Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 87 – 98
DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v12i1.122

Détermination des courbes caractéristiques de séchage de trois espèces de bois

Ahmed Khouya* et Abdeslam Draoui

Laboratoire d'Energétique, Equipe des Transferts Thermiques et Energétique
Facultés des Sciences et Techniques, B.P. 416, Tanger, Maroc

(reçu le 12 Janvier 2009 – accepté le 28 Mars 2009)

Résumé - *Le séchage est un processus incontournable de la transformation du bois en produits finis, qui se doit d'être optimisé en fonction des critères qualité, temps et coût. Ce processus a pour objectif de diminuer le plus rapidement possible l'humidité du bois tout en limitant au minimum les pertes éventuelles de qualité (gerces, tensions internes.). Ainsi la connaissance du comportement des structures en bois dans différentes conditions d'environnement est parmi les conditions essentielles pour l'exploitation de ce matériau. Pour valoriser le matériau bois, notre étude consiste à déterminer la courbe caractéristique de séchage et la capacité évaporatoire de trois espèces de bois à savoir: deux résineux tempérés (le sapin rouge et le sapin blanc) et un feuillus tempéré (bois de hêtre). Pour étudier le processus de séchage des pièces en bois, nous avons utilisé un dispositif expérimental qui est constitué d'une cellule de séchage par déshumidification. Les vitesses de séchage des trois espèces de bois étudiées ont été déterminées, grâce à la méthode de dérivation de la courbe de perte de masse en fonction du temps. Quand aux courbes caractéristiques de séchage, elles ont été déterminées avec une approximation à l'aide d'un polynôme de degré 3. Les résultats obtenus notent une faible dispersion de la majorité des courbes caractéristiques calculées autour de la courbe moyenne, et montrent que la capacité évaporatoire dépend linéairement du flux massique, ce qui indique qu'une partie essentielle de séchage est contrôlée par des limitations extragranulaires.*

Abstract – *Drying is a process essential to the transformation of wood into finished products, which must be optimized in terms of the quality criteria, time and cost. This process aims to reduce as soon as possible the moisture of wood while minimizing any loss of quality (cracked, internal tensions.). Thus the knowledge of the behavior of timber structures under different environmental conditions is among the essential conditions for the exploitation of this material. To enhance the wood material, our study consists in determining the characteristic of drying curve and the evaporatory ability of three species of wood: two temperate conifers (red spruce and white fir) and a temperate hardwood (beech). To study the drying process of wooden pieces, we used an experimental device which consists of drying by dehumidification. The drying speed of the three timber species studied were determined by the method of derivation of the curve of mass loss over time. The drying characteristic curves were determined with an approximation of a polynomial of degree 3. The results noted a low dispersion of the majority of characteristic curves calculated around the mean curve, and show that the capacity depends linearly on evaporatory mass flow, which indicates that an essential part of drying is controlled by the extragranulary limitations.*

Mots clé: Processus de séchage – Déshumidification – Bois – Courbe caractéristique de séchage – Capacité évaporatoire.

* ahmedkhouya3@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

La complexité des phénomènes intervenant au cours du processus de séchage, la difficulté de déterminer certains paramètres comme la diffusivité, et le fait qu'il est toujours nécessaire d'avoir recours à l'expérimentation pour ajuster des constantes, ont fait que certains spécialistes se sont orientés vers une démarche empirique. L'idée étant, à partir de quelques expériences simples de séchage, de déterminer une loi applicable au plus grand nombre de conditions opératoires.

C'est ainsi que Moyne [1], a proposé un mode de représentation des résultats de différentes expériences permettant, pour un produit donné, de tracer une courbe unique dite caractéristiques de séchage.

Cette courbe permet le regroupement de résultats acquis dans des conditions différentes de vitesse d'air, de température et de taux d'humidité de l'air. Les travaux relatifs à l'étude de la cinétique de séchage du bois sont rares dans la littérature [2-11].

Ainsi l'objectif de notre travail est de déterminer les courbes caractéristiques de séchage et les capacités évaporatoires de trois espèces de bois (hêtre, sapin rouge et sapin blanc). Une telle étude est indispensable pour mieux contribuer à la compréhension des tables de séchage de ces trois espèces de bois.

