

Modélisation du séchage convectif et symétrique des bois d'ayous, d'eucalyptus grandis et d'ébène : simulation numérique et validation expérimentale

Merlin SIMO TAGNE*, Bonoma BEGUIDE¹ et Donatien NJOMO²

¹Laboratoire de Physique Appliquée, École Normale Supérieure, Université de Yaoundé I, BP 47, Yaoundé, Cameroun

²Laboratoire d'Analyse des Technologies de l'Énergie et de l'Environnement, Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, Cameroun

* Correspondance, courriel : simotagne2002@yahoo.fr

Résumé

Dans cet article, nous développons un modèle de séchage du bois en nous inspirant de la littérature. Des hypothèses sont ensuite retenues afin de simuler le comportement des bois d'ayous (*Triplochiton scleroxylon*), d'*Eucalyptus grandis* et d'ébène (*Diospyros crassiflora hiern*). Les coefficients thermophysiques des bois sont tirés de la littérature. Les résultats de la simulation numérique montrent que le modèle peut être utilisé pour améliorer le fonctionnement des séchoirs convectifs. On constate néanmoins un léger écart entre les points expérimentaux et les résultats de la simulation numérique. Cet écart serait la conséquence des hypothèses simplificatrices adoptées, de la prise en compte dans le programme de certains coefficients thermophysiques obtenus sur des bois autres que ceux d'étude et des erreurs enregistrées durant l'expérience ayant permis d'obtenir les cinétiques expérimentales. L'utilisation des points expérimentaux obtenus par D. Guoxing et al. (2003a, 2003b) nous permet de constater que le modèle peut aussi être utilisé pour simuler le séchage des bois tempérés de forte épaisseur (25 mm). Le bois d'ayous sèche plus vite que le bois d'ébène. En suivant la table de séchage du bois d'ayous, la durée de l'opération de séchage est réduite d'environ 20h de celle nécessaire pour mener le séchage avec une température de l'air de 40°C. On n'observe pas de modification de la durée de séchage du bois d'ébène, l'épaisseur des planches étant de 12mm et la teneur en eau initiale évaluée à 35 %. La simulation du séchage sur le bois d'eucalyptus montre que la surface sèche plus vite que l'intérieur et si le séchage n'est pas suivi, la surface est exposée au jeu retrait-gonflement qui aboutit aux fentes superficielles.

Mots-clés : séchage convectif, modélisation, simulation numérique, bois, ayous, ébène, eucalyptus grandis.

Abstract

Modelling of convective and symmetric drying of ayous, eucalyptus grandis and ebony woods : numerical simulation and experimental validation

In this article, we develop a drying model by using information from literature. Some hypotheses are then made in order to simulate the behaviour of the Ayous wood (*Triplochiton scleroxylon*), *Eucalyptus grandis* wood and the Ebony wood (*Diospyros crassiflora hiern*). The thermo-physical coefficients of wood are taken from literature. The results of the numerical simulation show that the model can be used to improve the

functioning of convection dryers. However, there is a slight disparity between experimental values and the results of the numerical simulation. This disparity is the consequence of the use of simplification hypotheses, thermophysical coefficients other than those of the woods studied and errors committed during the experiment. We used experimental points obtained by *D. Guoxing et al.* (2003a, 2003b) to valid our model about the drying of high thickness of eucalyptus grandis wood (25 mm), one temperate wood who grown in region of west Cameroon. The Ayous wood dries faster than the Ebony wood. From the drying data table of the Ayous wood, the drying time is reduced by about 20 hours compared to that of the drying at 40°C of air temperature. No modification on the drying time is observed with the Ebony wood with samples having a thickness of 12 mm and a moisture content of 35 %. Numerical simulation of eucalyptus grandis wood shows that a model is appropriate to explain the drying of temperate wood with the high thickness and with various drying table. When the drying becoming, surface of wood dries very quickly and interior of wood drying very slowly, it is capital to control the behaviour of all wood during the dry with a good dry table.

Keywords : *convective drying, modelling, numerical simulation, wood, ayous, ebony, eucalyptus grandis.*

Nomenclature

C : Fraction massique (-)

C_p : Chaleur massique (J/(kg.K))

$\overline{D_H}, \overline{D_T}$: Tenseurs coefficients de diffusion de l'eau liée respectivement dus à un gradient d'humidité ou à un gradient de température (m²/s)

E : Chaleur de désorption (J/kg)

e : Épaisseur du bois (m)

\vec{g} : Vecteur accélération de la pesanteur (m/s²)

H : Humidité du bois (%)

$\overline{h_c}, \overline{h_m}$: Tenseurs coefficients de transfert global respectivement de la chaleur (W/(m².K)) et de la masse (m/s)

\vec{J}, \vec{w} : Vecteurs flux (kg/(m².s))

K : Débit massique par unité de volume (kg/(m³.s))

$\overline{k}, \overline{k_r}$: Tenseurs perméabilités respectivement du milieu (m²) et relative (-)

L : Chaleur latente de vaporisation (J/kg)

n : paramètre (-)

\vec{n} : Vecteur normal à la surface du bois (-)

P : Pression totale (Pa)

Q : Énergie volumique (J/m³)

Q_s : Puissance volumique (W/m³)

S : Fraction volumique d'eau liée (-)

T : Température (°C)

t : Durée de séchage (s)

\vec{V} : Vecteur vitesse (m/s)

X : Teneur en eau (kg/kg)

Symboles grecs

- α ; Coefficient de thermomigration (K^{-1})
 ε : Porosité volumique du bois (-)
 μ : Viscosité dynamique ($kg/(m.s)$)
 λ : Conductivité thermique ($W/(m.K)$)
 ρ : Masse volumique (kg/m^3)
 σ : Durée caractéristique (s)

Indices

- air : Air
 as : Changement de phase (eau liée-eau libre)
 b : Eau liée
 c : Capillaire
 eq : Équilibre
 g,l,s : Respectivement phases gazeuse, liquide et solide(ou anhydre)
 o : Initial

1. Introduction

Le séchage est une technique utilisée pour réduire la quantité d'eau présente dans les produits biologiques afin d'assurer leur conservation dans le temps. Cette opération est très utilisée en Afrique subsaharienne, car cet espace géographique est doté d'un gigantesque patrimoine forestier et est arrosé par un flux solaire important. La présente étude s'intéresse au séchage du bois, car l'exportation de ce dernier est à l'origine de l'entrée des devises dans l'économie des pays concernés [1]. Au Cameroun par exemple, le bois est le deuxième produit d'exportation après le pétrole qui fournit plus d'argent dans les caisses de l'État [2,3].

