

Modélisation et simulation numérique du séchage des bois d'Ayous et d'Ebène. Validation expérimentale

Merlin Simo Tagne^{1,2*}, Beguide Bonoma¹ et Donatien Njomo²

¹ Laboratoire de Physique Appliquée, Ecole Normale Supérieure
Université de Yaoundé I, B.P. 47, Yaoundé, Cameroun

² Laboratoire d'Analyse des Technologies de l'Energie et de l'Environnement,
Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, B.P. 47, Yaoundé, Cameroun

(Reçu le 12 Octobre 2009 - accepté le 25 Janvier 2010)

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*) et d'Ebène (*Diospyros crassiflora* Hiern). Les coefficients thermo physiques 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 thermo physiques obtenus sur des bois, autres que ceux d'étude et des erreurs enregistrées durant l'expérience ayant permis d'obtenir les cinétiques expérimentales. Le bois d'Ayous sèche plus vite que le bois d'Ebène. En suivant la table de séchage du bois d'Ayous, la durée de l'opération de séchage est réduite d'environ 20 h 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'Ebène, l'épaisseur des planches étant de 12 mm et la teneur en eau initiale évaluée à 35 %.

Abstract - 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*) 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, thermo-physical coefficients other than those of the woods studied and errors committed during the experiment. 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%.

Mots clés: Séchage convectif - Modélisation - Simulation numérique - Bois - Ayous - Ebène.

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

* simotagne2002@yahoo.fr

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'Etat [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 tropicaux. Les échantillons des bois d'Ayous et d'Ebène qui ont servi à l'expérience afin de valider les résultats de la modélisation sont issus de la région du Centre, Cameroun.

2. MODELISATION

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, Fig. 1.

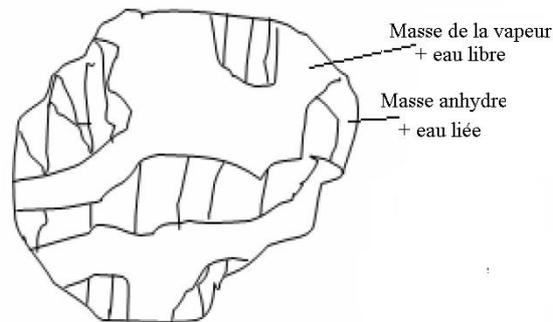


Fig. 1: Représentation d'un milieu poreux (bois)

Il est constitué de sa masse anhydre, de la masse d'eau liée, de la masse de vapeur d'eau et de la 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 Equation de transfert de 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

Avec:

$$\overline{\overline{D}}_{HH} = \overline{\overline{D}}_H - \frac{\rho_l \overline{\overline{k}}}{\rho_s} \left(\frac{\overline{\overline{k}}_r}{\mu} \right)_1 \frac{\partial P_c}{\partial H} + \frac{\rho_g \overline{\overline{D}}_g}{\rho_s (1-C)} \frac{\partial C}{\partial H} \quad (14)$$

$$\overline{\overline{D}}_{HT} = \overline{\overline{D}}_T - \frac{\rho_l \overline{\overline{k}}}{\rho_s} \left(\frac{\overline{\overline{k}}_r}{\mu} \right)_1 \frac{\partial P_c}{\partial T} + \frac{\rho_g \overline{\overline{D}}_g}{\rho_s (1-C)} \frac{\partial C}{\partial T} \quad (15)$$

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 du coefficient de transfert global $\overline{\overline{h}}_m$. Nous utiliserons la condition aux limites de Newman ci-dessous:

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

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 Equation de transfert de la chaleur

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

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

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:

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

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

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

D'après la loi de Fick, on a:

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

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:

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

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

$$(\rho C_p)_l + (\rho C_p)_g + (\rho C_p)_s = \rho_s C_p \quad (24)$$

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

$$\vec{\nabla} J_g = K_{as} + K_l \quad (25)$$

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:

$$\rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \vec{\nabla} \left(\overline{\overline{D}}_{TT} \vec{\nabla} T + \overline{\overline{D}}_{TH} \vec{\nabla} H \right) = \vec{\nabla} \left(\overline{\overline{\lambda}} \vec{\nabla} T \right) \quad (26)$$