2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Le but des essais expérimentaux de sorption est de suivre le processus de séchage des pièces en bois soumises, à des conditions d'humidité et de température contrôlées en utilisant une cellule de séchage par déshumidification (Fig. 1).

Les conditions hygrométriques de l'ambiance sont fixées pour un régime transitoire jusqu'à obtention de l'équilibre hygroscopique de l'échantillon [4-6].

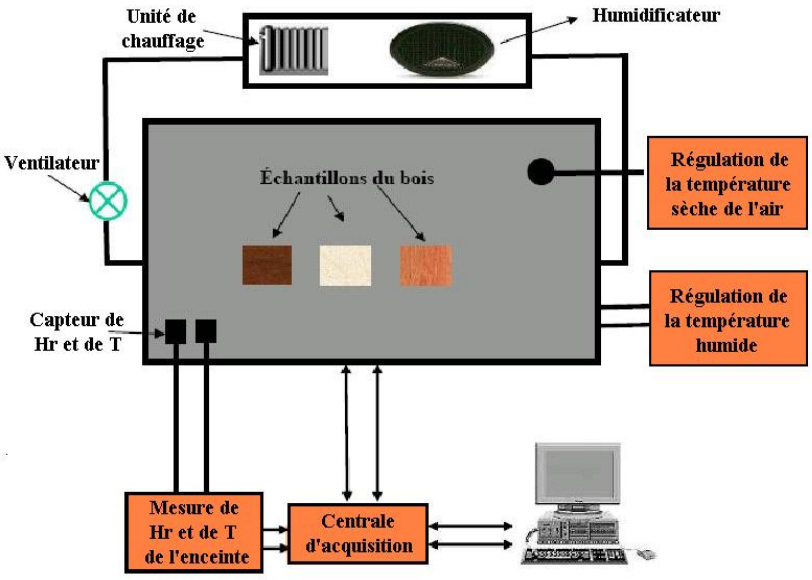

Fig. 1: Cellule expérimentale de séchage par déshumidification

3. ESPECES LIGNEUSES

Trois espèces de bois ont été utilisées: deux résineux tempérés (le sapin rouge et le sapin blanc) et un feuillus tempéré (bois de hêtre). Ces espèces présentent une grande importance commerciale dans la région du nord au Maroc. Leurs bois couvrent un grand intervalle de valeurs de masse volumique, ainsi que des plans ligneux bien diversifiés.

Le **Tableau 1** présente les données physico-mécaniques disponibles sur les bois de ces espèces [3-5, 11].

Tableau 1: Données physico mécaniques disponibles sur les trois espèces de bois étudiées

	Hêtre	**Sapin rouge**	**Sapin blanc**
Provenance	Feuillus tempéré	Résineux tempérés	Résineux tempérés
Densité	646	504	428
Retrait volumique	18 %	14 %	14 %
Retrait tangentiel total	12 %	8.5 %	9 %
Retrait radial total	5.5 %	5 %	5 %
Contrainte de rupture	55 MPa	47.5 MPa	43 MPa
Module d'élasticité	13585MPa	11305MPa	10405MPa

4. DETERMINATION DES COURBES CARACTERISTIQUES DE SECHAGE

Pour pouvoir décrire la cinétique de séchage des espèces du bois étudiées dans n'importe quelle condition de l'air, nous avons utilisé le principe de la courbe caractéristique de séchage. La détermination de la courbe caractéristique de séchage correspond à l'expression de la variation d'une vitesse de séchage réduite en fonction d'une teneur en eau réduite MR . Nous cherchons donc une expression du type [11]:

$$\frac{\left(-\frac{dM}{dt}\right)}{\left(-\frac{dM}{dt}\Big|_1\right)} = f(MR) \qquad (1)$$

avec: $-\frac{dM}{dt}$: Vitesse de séchage à l'instant t (2)

$-\frac{dM}{dt}\Big|_1$: Vitesse de la premier phase de séchage (3)

Cette vitesse est prise égale à la valeur de vitesse de séchage au point $MR = 1$.

MR est la teneur en eau réduite définie par:

$$\begin{cases} MR = \dfrac{W - W_e}{W_c - W_e} \\ W_c = W_i \end{cases} \qquad (4)$$

W_c est la teneur en eau critique.