L'amélioration des techniques de séchage dépend en partie de l'étude du rapport que l'essence à sécher entretient avec le séchoir. Cette étude est en général numérique à cause, non seulement du caractère multidimensionnel des phénomènes de transfert, mais aussi du couplage entre les transferts de masse et de chaleur. Ceux-ci rendent très difficile la résolution analytique des équations obtenues. La compréhension des mécanismes physiques qui contrôlent le séchage du bois contribue à la recherche des conditions optimales d'utilisation de l'énergie et la qualité des bois après l'opération est améliorée. La durée de séchage peut ainsi être réduite et les conditions d'uniformité de l'humidité dans le bois durant et après le séchage sont déduites.

Dans cet article, nous modélisons le séchage convectif des bois d'ayous, d'ébène et d'eucalyptus grandis. Les échantillons des bois d'ayous et d'ébène qui ont servi à l'expérience afin de valider les résultats de la modélisation sont issus de la région du Centre, Cameroun. Les échantillons de bois d'eucalyptus grandis utilisés pour déterminer la masse volumique sont issus de la plantation du lycée bilingue de Penka Michel, Région de l'Ouest Cameroun. Les points expérimentaux de la cinétique de séchage de l'eucalyptus sont issus des travaux de *D. Guoxing et al.* (2003a, 2003b)

2. Méthodologie

2-1. Modélisation

La modélisation du séchage du bois peut se faire suivant trois échelles [4] :

- L'échelle des processus physiques qui influencent le séchage ;
- L'échelle du produit lorsque celui-ci est soumis à un procédé de séchage bien déterminé ;
- L'échelle du séchoir destinée à la pratique du séchage au niveau industriel.

Dans la modélisation qui suit, les deux premières échelles sont appliquées. Soit un milieu poreux de volume unité, **Figure 1**.

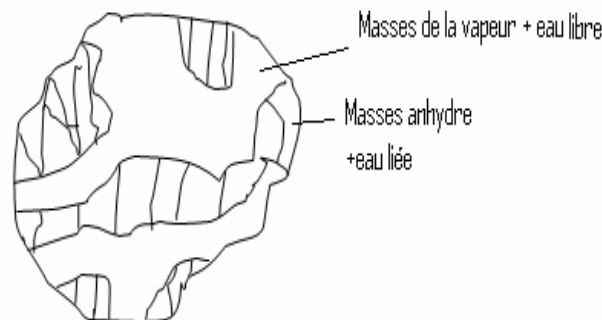


Figure 1 : Représentation d'un milieu poreux (bois)

Il est constitué d'une masse anhydre, d'une masse d'eau liée, d'une masse de vapeur d'eau et d'une masse d'eau libre. La masse du milieu poreux peut alors être estimée en appliquant l'équation (1) ci-dessous.

$$\rho_s H = (\varepsilon S \rho_l + X_b \rho_s + \varepsilon (1 - S) \rho_g C_g) \quad (1)$$

Dans la suite, nous allons établir les équations de transfert de la masse d'eau et de la chaleur.

2-1. Équation de transfert de la masse

Elle est donnée par l'équation générale [5,6] :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{W} + K = 0 \quad (2)$$

Il suffit alors d'appliquer cette relation aux différentes phases présentes dans le bois [5,7].

2-1-1. Pour la phase d'eau libre

On néglige la contribution du mouvement de cette phase dans l'expression du flux. Ainsi on a :

$$\frac{\partial (\varepsilon S \rho_l)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_l = -K_l \quad (3)$$

2-1-2. Pour la phase d'eau liée

Le terme cinétique dans la contribution du flux est nul car, l'eau liée est fixe lors du séchage. On obtient :

$$\frac{\partial(X_b \rho_s)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_{as} = -K_{as} \quad (4)$$

2-1-3. Pour la phase de vapeur d'eau

La vapeur d'eau reçoit les contributions de l'eau liée et de l'eau libre lors des changements d'état. Ainsi on a :

$$\frac{\partial(\varepsilon(1-s)\rho_g C_g)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{V}_g + \vec{J}_g) = K_{as} + K_l \quad (5)$$

2-1-4. Expression de l'équation de transfert de l'eau

La somme des équations (3), (4) et (5) donne, en tenant compte de l'équation (1):

$$\frac{\partial(\rho_s H)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{V}_g + \vec{J}_l + \vec{J}_{as} + \vec{J}_g) = 0 \quad (6)$$

D'après la littérature [5,8], on a :

$$\rho_g \vec{V}_g = \frac{C}{1-C} \vec{J}_g \quad (7)$$

$$\vec{J}_l = -\rho_l \bar{k} \left(\frac{\bar{k}_r}{\mu} \right)_l (\vec{\nabla} P - \vec{\nabla} P_c - \rho_l \vec{g}) \quad (8)$$

$$\vec{J}_g = -\rho_g \bar{D}_g \vec{\nabla} C \quad (9)$$

$$\vec{J}_{as} = -\rho_s \bar{D}_H \vec{\nabla} H - \rho_s \bar{D}_T \vec{\nabla} T \quad (10)$$

Sachant que les équations (11) et (12) ci-dessous sont vérifiées et tenant compte des relations ci-dessus, on aboutit à l'équation de transfert de la masse, équation (13).

$$\vec{\nabla} C = \frac{\partial C}{\partial T} \vec{\nabla} T + \frac{\partial C}{\partial H} \vec{\nabla} H \quad (11)$$

$$\vec{\nabla} P_c = \frac{\partial P_c}{\partial T} \vec{\nabla} T + \frac{\partial P_c}{\partial H} \vec{\nabla} H \quad (12)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \vec{\nabla} \cdot (\bar{D}_{HH} \vec{\nabla} H + \bar{D}_{HT} \vec{\nabla} T) = 0 \quad (13)$$

avec :

$$\overline{D}_{HH} = \overline{D}_H - \frac{\rho_l \overline{k}}{\rho_s} \left(\frac{\overline{k}_r}{\mu} \right)_l \frac{\partial P_c}{\partial H} + \frac{\rho_g \overline{D}_g}{\rho_s (1-C)} \frac{\partial C}{\partial H} \quad (14)$$

$$\overline{D}_{HT} = \overline{D}_T - \frac{\rho_l \overline{k}}{\rho_s} \left(\frac{\overline{k}_r}{\mu} \right)_l \frac{\partial P_c}{\partial T} + \frac{\rho_g \overline{D}_g}{\rho_s (1-C)} \frac{\partial C}{\partial T} \quad (15)$$

A l'interface air-bois, le transfert d'humidité se fait à travers la couche limite massique dont la résistance au processus de transfert est représentée par le tenseur coefficient de transfert global \overline{h}_m . Nous utiliserons la condition aux limites de Newman ci-dessous :

$$-\overline{D}_{HH} \vec{\nabla} H = \overline{h}_m (H - H_{eq}) \vec{n} \quad (16)$$

Le séchage dont l'expérience nous a fourni les résultats est symétrique par rapport au plan médian de la planche. Le flux est donc nul à ce niveau.