Avec:

$$\overline{\overline{D}}_{TT} = \frac{(E + L) \rho_g \overline{\overline{D}}_g}{1 - C} \frac{\partial C}{\partial T} - E \rho_l \overline{\overline{k}} \left(\frac{\overline{\overline{k}}_r}{\mu} \right)_l \frac{\partial P_c}{\partial T} \quad (27)$$

$$\overline{\overline{D}}_{TH} = \frac{(E + L) \rho_g \overline{\overline{D}}_g}{1 - C} \frac{\partial C}{\partial H} - E \rho_l \overline{\overline{k}} \left(\frac{\overline{\overline{k}}_r}{\mu} \right)_l \frac{\partial P_c}{\partial H} \quad (28)$$

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:

$$\bar{\lambda} \vec{\nabla} T = \bar{h}_c \cdot (T_{\text{air}} - T) \vec{n} + \rho_l L \bar{D}_{\text{HH}} \vec{\nabla} H \quad (29)$$

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

3. SIMULATION NUMERIQUE DU SECHAGE

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

- 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 lieu 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 (30), (31), (32) et (33) ci-dessous:

$$D_{\text{HH}} = D_{\text{H}} \quad (30)$$

$$D_{\text{HT}} = \alpha D_{\text{HH}} \quad (31)$$

$$D_{\text{TH}} = \rho_s (E + L) D_{\text{H}} \quad (32)$$

$$D_{\text{TT}} = \alpha D_{\text{TH}} \quad (33)$$

Avec [12]:

$$D_{\text{H}} = \frac{e^2 \pi}{16\sigma} \left(\frac{X_o - X}{X_o - X_{\text{eq}}} \right)^{2-1/n} \left(\frac{X - X_{\text{eq}}}{X_o - X_{\text{eq}}} \right)^{1/n} \quad (34)$$

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].

Seules 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 $7,5 \times 10^{-4}$ m et 400 s. Le programme de simulation a été traduit en Fortran 77. Les courbes sont obtenues à partir de Excel.

4. RESULTATS DE LA SIMULATION ET DISCUSSION

Les coefficients thermophysiques et les cinétiques expérimentales des bois d'étude sont publiés dans la littérature par M. Simo Tagne *et al.* [12, 13, 15] et B. Bonoma et M. Simo Tagne [16]. Ces coefficients et les équations discrétisées ne sont pas présentés ici à cause d'un souci de clarté.

Les figures 2 à 4 et 5 à 7 présentent les cinétiques de séchage respectivement des bois d'Ebène et d'Ayous pour des températures de séchage de 40 °C, 50 °C et 60 °C.

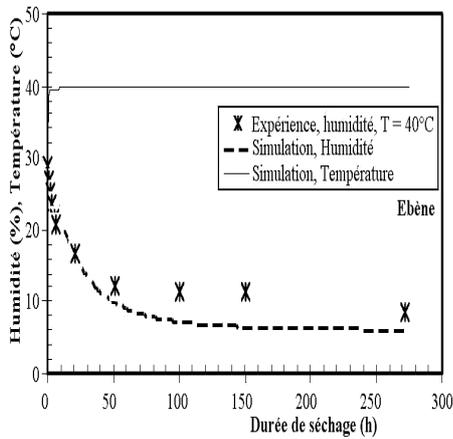


Fig. 2: Cinétique de séchage de l'Ebène
 $T = 40\text{ °C}$; $X_o = 0,2869\text{ kg/kg}$;
 $e = 15\text{ mm}$; $h_m = 5,6 \times 10^{-8}\text{ m/s}$;
 $h_c = 11,2\text{ W/(m}^2\text{s)}$; $\alpha = 0,055\text{ K}^{-1}$

