] S. Furmaniak, A.P. Terzyk, R. Gołembiewski, P.A. Gauden and L. Czepirski, 'Searching the most optimal model of water sorption on foodstuffs in the whole range of relative humidity', Food Research International, Vol. 42, pp. 1203 - 1214, 2009.
- [4] F. Kaymak-Ertekin and A. Gedik, 'Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes', Lebensm-wiss. U-Technology, Vol. 37, pp. 429 - 438, 2004.
- [5] S.S.H. Rizvi, 'Thermodynamic properties of food in dehydration', In: M.A. Rao & S.S.H. Rizvi (Eds.), Engineering Properties of Foods. Marcel Decker, New York, 1986.
- [6] C. Van Den Berg and S. Bruin, 'Water activity and its estimation in food systems: Theoretical aspects', In: L.B. Rockland, G.E. Stewart (Eds.), Water activity; influence on food quality. New York: Academic Press. pp. 45 - 58, 1981.
- [7] H. Bjork and A. Rasmuson, 'Moisture equilibrium of wood and bark chips in superheated steam', Fuel, Vol. 74, N°12, pp.1887 - 1890, 1995.
- [8] C.J. Lomauero, A.S. Bakshi and T.P. Labuza, 'Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: Fruit, vegetable and meat products', Lebensm-wiss. U-Technology, Vol. 18, pp. 111 - 122, 1985.
- [9] C.T. Kiranoudis, Z.B. Maroulis, E. Tsami and D. Marinou-Kouris, 'Equilibrium Moisture Content and Heat of Desorption of Some Vegetables', Journal of Food Engineering, Vol. 20, pp. 55 - 74, 1993.
- [10] C. Van den Berg, 'Development of B.E.T. like models for sorption of water on foods; theory and relevance', In Properties of Water in Foods, (eds) D. Simatos & J.L. Multon, Martinus Nijhoff, Dordrecht, p. 119, 1985.

- [11] W. Wolf, W.E.L. Spiess, G. Jung, H. Weisser, H. Bizot and R.B. Duckworth, 'The water vapor sorption isotherms of microcrystalline cellulose (MCC) and purified potato starch: results of a collaborative study', *Journal of Food Engineering*, Vol. 3, pp. 51 - 72, 1984.
- [12] W.T. Simpson and A. TenWolde, 'Physical properties and moisture relations of wood', Chapter 3, from *Forest Products Laboratory, Wood handbook*, 463 p., 1999.
- [13] N. Bekkioui, 'Séchage solaire du bois: modélisation simplifiée du séchage solaire d'une pile de bois dans un séchoir solaire à parois vitrées', Thèse de Doctorat, Université Mohammed V, Agdal, N°2474, 2009.
- [14] N. Bekkioui, A. Zoulalian, A. Hakam, F. Bentayeb and A. Sesbou, 'Modelling of a solar wood dryer with glazed walls', *Maderas, Ciencia y Tecnologia*, Vol. 11, N°3, pp. 191 - 205, 2009.
- [15] N. Bekkioui, A. Hakam, A. Zoulalian, A. Sesbou and M.E. Kortbi, 'Solar Drying of Pin Lumber: Verification of a Mathematical Model', *Maderas, Ciencia y Tecnologia*, Vol. 13, N°1, pp. 29 - 40, 2011.
- [16] L.G. Esteban, A.G. Casaus, P. De-Palacios, and F.G. Fernandez, 'Saturated salt method determination of hysteresis of *Pinus sylvestris* L. wood for 35 degrees C isotherms', *Materiales de Construccion*, Vol. 54, N°276, pp. 51 - 64, 2004.
- [17] F.G. Fernández, L.G. Esteban, P. de-Palacios, Cristina-Simon, A. Garcia-Iruela and J. De La Fuente, 'Sorption and thermodynamic properties of *Terminalia superba* Engl. & Diels and *Triplochiton scleroxylon* K. Schum. Through the 15, 35 and 50°C sorption isotherms', *European Journal of Wood and Wood Products*, Vol. 72, N°1, pp. 99 - 106, 2014.
- [18] Y. Jannot, A. Kanmogne, A. Talla and L. Monkam, 'Experimental determination and modelling of water desorption isotherms of tropical woods: afzelia, ebony, iroko, moabi and obeche', *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 64, pp. 121 - 124, 2006.
- [19] S. Raji, Y. Jannot, P. Lagièrre and J.R. Puiggali, 'Thermophysical characterization of a laminated solid-wood pine wall', *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 3189 - 3195, 2009.
- [20] M. Simo-Tagne, A. Zoulalian, D. Njomo and B. Bonoma, 'Modelisation of desorption isotherms and estimation of the thermophysic and thermodynamic properties of tropical woods in Cameroon: the case of Ayous and Ebony woods', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 14, N°3, pp. 487 - 500, 2011.
- [21] B. Bonoma and M. Simo-Tagne, 'A contribution to the study of the drying of ayous (*Triplochiton scleroxylon*) and of ebony (*Diospyros ebenum*)', *Physical & Chemical News*, Vol. 26, pp. 52 - 56, 2005.