2-2. Équation de transfert de la chaleur

La variation temporelle de la quantité de chaleur volumique dans le bois est donnée par l'équation (17)[6] :

$$\frac{dQ}{dt} + Q_s = 0 \text{ avec } Q = \rho C_p T \quad (17)$$

La chaleur étant une grandeur additive, nous avons posé :

$$\frac{dQ}{dt} = \left. \frac{d(\rho C_p T)}{dt} \right|_s + \left. \frac{d(\rho C_p T)}{dt} \right|_g + \left. \frac{d(\rho C_p T)}{dt} \right|_l \quad (18)$$

avec :

$$\left. \frac{d(\rho C_p T)}{dt} \right|_s = (\rho C_p)_s \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \vec{J}_T \quad (19)$$

$$\left. \frac{d(\rho C_p T)}{dt} \right|_g = (\rho C_p)_g \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V}_g \vec{\nabla} T \right) \quad (20)$$

$$\left. \frac{d(\rho C_p T)}{dt} \right|_l = (\rho C_p)_l \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V}_l \vec{\nabla} T \right) \quad (21)$$

D'après la loi de Fick, on a :

$$\vec{J}_T = -\overline{\lambda} \vec{\nabla} T \quad (22)$$

Lors du processus de séchage, on note un changement d'état de l'eau. L'eau liée se transforme en eau libre et l'eau libre en vapeur d'eau. Ces transformations se font par absorption de la chaleur [9]. Ainsi on a :

$$Q_s = K_l L + K_{as} (L + E) \tag{23}$$

Supposant que la capacité calorifique du bois est la somme des capacités calorifiques de ses constituants, on a :

$$(\rho C_p)_l + (\rho C_p)_g + (\rho C_p)_s = \rho_s C_p \tag{24}$$

Supposant que la vapeur d'eau se conserve durant le processus, on a [8] :

$$\vec{\nabla} \vec{J}_g = K_{as} + K_l \tag{25}$$

En négligeant le transfert de chaleur par convection dans le bois et dans l'hypothèse que le taux de variation de la teneur en eau liée est proche de celle de toute la teneur en eau dans le bois, on a la relation de transfert de la chaleur suivante :

$$\rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \vec{\nabla}(\overline{\overline{D_{TT}}} \vec{\nabla} T + \overline{\overline{D_{TH}}} \vec{\nabla} H) = \vec{\nabla}(\overline{\overline{\lambda}} \vec{\nabla} T) \tag{26}$$

avec :

$$\overline{\overline{D_{TT}}} = \frac{(E + L) \rho_g \overline{\overline{D_g}}}{1 - C} \frac{\partial C}{\partial T} - E \rho_l \overline{\overline{k}} \left(\frac{k_r}{\mu} \right)_l \frac{\partial P_c}{\partial T} \tag{27}$$

$$\overline{\overline{D_{TH}}} = \frac{(E + L) \rho_g \overline{\overline{D_g}}}{1 - C} \frac{\partial C}{\partial H} - E \rho_l \overline{\overline{k}} \left(\frac{k_r}{\mu} \right)_l \frac{\partial P_c}{\partial H} \tag{28}$$

A l'interface air-bois, le transfert de la chaleur s'effectue à travers la couche limite thermique dont le frein de transfert est représenté par le tenseur coefficient de transfert de la chaleur $\overline{\overline{h_c}}$. Il faut noter que l'énergie incidente doit être capable d'évaporer l'eau à la surface du bois. On obtient ainsi l'équation (29) suivante :

$$\overline{\overline{\lambda}} \vec{\nabla} T = \overline{\overline{h_c}} (T_{air} - T) \vec{n} + \rho_l \overline{\overline{L D_{HH}}} \vec{\nabla} H \tag{29}$$

Le séchage étant symétrique, le flux de chaleur est nul au plan médian de chaque planche.

2-3. Simulation numérique du séchage

Les coefficients intervenant dans le modèle établit sont difficiles à déterminer expérimentalement [7,10]. Nous sommes alors passés à quelques simplifications qui sont :

- La diffusion globale de l'humidité est égale à celle de l'eau liée et de la vapeur d'eau. Ainsi, le gradient de pression capillaire doit être faible. Cette dernière condition est vérifiée lorsque séchage a lié à température douce [11].
- La diffusion partielle de l'humidité due au gradient de température est proportionnelle à la diffusion de l'eau liée, le coefficient de proportionnalité étant le coefficient de thermo migration.
- La diffusion de l'humidité due à un gradient de température est faible dans le cas de l'eau liée comparée à celle globale de l'eau.

- La diffusion globale de l'humidité due à un gradient d'humidité est importante comparée à celle de l'eau liée.

Ces hypothèses conduisent aux équations (30a), (30b), (30c) et (30d) ci-dessous :

$$D_{HH} = D_H \quad (30a)$$

$$D_{HT} = \alpha D_{HH} \quad (30b)$$

$$D_{TH} = \rho_s (E + L) D_H \quad (30c)$$

$$D_{TT} = \alpha D_{TH} \quad (30d)$$

avec pour les bois d'ayous et d'ébène [12]:

$$D_H = \frac{e^2 \pi}{16\sigma} \left(\frac{X_o - X}{X_o - X_{eq}} \right)^{2-\frac{1}{n}} \left(\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (31)$$

Pour le bois d'eucalyptus, nous avons utilisé la relation suivante :

$$D_H = \exp \left(-10,9 + 9,8 X_{eq} - \frac{4300}{T_{air}} \right) \quad (32)$$

Pour le bois d'eucalyptus, nous avons utilisé les relations ci-dessous où P_v est issue des isothermes de désorption et h_c de la formule de Nusselt. Notons que ces mêmes coefficients sont déterminés en inverse dans le cas des bois d'ayous et d'ébène.

$$h_m = \frac{7,732 * 10^{-4}}{P_{atm} - P_v} h_c \quad (33)$$

$$P_{atm} = 10^5 \text{ pa}, Vg = 1,5 \text{ m/s} \quad (34)$$

Les coefficients de l'équation (34) sont déterminés expérimentalement en fonction des essences d'étude et de la température et sont présentés dans la littérature [12,13]. Seuls C_p et λ sont les valeurs moyennes obtenues sur plusieurs types de bois [14]. Les valeurs de α et h_m seront estimées lors de la simulation numérique de manière à ce que les courbes simulées numériquement se rapprochent de celles expérimentales. Les équations (13), (16), (26) et (29) sont résolues numériquement selon l'épaisseur des planches, le processus étant supposé être monodimensionnel. La méthode des différences finies sous sa forme implicite et un processus récursif ont été adoptés. Les pas spatial et temporel utilisés sont respectivement de $7,5 \times 10^{-4} \text{ m}$ et 400s. Le programme de simulation a été traduit en Fortran 77. Les courbes sont obtenues à partir d'Excel.