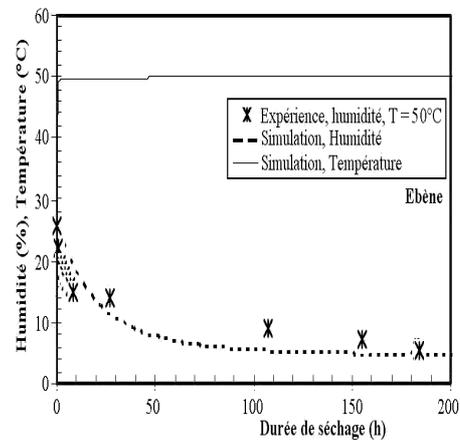


Fig. 3: Cinétique de séchage de l'Ebène
 $T = 50\text{ °C}$; $X_o = 0,2568\text{ kg/kg}$;
 $e = 14\text{ mm}$; $h_m = 6 \times 10^{-8}\text{ m/s}$;
 $h_c = 11,2\text{ W/(m}^2\text{s)}$; $\alpha = 0,05\text{ K}^{-1}$

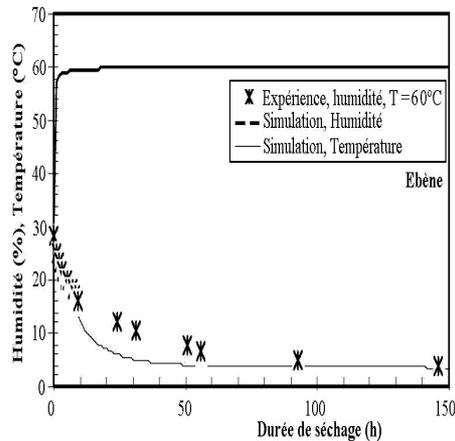


Fig. 4: Cinétique de séchage de l'Ebène
 $T = 60\text{ °C}$; $X_o = 0,2845\text{ kg/kg}$;
 $e = 18\text{ mm}$, $h_m = 2,5 \times 10^{-7}\text{ m/s}$;
 $h_c = 11,2\text{ W/(m}^2\text{s)}$, $\alpha = 0,045\text{ K}^{-1}$

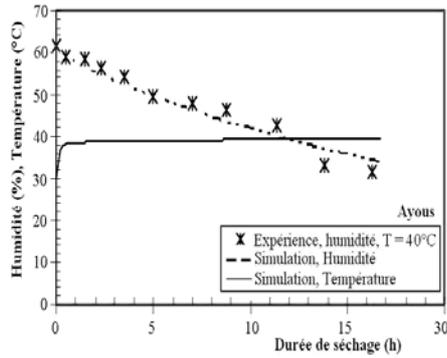


Fig. 5: Cinétique de séchage de l'Ayous
 $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $X_o = 0,6144\text{ kg/kg}$;
 $e = 40\text{ mm}$, $h_m = 2,6 \times 10^{-7}\text{ m/s}$;
 $h_c = 11,2\text{ W/(m}^2\text{K)}$, $\alpha = 0,055\text{ K}^{-1}$

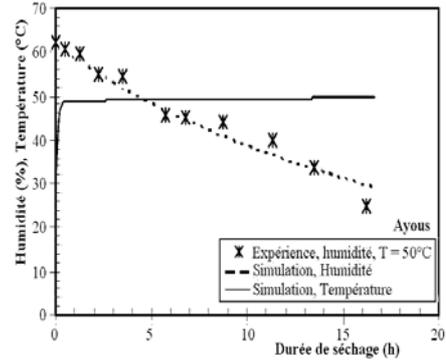


Fig. 6: Cinétique de séchage de l'Ayous
 $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $X_o = 0,6236\text{ kg/kg}$;
 $e = 40\text{ mm}$, $h_m = 2,7 \times 10^{-7}\text{ m/s}$;
 $h_c = 11,2\text{ W/(m}^2\text{K)}$, $\alpha = 0,05\text{ K}^{-1}$

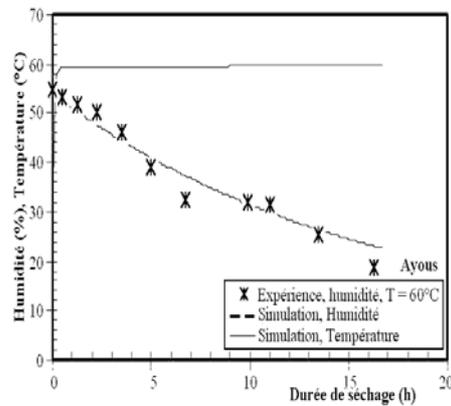


Fig. 7: Cinétique de séchage de l'Ayous
 $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $X_o = 0,5456\text{ kg/kg}$;
 $e = 40\text{ mm}$, $h_m = 2,75 \times 10^{-7}\text{ m/s}$;
 $h_c = 11,2\text{ W/(m}^2\text{K)}$, $\alpha = 0,045\text{ K}^{-1}$