L'influence des conditions expérimentales sur la cinétique de séchage des trois espèces de bois a été étudiée, en utilisant la cellule de séchage schématisée en figure 1.

A cette fin, deux plans expérimentaux ont été établis pour déterminer les courbes caractéristiques de séchage en fonction du sens de diffusion de l'humidité dans le bois.

Nous avons dans le cadre de ce travail étudié le séchage des échantillons témoins (direction transversale + direction longitudinale) et le séchage suivant la direction transversale.

Les T**ableaux 2** et **3** décrivent les plans expérimentaux qui ont été adoptés pour déterminer l'influence des conditions opératoires sur la performance de la déshydratation des espèces [11].

Tableau 2: Plan expérimental adopté pour déterminer l'influence des conditions opératoires sur la performance de la déshydratation des espèces témoins

				Sapin blanc			Sapin rouge			Hêtre		
Es-sai	V (m/s)	T (°C)	Hr (%)	M_i (g)	M_f (g)	W_e (%)	M_i (g)	M_f (g)	W_e (%)	M_i (g)	M_f (g)	W_e (%)
1	1±0,5	30	35	4,68	3,15	7	7	3,36	6	8,68	5	7
2	1±0,5	40	40	5,1	3,11	6	5,6	3,43	5 ,5	9	5,02	6
3	1±0,5	35	50	4,63	3,09	11	5,99	3,09	9	7,63	4,62	10
4	1±0,5	50	35	4,99	3,23	4,3	5,94	3,6	4	8	4,65	5,6
5	1±0,5	60	35	4,64	3,052	5	4,75	3,082	3	7,54	4,72	4
6	1±0,5	60	35	7,65	5,23	5	10,1	3,23	3	14,53	9,47	4
7	±0,5	30	35	4,6	3,46	7	7	3,81	6	9,12	5	7
8	2±0,5	30	35	4,55	3	7	7	3,13	6	8,03	5	7

Tableau 3: Plan expérimental adopté pour déterminer l'influence des conditions opératoires sur la performance de la déshydratation des espèces en direction transversale

				Sapin blanc			Sapin rouge			Hêtre		
Es-sai	V (m/s)	T (°C)	Hr (%)	M_i (g)	M_f (g)	W_e (%)	M_i (g)	M_f (g)	W_e (%)	M_i (g)	M_f (g)	W_e (%)
9	1±0,5	30	35	4,22	3,13	7	5,84	3,82	6	7,32	4,54	7
10	1±0,5	40	40	5	3,11	6	5,87	3,42	5 ,5	8,26	5,03	6
11	1±0,5	35	50	4,62	3,09	11	5,99	3,47	9	7,64	4,42	10
12	1±0,5	50	35	4,99	3,22	4,3	5,23	3,33	4	7,04	5,23	5,6
13	1±0,5	60	35	3,70	3,05	5	4,38	3,65	3	7,49	4,72	4
14	1±0,5	60	35	6,65	5,77	5	8,42	7	3	14,52	10,97	4
15	±0,5	30	35	4,16	3,53	7	5,95	3,99	6	7,67	4,87	7
16	2±0,5	30	35	4,3	3,04	7	5,84	3,45	6	7,95	4,15	7

La courbe de vitesse de séchage réduite $f(MR)$ est déterminée à partir de nos expériences sous forme polynomiale de degré 3. Notre démarche est donc de déterminer la courbe caractéristique en fonction de la direction de diffusion en se basant sur les 16 essais expérimentaux décrits dans les **Tableaux 2** et **3**.

Pour chaque essai, les coefficients d'une fonction polynomiale de degré 3 ajustés aux points expérimentaux sont déterminés et nous moyennons ensuite les valeurs des coefficients pour l'ensemble des essais selon la relation suivante:

$$C_I = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} C_{ij} \quad ; \quad 1 \le I \le 3 \qquad (5)$$

avec: N : le nombre d'essais réalisés; j : le numéro de l'essai; C_I : les coefficients des fonctions $f(MR)$.

5. RESULTATS ET DISCUSSION

5.1 Vitesse de séchage

Les courbes de vitesse de séchages obtenues pour les trois espèces du bois étudiées sont présentées sur les figures 2 à 7. Nous notons l'absence des phases de mise en température du produit (phase 0), et de séchage à allure constante (phase 1) et la présence unique de la phase 2. Cette phase appelée 'phase de séchage' à vitesse décroissante, au cours de laquelle la chute du flux d'évaporation de l'eau est due au passage de la surface dans le domaine hygroscopique et est compensée partiellement par une montée de la température du bois.