3. Résultats et discussion

Les coefficients thermophysiques et les cinétiques expérimentales des bois d'ayous et d'ébène sont publiés dans la littérature par M. Simo Tagne et al. [12,13], B. Bonoma et al. [15] et B. Bonoma et M. Simo Tagne

[16]. Ceux du bois d'eucalyptus sont publiés par *D. Guoxing et al.* [17,18]. Ces coefficients et les équations discrétisées ne sont pas présentés ici par souci de rendre moins lourd le présent article.

Tableau 1 : Table de séchage adaptée de l'ayous [19]

Humidité du bois H (%)	Températures		Humidité relative de l'air HR (%)	Équilibre hygroscopique du bois EH (%)	Gradient de séchage G
	Sèche (°C)	Humide (°C)			
Vert	70	66,5	85	13,9	
35	70	66	83	13,3	2,63
32	70	65	80	12,5	2,56
30	70	62,5	70	10,3	2,91
28	75	66	65	9	3,11
25	75	64	60	8,3	3,01
20	75	59	47	6,53	3,06
15	80	58	35	4,7	3,19

Tableau 2 : Table de séchage adaptée de l'ébène [19]

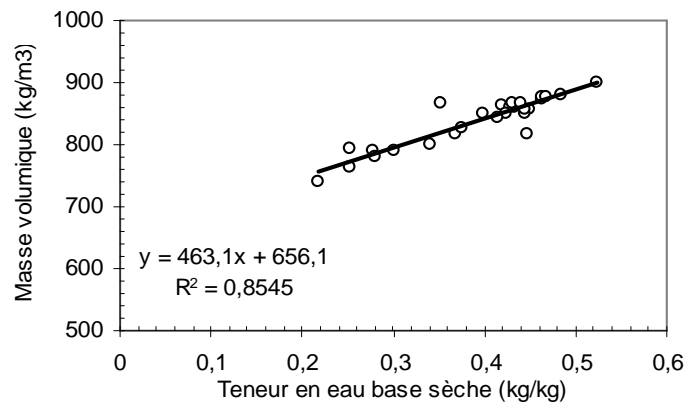
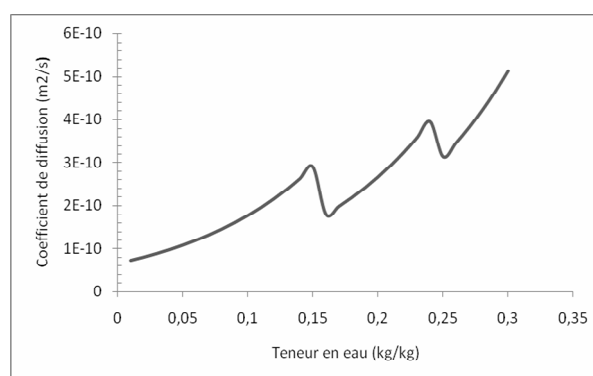
Humidité du bois H (%)	Températures		Humidité relative de l'air HR (%)	Équilibre hygroscopique du bois EH (%)	Gradient de séchage G
	Sèche (°C)	Humide (°C)			
Vert	30	27,5	82	11,6	
35	30	27	80	11,3	3,1
30	40	36,5	80	10,4	2,88
28	45	41	77	9,2	3,04
25	50	44	70	7,5	3,33
22	55	48	67	6,6	3,33
20	60	50	57	5,7	3,51
18	60	47,5	50	5,1	3,53
15	65	49	42	5	3

Les tables de séchage des bois d'ayous et d'ébène ci-dessus (**Tableaux 1 et 2**) sont issues des travaux de Aléon et al (1990) où nous avons adapté les équilibres hygroscopiques et les gradients de séchage au regard des isothermes de sorption obtenues dans la thèse de doctorat de Simo Tagne Merlin [19]. La table de séchage de l'eucalyptus (**Tableau 3**) est issue des travaux de D.Guoxing et al. [17,18]. C'est le suivi de cette table qui a permis aux auteurs d'obtenir les points expérimentaux exposés dans ce travail sur le bois d'eucalyptus grandis.

Les **Figures 2 et 3** donnent respectivement les évolutions de la masse volumique expérimentale et du coefficient de diffusion du bois d'eucalyptus grandis. Nous avons pris la droite moyenne de la masse volumique que nous avons injecté pour simuler le bois d'eucalyptus. Les augmentations subites observées sur la **Figure 3** sont dues aux augmentations de température imposées par la table de séchage de l'eucalyptus.

Tableau 3 : Table de séchage de l'eucalyptus grandis [17,18]

Humidité du bois H (%)	Températures		Équilibre hygroscopique du bois EH (%)	Durée (h)
	sèche (°C)	humide (°C)		
Préchauffage	44	44	28,5	4
35-50	44	39	12,5	
30-25	49	41	9	
25-20	55	43	7	
Mi-chauffage	55	50	13	4
20-15	60	40	4,5	
<15	71	43	3	
Uniformisation	71	58	7	17
Équilibrage	71	67	12	4

**Figure 2 : Masse volumique du bois d'eucalyptus grandis en fonction de sa teneur en eau****Figure 3 : Coefficient de diffusion massique du bois d'eucalyptus grandis en fonction de sa teneur en eau**

Les **Figures 4 à 9** présentent les cinétiques de séchage respectivement des bois d'ébène et d'ayous aux températures de séchage de 40°C, 50°C et 60°C. Les écarts moyens entre les résultats expérimentaux et numériques sont de $\pm 1,15\%$, $\pm 1,39\%$ et $\pm 1,13\%$ respectivement à 40°C, 50°C et 60°C pour le bois

d'ébène, et $\pm 1,7\%$, $\pm 1,44\%$ et $\pm 1,61\%$ respectivement à 40°C , 50°C et 60°C dans le cas du bois d'ayous. Ce qui permet de valider notre modèle. La température du bois augmente en général durant les deux premières heures de séchage pour varier ensuite au voisinage de la température de l'air de séchage. Observation satisfaisante car l'effet solet est annulé dès le début du séchage facilitant ainsi le processus de désorption [20].