Les écarts moyens entre les résultats expérimentaux et numériques sont de $\pm 1,15\%$, $\pm 1,39\%$ et $\pm 1,13\%$ respectivement à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le bois d'Ebène, et $\pm 1,7\%$, $\pm 1,44\%$ et $\pm 1,61\%$ respectivement à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 Soret est annulé dès le début du séchage facilitant ainsi le processus de désorption [17].

La figure 8 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.

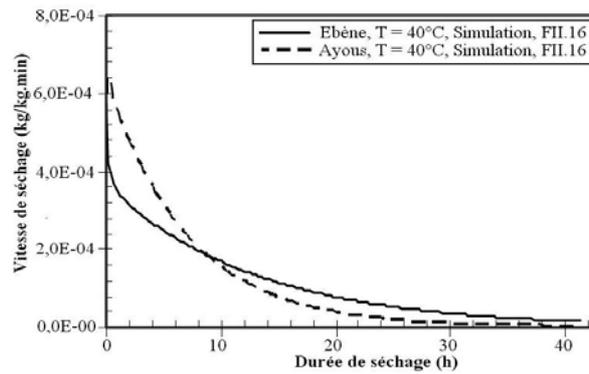


Fig. 8: Vitesses de séchage comparées des bois de l'Ayous et de l'Ebène en fonction de la durée de séchage des bois. $e = 12 \text{ mm}$, $X_0 = 0,35 \text{ kg/kg}$; $T = 40 \text{ °C}$

On constate que le bois d'Ayous sèche plus vite que celui de l'Ebène car, la vitesse de séchage du bois d'Ayous s'annule en premier.

Lorsque le gradient de température est supérieur au gradient d'humidité ($\alpha > 1\text{K}^{-1}$), 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, (Fig. 9 et 10).

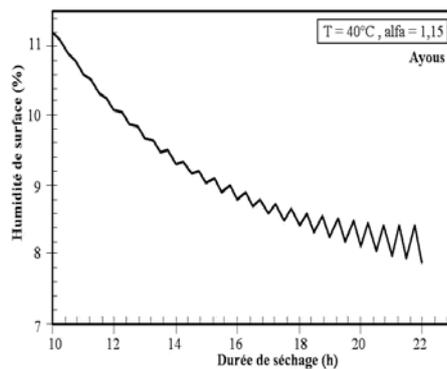


Fig. 9: Cinétique de séchage de l'Ayous pour un gradient de température supérieur à celui de l'humidité. $e = 12 \text{ mm}$, $X_0 = 0,35 \text{ kg/kg}$; $T = 40 \text{ °C}$

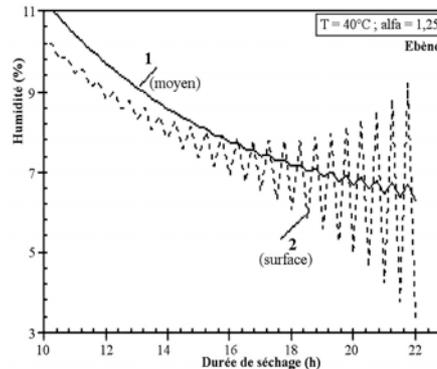


Fig. 10: Cinétique de séchage de l'Ebène pour un gradient de température supérieur à celui de l'humidité. $E = 12 \text{ mm}$, $X_0 = 0,35 \text{ kg/kg}$; $T = 40 \text{ °C}$; (1) moyen; (2) surface

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) [18] 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 [18, 19].