Dans cette phase, ce sont les différentes résistances internes du matériau aux transferts de chaleur et de matière qui contrôlent la vitesse de séchage. Ces résistances seront d'autant plus grandes que le front de séchage se situe loin de la surface externe du matériau [10, 12].

L'analyse des résultats obtenus sur les essais 2, 3, 10 et 11 (Fig. 2-7) montre l'effet de l'humidité relative de l'air à l'intérieur de l'enceinte de séchage sur la cinétique de séchage des espèces. Nous constatons une diminution des vitesses de séchage, lorsque l'air est humidifié. Cette augmentation de l'humidité relative de l'air est compensée par l'augmentation de l'humidité saturante à la température humide à l'interface air-bois [11].

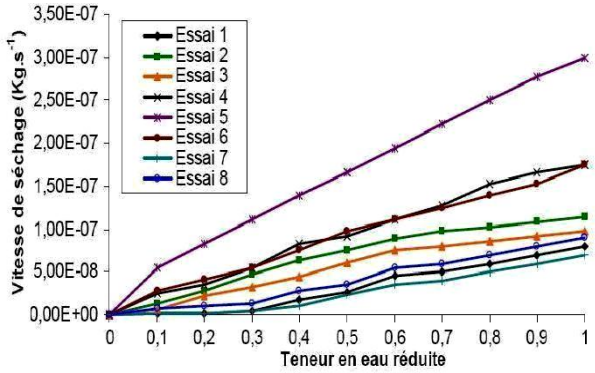

Fig. 2: Courbes de vitesse de séchage pour le bois de sapin blanc
Calcul sur le témoin (direction transversale + direction longitudinale)

Les essais 4, 5, 6, 12, 13 et 14 (Fig. 2-7) illustrent l'effet de la température sur la cinétique de séchage. Les essais 6 et 12 sont réalisés avec des échantillons qui ont une masse initiale et une surface d'échange plus élevée que pour les autres essais. L'augmentation de la surface d'échange des échantillons pour cet essai a pour effet l'augmentation du coefficient de transfert de masse et par conséquent la favorisation d'évaporation de l'eau à la surface du bois.

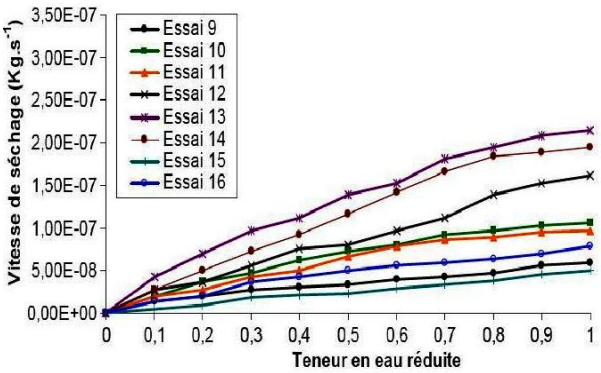

Fig. 3: Courbes de vitesse de séchage pour le bois de sapin blanc
Calcul en direction transversale

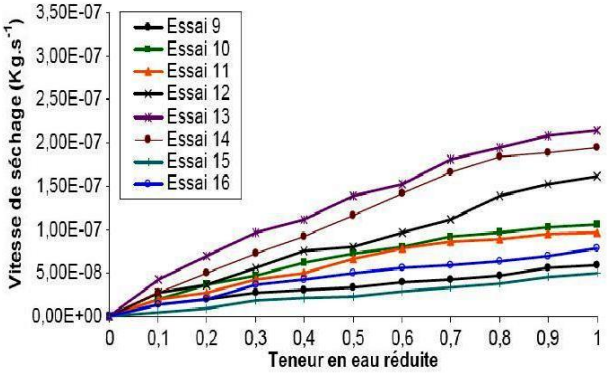

Fig. 4: Courbes de vitesse de séchage pour le bois de hêtre
Calcul sur le témoin (direction transversale + direction longitudinale)