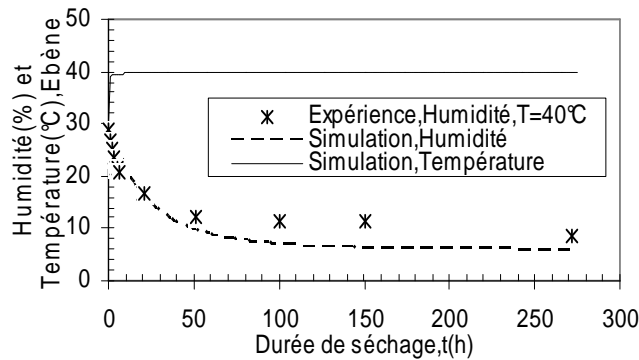


Figure 4 : Cinétique de séchage de l'ébène. $T=40^\circ\text{C}$; $X_o=0,2869\text{kg/kg}$; $h_m=5,6 \times 10^8 \text{ m/s}$; $h_c=11,2\text{W}/(\text{m}^2\text{s})$ $e=15 \text{ mm}$; $\alpha = 0,055\text{K}^{-1}$

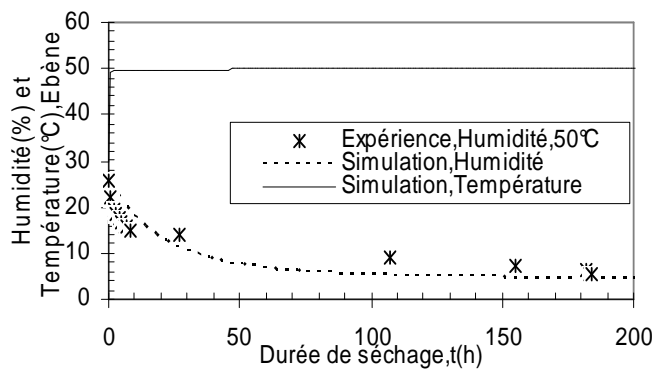


Figure 5 : Cinétique de séchage de l'ébène. $T=50^\circ\text{C}$; $X_o=0,2568\text{kg/kg}$; $h_m=6 \times 10^8 \text{ m/s}$; $h_c=11,2\text{W}/(\text{m}^2\text{s})$; $e=14\text{mm}$; $\alpha = 0,05 \text{ K}^{-1}$

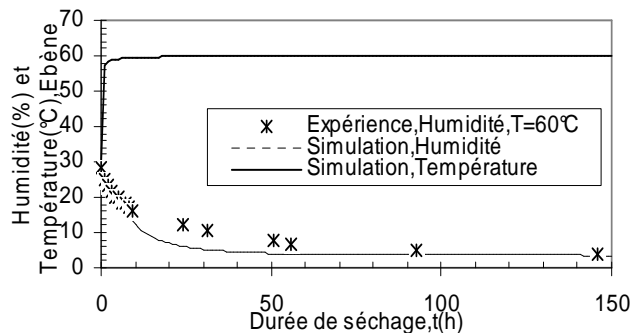


Figure 6 : Cinétique de séchage de l'ébène. $T=60^\circ\text{C}$; $X_o=0,2845\text{kg/kg}$; $h_m=2,5 \times 10^7 \text{ m/s}$; $h_c=11,2\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, $e=18\text{mm}$, $\alpha = 0,045\text{K}^{-1}$

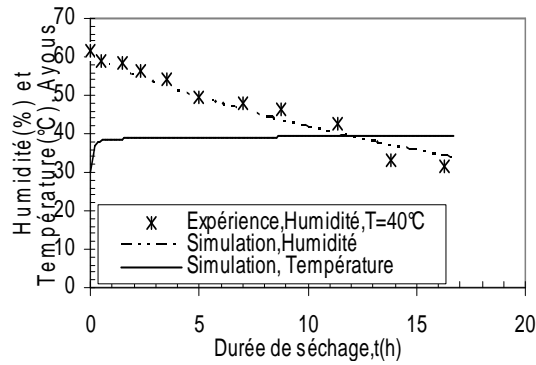


Figure 7 : Cinétique de séchage de l'ayous. $T=40^{\circ}\text{C}$; $X_o=0,6144\text{kg/kg}$; $h_m=2,6\times 10^7\text{m/s}$; $h_c=11,2\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, $e=40\text{mm}$; $\alpha =0,055\text{K}^{-1}$

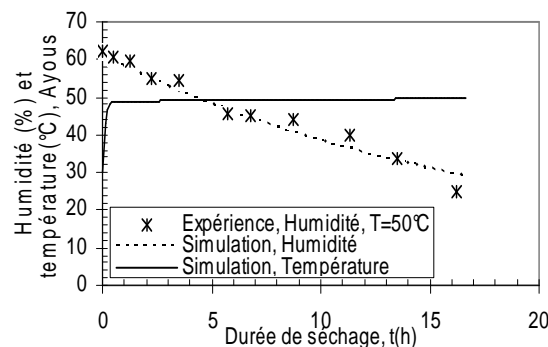


Figure 8 : Cinétique de séchage de l'ayous. $T=50^{\circ}\text{C}$; $X_o=0,6236\text{kg/kg}$; $h_m=2,7\times 10^7\text{m/s}$; $h_c=11,2\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$; $e=40\text{mm}$; $\alpha =0,05\text{K}^{-1}$

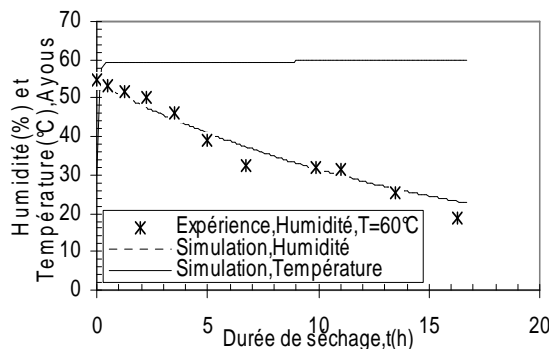


Figure 9 : Cinétique de séchage de l'ayous. $T=60^{\circ}\text{C}$; $X_o=0,5456\text{kg/kg}$; $h_m=2,75\times 10^7\text{m/s}$; $h_c=11,2\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, $e=40\text{mm}$; $\alpha =0,045\text{K}^{-1}$

Les **Figures 10** et **11** présentent les évolutions respectivement de la teneur en eau et de la température en fonction du temps, obtenus sur le bois d'eucalyptus grandis, le suivi étant celui de la table de séchage (**Tableau 3**). Nous constatons que notre modélisation donne des résultats très satisfaisants. Ce qui nous permet de valider cette modélisation et cette simulation sur les bois tempérés, les bois tropicaux, aussi bien sur les planches de faible épaisseur que de forte épaisseur.