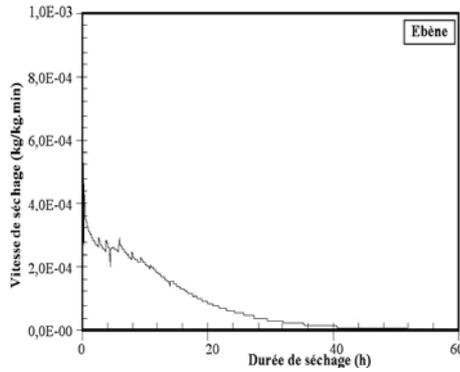


Fig. 11: Vitesse de séchage de l'Ebène, $X_0 = 0,35 \text{ kg/kg}$; $e = 12 \text{ mm}$
Table de séchage du bois de l'Azobé

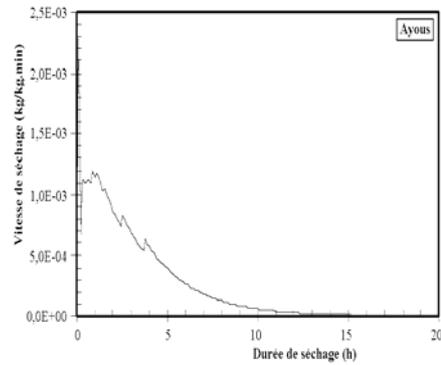


Fig. 12: Vitesse de séchage de l'Ayous, $X_0 = 0,35 \text{ kg/k}$; $e = 12 \text{ mm}$
Table de séchage du bois d'Ayous

Les figures 11 et 12 montrent qu'il faut environ 54 h au bois d'ébène pour passer de 35 % d'humidité à l'équilibre, l'épaisseur de la planche étant égale à 12 mm. Pour les mêmes dimensions que le bois d'ébène, il faut 19 h de séchage pour le bois d'ayous, d'où un gain de 20 h.

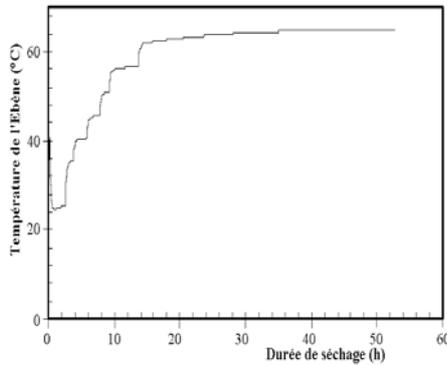


Fig. 13: Evolution de la température de l'Azobé. $X_0 = 0,35 \text{ kg/kg}$; $e = 12 \text{ mm}$.
Suivi de la table de séchage du bois de l'azobé

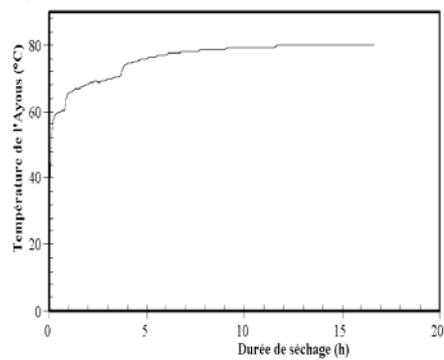


Fig. 14: Evolution de la température de l'Ayous. $X_0 = 0,35 \text{ kg/kg}$; $e = 12 \text{ mm}$
Suivi de la table de séchage du bois d'ayous

Les figures 13 et 14 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, 20].

Les figures 15 et 16 ci-dessous présentent les évolutions des gradients de séchage respectivement de l'Ebène 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.

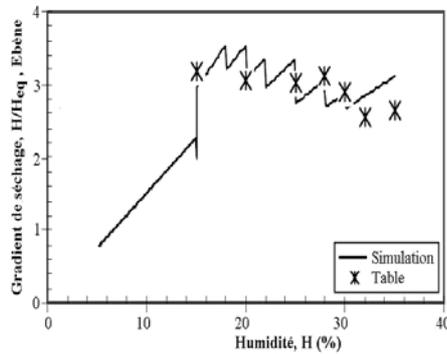


Fig. 15: Evolution du gradient de séchage de l'Ebène. Validation du suivi de la table de séchage

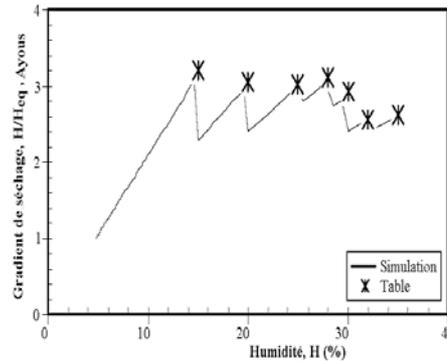


Fig. 16: Evolution du gradient de séchage de l'Ayous. Validation du suivi de la table de séchage

5. 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'Ebène et on constate un gain de temps d'environ 20 h 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'Ebène n'est presque pas modifiée.