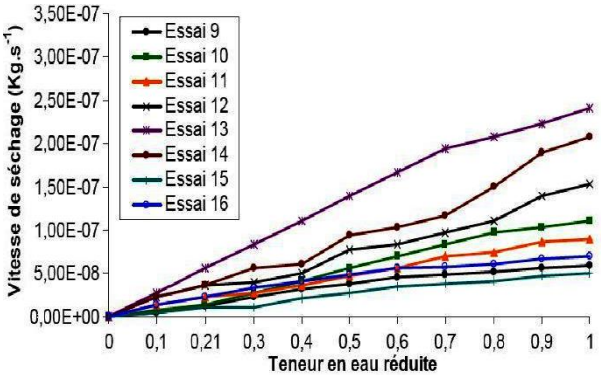

Fig. 5: Courbes de vitesse de séchage pour le bois de hêtre
Calcul en direction transversale

Joly *et al.* [13], ont montré que le temps de séchage est proportionnel à l'épaisseur durant la phase de séchage à vitesse constante, puis au carré de l'épaisseur lorsque la vitesse de séchage est décroissante. Les mêmes auteurs signalent également, à partir des

considérations empiriques, que le gradient d'humidité apparaissant au cours du séchage est plus important lorsque l'épaisseur de la planche augmente.

D'après les résultats obtenus pour les essais 1, 7, 8, 9, 15 et 16 (Fig. 2-7), nous constatons que la vitesse de l'air peut affecter le taux de séchage, puisqu'elle a un effet bénéfique sur la vitesse de séchage des espèces étudiées. En fonction de la capacité évaporatrice de l'air, celle-ci peut absorber plus ou moins de vapeur d'eau provenant du bois. La chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau provoque donc un refroidissement de l'air qui sera plus ou moins important en fonction de la quantité d'eau à évaporer.

Donc si la vitesse de l'air est élevée, la pression de vapeur de l'air sera élevée et le taux de séchage sera faible. Inversement, si la vitesse de l'air est faible, la pression de vapeur de l'air sera faible et le taux de séchage sera élevé. Au-dessus du bois sec, la pression de vapeur est faible. Donc, si de l'air suffisamment humide est mis en contact avec ce bois sec, il absorbera de l'eau [13, 14].

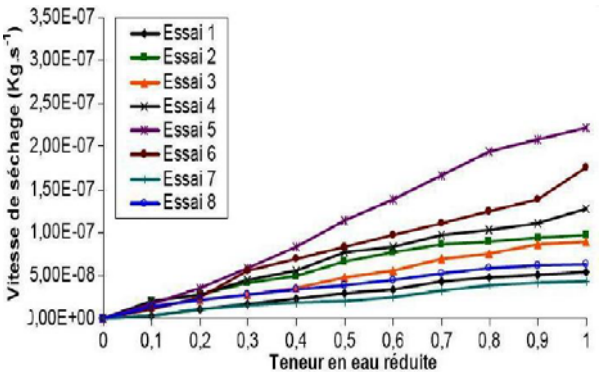

Fig. 6: Courbes de vitesse de séchage pour le bois de sapin rouge
Calcul sur le témoin (direction transversale + direction longitudinale)

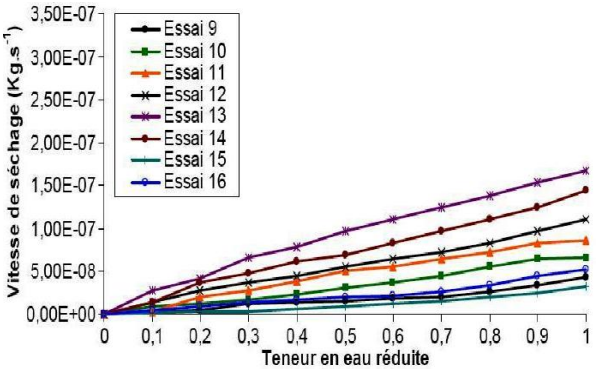

Fig. 7: Courbes de vitesse de séchage pour le bois de sapin rouge
Calcul en direction transversale

5.2 Courbes caractéristiques de séchage

Sur le **Tableau 4**, sont indiquées les valeurs des coefficients C_1, C_2 et C_3 adoptés pour le polynôme d'ajustement de la courbe caractéristique pour chaque essai réalisé et chaque espèce de bois étudiée.