La **Figure 12** présente les vitesses de séchage comparées des bois d'étude pris dans les mêmes conditions hygrothermiques de l'air de séchage, les planches ayant la même épaisseur et la même teneur en eau initiale. On constate que le bois d'ayous sèche plus vite que celui de l'ébène car, la vitesse de séchage du bois d'ayous s'annule en premier. Lorsque le gradient de température est supérieure au gradient d'humidité ($\alpha > 1K^{-1}$), l'atteinte du domaine hygroscopique des couches superficielles avant que la chaleur n'atteigne le centre du bois est favorisée et ceci entraîne le phénomène de gauchissement, déformation néfaste à la stabilité spatiale du bois. C'est avec satisfaction que nous constatons que notre modèle manifeste ce comportement négatif par une instabilité (résultat non physique) qui est accentuée en surface que dans l'ensemble du bois (**Figures 13 et 14**). Dans l'industrie, les tables de séchage sont suivies pour réduire la durée de séchage tout en préservant la qualité des bois séchés. Les tables proposées par le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA) [21] sont adoptées. Nous avons utilisé la table recommandée au séchage du bois de l'azobé pour simuler le séchage du bois d'ébène, les deux espèces étant des bois lourds. Sur ces tables, les caractéristiques de l'air sont conservées seuls les équilibres hygroscopiques et les gradients de séchage sont modifiés, ayant obtenu des isothermes de désorption des bois [16] différentes de celles proposées dans la littérature [21,22].

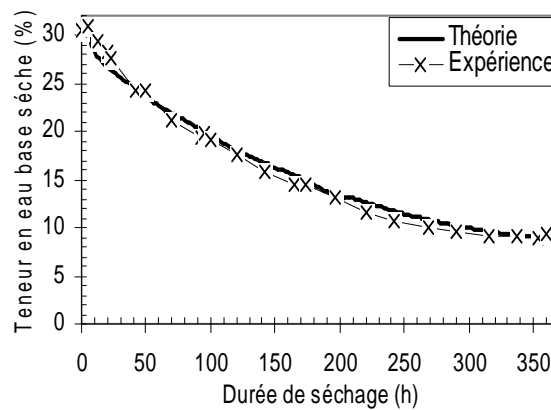


Figure 10 : Cinétique de séchage du bois d'eucalyptus grandis : $H=f(t)$. Suivi de la table de séchage $e=25mm$

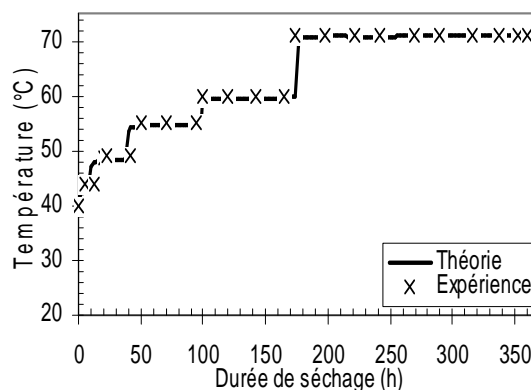


Figure 11 : Cinétique de séchage du bois d'eucalyptus grandis : $T=f(t)$. Suivi de la table de séchage $e=25mm$

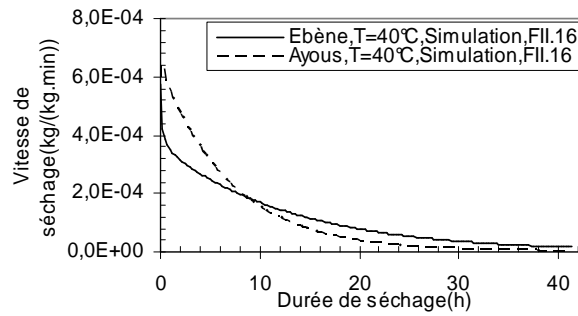


Figure 12 : Vitesses de séchage comparées des bois de l'ayous et de l'ébène en fonction de la durée de séchage des bois. $e=12\text{mm}$, $X_0=0,35\text{kg/kg}$; $T=40^\circ\text{C}$

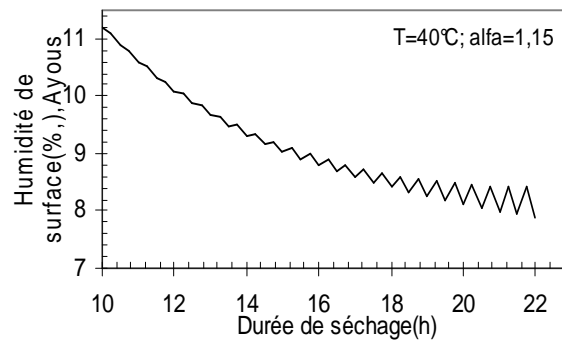


Figure 13 : Cinétique de séchage du bois d'ayous pour un gradient de température supérieur à celui d'humidité $e=12\text{mm}$, $X_0=0,35\text{kg/kg}$; $T=40^\circ\text{C}$

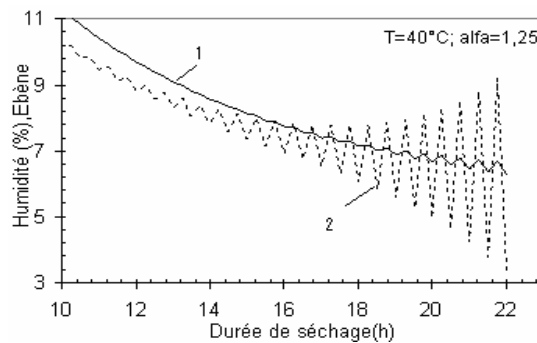


Figure 14 : Cinétique de séchage de l'ébène pour un gradient de température supérieur à celui d'humidité $e=12\text{mm}$, $X_0=0,35\text{kg/kg}$; $T=40^\circ\text{C}$; (1) moyen; (2) surface

Les **Figures 15** et **16** montrent qu'il faut environ 54h au bois d'ébène pour passer de 35% d'humidité à l'équilibre, l'épaisseur de la planche étant égale à 12mm. Pour les mêmes dimensions que le bois d'ébène, il faut 19h de séchage pour le bois d'ayous, d'où un gain de 20h. Les **Figures 17** et **18** présentent les évolutions de la température des bois durant le séchage respectant les tables. Nous obtenons une évolution conforme à celles présentées dans la littérature [16,23]. Les **Figures 19** et **20** présentent les évolutions de la teneur en eau du bois d'eucalyptus respectivement en fonction de l'épaisseur et de la durée de séchage. Nous constatons que lorsque le séchage évolue, la surface sèche de plus en plus vite que les autres parties et à un certain moment, cette surface regagne de l'eau, surtout au moment du conditionnement. La **Figure 20** montre qu'à la fin de l'équilibre, toute l'épaisseur du bois tend à avoir une même humidité.