REFERENCES

- [1] J.C. Carret, 'L'Industrialisation de la Filière Bois au Cameroun entre 1994 et 1998, Observations, Interprétations, Conjectures. Synthèse', CERNA, Juin 1999.
- [2] R. Jung (Revue par M. Debels), 'Cameroun: la Filière Bois', Mission Economique de Yaoundé, 6 p., Août 2003.

- [3] D.F. Thies and V. Beligné, 'Note de Synthèse Economique du Secteur Forestier au Cameroun', GTZ, 15 Pages, 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 et J.R. Puiggali, 'Séchage des Processus Physiques aux Procédés Industriels', Paris, New York, Londres, Tec and Doc, 307 p., 1995.
- [6] R. Comolet, 'Mécanique Expérimentale des Fluides', Ed. Masson, Tome 2, 1982.
- [7] L. Remarche et A. Belhamri, 'Modélisation du Séchage par Convection', Revue des Energies Renouvelables, CISM'08, Oum El Bouaghi, pp. 285 – 297, 2008.
- [8] S. Merakeb, 'Modélisation des Structures en bois en Environnement Variable', Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Septembre 2006.
- [9] B. Benkoussas, S. Larbi, A. Gahmousse and 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 Béchar, Algérie-SIPE'8, pp. 149 – 154, 2006.
- [10] G. Mounajed et H. Boussa, 'Synthèse des Différents Modèles et Approches de Couplage Thermo-Hygro-Mécanique', CSTB-MOCAD
- [11] R.D. Gibson, M. Cross and R.W. Young, 'Pressure Gradients Generated during the Drying of Porous Shapes', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 22, N°6, pp. 827 – 830, 1979.
- [12] M. Simo Tagne, B. Bonoma, J.L. Nsouandélé, D. Njomo and B. Ndjidda, 'Experimental and Theoretical Study of Drying Kinetic, of Diffusion Coefficient and Density of Ebony', Physical and Chemical News, (soumis).
- [13] M. Simo Tagne, B. Bonoma and M. Machebu Siaka, 'Etude Expérimentale et Théorique de la Cinétique de Séchage, du Coefficient de Diffusion et de la Masse Volumique de l'Ayous', Physical and Chemical News, Vol. 49, pp. 65 - 73, 2009.
- [14] W.T. Simpson, 'Physical Properties and Moisture Relations of Wood', Chapter 1 revised, from Forest Products Laboratory, Wood Handbook, 463 p., 1999)
- [15] M. Simo Tagne, B. Bonoma and L. Monkam, 'Influence of Temperature and Water Content on the Density and Porosity of the Tropical Woods: Ayous, Baobab, Sapelli, Lotofa and Padouk', Physical and Chemical News? (accepté).
- [16] B. Bonoma and M. Simo Tagne, 'A Contribution to the Study of the Drying of Ayous (*Triplochiton Scleroxylon*) and of Ebony (*Diospyros Ebenum*)', Physical and Chemical News, Vol. 26, pp. 52 - 56, 2005.
- [17] L. Monkam, 'Contribution à l'Etude du Séchage des Bois Tropicaux au Cameroun: Cas du Doussié, du Moabi et de l'Iroko', Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé I, 2006.
- [18] D. Aléon, P. Chanrion, G. Négré, J. Perez et O. Snieg, 'Séchage du Bois: Guide Pratique', CTBA, 1990.
- [19] J. Gérard, A.E. Kouassi, C. Daigremont, P. Détienne, D. Fouquet et M. Vernay; 'Synthèse sur les Caractéristiques Technologiques de Référence des Principaux Bois Commerciaux Africains', Série Forafri, Document 11, CF, Cirad, Cifor, 186 p. 1998.
- [20] P. 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.