- [22] F.G. Fernández, Cristina-Simon, L.G. Esteban, P. de-Palacios, J.I. Fernández-Golvin and M. Conde, 'Estudio comparativo del método de cámara y de sales saturadas en la obtención de los puntos de humedad de equilibrio higroscópico de la limba (*Terminalia superba* Engl. & Diels.)', 6^{ème} Congrés 0 forestal Espanol, pp. 2 - 10, 10-14 Juno 2013.
- [23] R.D.P. Andrade, R.M. Lemus and C.C.E. Pérez, 'Models of sorption isotherms for food: uses and limitations', *Vital*, Vol. 18, N°3, pp. 325 - 334, 2011.
- [24] Y. Jannot, 'Isothermes de sorption: modèles et détermination', 16 p., 2008.
- [25] N.A. Aviara, O.O. Ajibola and S.A. Oni, 'Sorption Equilibrium and Thermodynamic Characteristics of Soya Bean', *Biosystems Engineering*, Vol. 87, N°2, pp. 179 - 190, 2004.
- [26] G.R. Thorpe, 'Physical basis of aeration', In: S. Navarro & R. Noyes, (Eds). *The Mechanics and Physical of Modern Grain Aeration Management*. CRC Press, Boca Raton, pp. 135 - 144, 2001.
- [27] X. Li, 'The hygroscopic properties and sorption isosteric heats of different Chinese wheat types', *Journal of Food Research*, Vol. 1, N°2, pp. 82 - 98, 2012.

- [28] M. Simo-Tagne, 'Numerical Study of Heat and Mass Transfer during the Thermal Drying of Tropical Woods', International Journal of Thermal & Environmental Engineering, Vol. 8, N°2, pp. 9 - 15, 2014.
- [29] R.A. Chayjan and M. Esna-Ashari, 'Modeling isosteric heat of soya bean for desorption energy estimation using neural network approach', Chilean Journal of Agricultural Research, Vol. 70, N°4, pp. 616 - 625, 2010.
- [30] C.C. Chen, 'Modification of Oswin EMC/ERH equation', Journal of Agricultural Research of China, Vol. 39, N°4, pp. 367 - 376, 1990.
- [31] X.-J. Li, Z.-D. Wu, Z.-J. Zhang, H. Lu, J.-Y. Lin and Y. Cao, 'The sorption isosteric heats of rice grains in China', 10th International Working Conference on Stored Product Protection, pp. 257 - 263, 2010.
- [32] F. Liu, G. Guangping Han, W. Wanli Cheng and Q. Wu, 'Sorption isotherm of southern yellow pine—high density polyethylene composites', Materials, Vol. 8, pp. 368 - 378, 2015.
- [33] N.D. Menkov, A.G. Durakova and A. Krasteva, 'Moisture sorption isotherms of walnut flour at several temperatures', Biotechnology & Biotechnological Equipment, Vol. 18, N°3, pp. 201 - 206, 2004.
- [34] Q. Wu, 'Application of Nelson's sorption isotherm to wood composites and overlays', Wood and Fiber Sciences, Vol. 31, N°2, pp. 187 - 191, 1999.
- [35] J.C. Olivry, 'Regime hydrologiques en pays bamiléks (Cameroun)', Cahier Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer, ORSTOM, Séries Hydrologie, Vol. 13, N°1, pp. 37 - 71, 1976.
- [36] J.P. Eouzan et L. Ferrara, 'Habitat et rythme d'activité de *Glossina caliginea* dans une zone littorale du Sud-Cameroun, Comparaison avec *Glossina palpalis*', Cahier Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer, ORSTOM, Séries Entomologie Médicale et Parasitologie, Vol. 16, N°3, pp. 243 - 250, 1978.
- [37] N.S. Onemba, 'Impact de l'utilisation de l'énergie-bois dans la ville province de Kinshasa en République Démocratique du Congo (RDC)', Mémoire de Maîtrise, 182 p., 2011.
- [38] R. Bissaya, R.T. Ghogomu, A. Moundi, B. Njom et N.S. Kanou, 'Utilisation des données géologiques et gestion des informations multi-sources pour l'analyse de l'aléa climatique de terrain/éboulement dans le secteur Nord-Ouest de la région de Yaoundé', Afrique Science, Vol. 10, N°3, pp. 113 - 133, 2014.
- [39] J. Collinet et D. Martin, 'Notice explicative N°50, Carte pédologique de Lambarené (Gabon), Libreville à 1/200000', Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer, ORSTOM, Paris, 109 p., 1975.
- [40] M.K. Nematchoua, R. Tchinda, P. Ricciardi and N. Djongyang, 'A field study on thermal comfort in naturally-ventilated buildings located in the equatorial climatic region of Cameroon', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 39, pp. 381 - 393, 2014.
- [41] A. Kemajou, A. Tseuyep et N.E. Egbewatt, 'Le confort thermique en climat humide vers un réaménagement des normes ergonomiques', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 15, N°3, pp. 427 - 428, 2012.