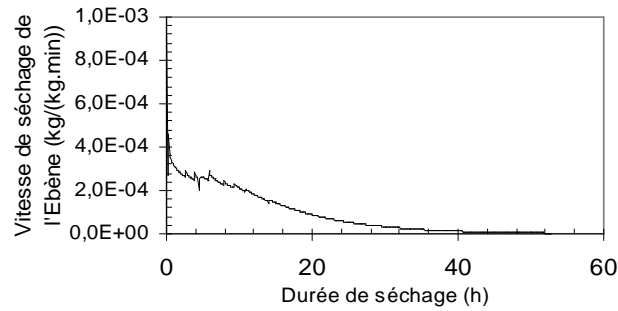


Figure 15 : Vitesse de séchage de l'ébène, $X_o=0,35\text{kg/kg}$; Table de séchage du bois de l'azobé ; $e=12\text{mm}$

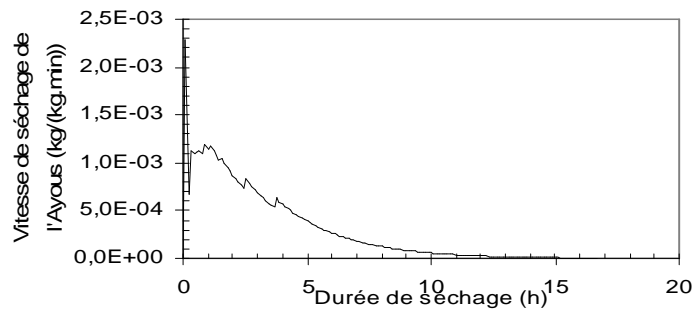


Figure 16 : Vitesse de séchage du bois d'ayous, $X_o=0,35\text{kg/kg}$; Table de séchage du bois d'ayous ; $e=12\text{mm}$

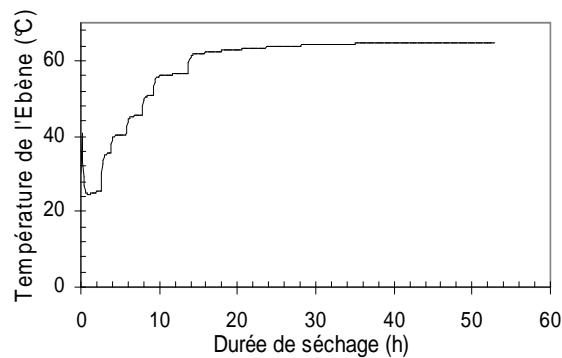


Figure 17 : Évolution de la température du bois d'ébène. $X_o=0,35\text{kg/kg}$; Suivi de la table de séchage du bois d'ébène $e=12\text{mm}$

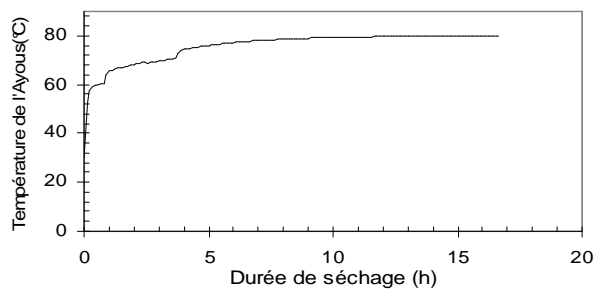


Figure 18 : Évolution de la température du bois d'ayous. $X_o=0,35\text{kg/kg}$; Suivi de la table de séchage du bois d'ayous $e=12\text{mm}$

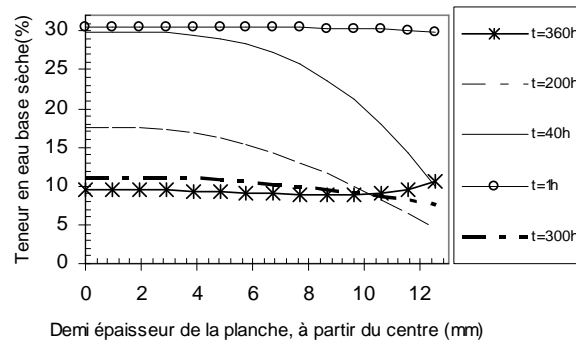


Figure 19 : *Évolution de la teneur en eau du bois d'eucalyptus grandis en fonction de son épaisseur $E=25\text{ mm}$; Suivi de la table de séchage*

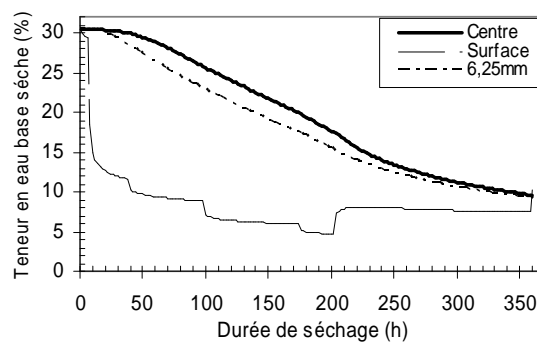


Figure 20 : *Évolution de la teneur en eau du bois d'eucalyptus grandis en fonction de la durée de séchage sur 3 positions de son épaisseur $e=25\text{ mm}$; Suivi de la table de séchage*

La **Figure 21** présente l'évolution de la température dans le bois d'eucalyptus durant l'opération de séchage, le suivi étant celui de sa table de séchage. Nous constatons que la température s'uniformise rapidement dans l'épaisseur, comportement satisfaisant afin de limiter les forts gradients susceptibles de détruire le bois. Les **Figures 22** et **23** ci-dessus présentent les évolutions des gradients de séchage respectivement de l'ébène et de l'ayous. Ceci permet de valider le suivi des différentes tables de séchage et l'effet de l'air sur chaque essence. On constate que, à chaque humidité de la table de séchage notre simulation donne des résultats satisfaisants.

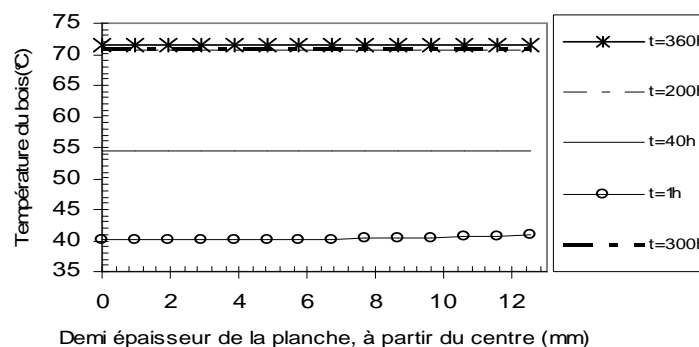


Figure 21 : *Évolution de la température du bois d'eucalyptus grandis dans son épaisseur $e=25\text{ mm}$; Suivi de la table de séchage*

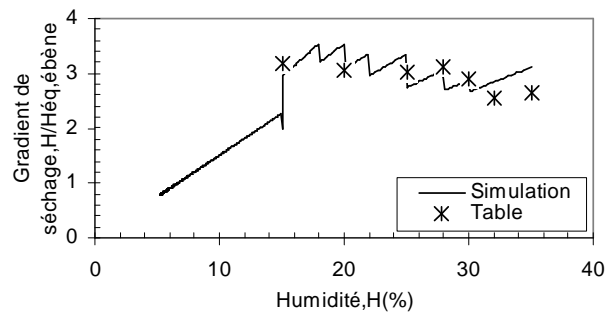


Figure 22 : *Évolution du gradient de séchage de l'ébène : Validation du suivi de la table de séchage*

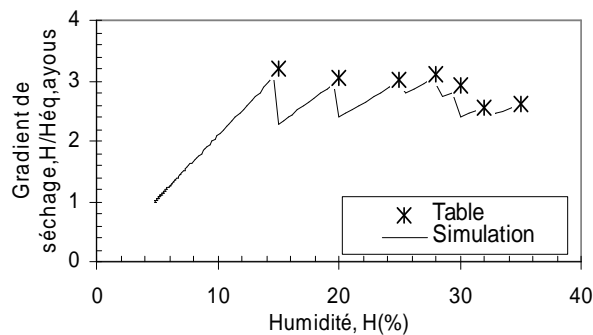


Figure 23 : *Évolution du gradient de séchage de l'ayous : Validation du suivi de la table de séchage*

4. Conclusion

Nous avons développé un modèle mathématique qui est validé en comparant les résultats de la simulation numérique à ceux de l'expérience. Les conditions de séchage sont intégrées dans le programme de la simulation numérique. Les coefficients thermophysiques insérés dans nos équations sont ceux obtenus avec nos bois et présentés dans la littérature. Il ressort que le modèle obtenu répond favorablement au séchage des échantillons de bois étudiés. On observe néanmoins un écart entre les valeurs expérimentales et celles simulées numériquement. Il importe alors d'éliminer toutes les hypothèses simplificatrices ou alors de les diminuer. En général, le séchage du bois d'ayous est rapide que celui de l'ébène et on constate un gain de temps d'environ 20h lors du séchage du bois d'ayous lorsque la température de l'air passe de 40°C aux valeurs mentionnées dans la table de séchage du CTBA. La durée de séchage du bois d'ébène n'est presque pas modifiée. La simulation du séchage du bois d'eucalyptus grandis de forte épaisseur peut aussi être conduite à partir du présent modèle.

Références

- [1] - J. C. CARRET, "L'industrialisation de la filière bois au Cameroun entre 1994 et 1998. Observations, Interprétations, Conjectures. Synthèse." CERNA, (Juin 1999).
- [2] - Rachel JUNG (revue par Marc Debels), "Cameroun : la filière bois" Mission économique de Yaoundé, (Août 2003).
- [3] - D. F. THIES, V. BELIGNÉ "Note de synthèse économique du secteur forestier au Cameroun" GTZ, (22 Mars 2007).

- [4] - J. M. HERNANDEZ "Séchage du Chêne : Caractérisation, procédés convectif et sous vide" Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I (1991).
- [5] - J. P. NADEAU, J. R. PUIGGALI "Séchage, des processus physiques aux procédés industriels" Paris, New York, Londres, Tec and Doc, (1995) 307pages.
- [6] - R. COMOLET "Mécanique expérimentale des fluides", tome 2 Masson, (1982).
- [7] - L. REMARCHE, A. BELHAMRI "Modélisation du séchage par convection" Revue des énergies renouvelables, CISM'08, Oum El Bouaghi (2008) 285-297.
- [8] - Seddik MERAKEB "Modélisation des structures en bois en environnement variable" Thèse de Doctorat, Université de Limoges, (26 Septembre 2006).
- [9] - B. BENKOUSSAS, S. LARBI, A. GAHMOSSE, J. C. LORAUD "Modélisation numérique de la pyrolyse d'une particule d'un lit végétal méditerranéen" 8^{ème} Séminaire International de la Physique Energétique, C. U BECHAR, Algérie-SIPE8, (2006) 149-154.
- [10] - G. MOUNAJED, H. BOUSSA "Synthèse des différents modèles et approches de couplage thermo-hygro-mécanique" CSTB-MOCAD
- [11] - R. D. GIBSON, M. CROSS, R. W. YOUNG "Pressure gradients generated during the drying of porous shapes" *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol22, (1979) 827-830.
- [12] - M. SIMO TAGNE, B. BONOMA, J. L. NSOUANDÉLÉ, D. NJOMO, B. NDJIDDA "Experimental and theoretical study of drying kinetic, of diffusion coefficient and density of ebony" *Phys. Chem. News* 56, (2010) 85-91.
- [13] - M. SIMO TAGNE, B. BONOMA, M. MACHEBU SIAKA "Experimental and theoretical study of drying kinetic, of diffusion coefficient and density of ayous" *Phys. Chem. News* 49, (2009) 65-73.
- [14] - W. T. SIMPSON "Physical properties and moisture relations of wood", Chapter 1 revised, from Forest Products Laboratory, Wood handbook, (1999) 463p.
- [15] - B. BONOMA, M. SIMO TAGNE, L. MONKAM "Influence of temperature and water content on the density and porosity of the tropical woods: ayous, baobab, sapelli, lotofa and padouk" *Phys. Chem. News* 51, (2010) 79-83.
- [16] - B. BONOMA, M. SIMO TAGNE, "Une contribution à l'étude du séchage de l'ayous et de l'ébène" *Phys. Chem. News* 26, (2005)52-56.
- [17] - D. GUOXING, G. LIANBAI, Z. ZHENDENG, L. ZHIQIANG "A drying strategy for 25mm thick eucalyptus lumber" Turnbull, J. W., ed., *Eucalyptus in Asia. Proceedings of an international conference held in Zhanjiang, Guangdong, People's Republic of China, ACIAR Proceedings No.111*, (7-11 April 2003).
- [18] - D. GUOXING, G. LIANBAI, Z. ZHENDENG "Study on drying strategies for eucalyptus lumber with 25mm thickness" 8th International IUFRO wood drying conference, (2003) 209-261.
- [19] - Merlin SIMO TAGNE "Contribution à l'étude du séchage des bois tropicaux au Cameroun : aspects caractérisation, modélisation multi échelle et simulation. Le cas des bois d'ayous et d'ébène" Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé I, (2011).
- [20] - Louis MONKAM "Contribution à l'étude du séchage des bois tropicaux au Cameroun : Cas du Doussié, du Moabi et de l'Iroko" Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé I, (2006).
- [21] - D. ALÉON, P. CHANRION, G. NÉGRÉ, J. PEREZ, O. SNIÉG "Séchage du bois : Guide pratique" CTBA (1990).
- [22] - J. GÉRARD, A. E. KOUASSI, C. DAIGREMONT, P. DÉTIENNE, D. FOUQUET, M. VERNAY "Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains" Série FORAFRI, Document 11, CF, CIRAD, CIFOR, 186p (1998).
- [23] - Patrick PERRÉ "How to get a relevant material model for wood drying simulation?" Cost Action E15, *Advances in drying of wood (1999-2003)*, 1st Workshop "State of the art for kiln drying" in Edingurgh (13/14th, Oct 1999).