Tableau 4: Coefficients du polynôme d'ajustement des courbes caractéristiques de séchage des espèces de bois étudiées

	Sapin blanc			Hêtre			Sapin rouge		
Coefficients	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3
Témoin	1,18	-0,39	0,21	1,65	-1,31	0,66	1,45	-0,97	0,52
Direction Transversale	1,65	-1,06	0,41	1,046	-0,22	0,17	1,55	-0,97	0,42

Nous avons présenté sur les figures 8 à 13, les vitesses de séchage réduites des essais effectués, ainsi que la courbe caractéristique obtenue avec les valeurs moyennes des coefficients.

Nous notons ici également une faible dispersion de la majorité des essais autour d'une courbe moyenne dite courbe caractéristique [11].

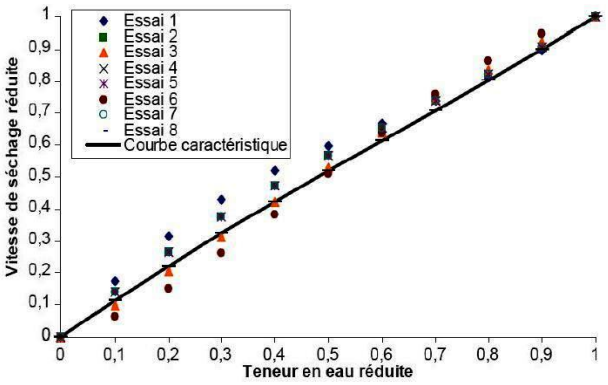

Fig. 8: Vitesse de séchage réduite du bois de sapin blanc
Calcul sur le témoin (direction transversale + direction longitudinale)

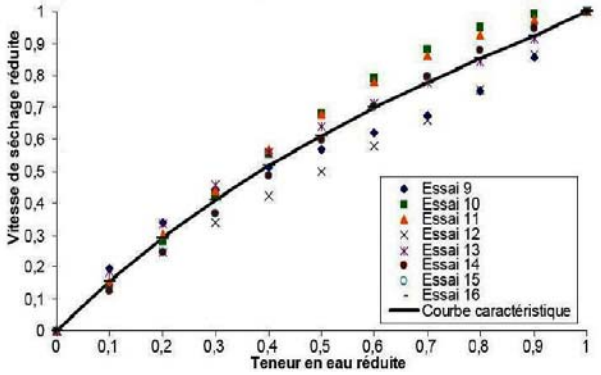

Fig. 9: Vitesse de séchage réduite du bois de sapin blanc
Calcul en direction transversale

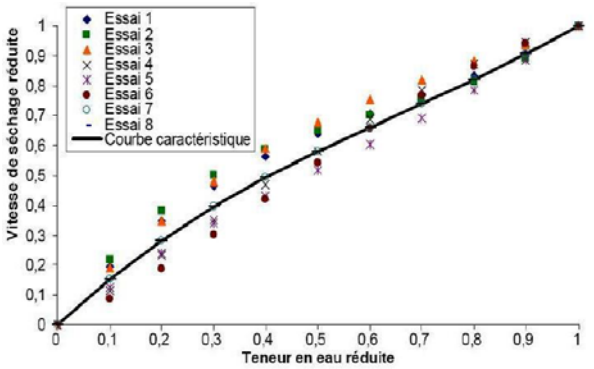

Fig. 10: Vitesse de séchage réduite du bois de hêtre
Calcul sur le témoin (direction transversale + direction longitudinale)

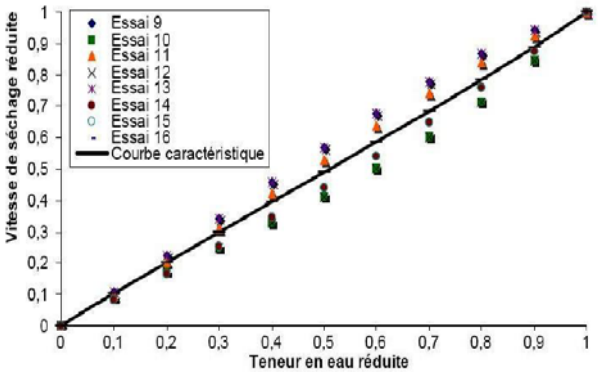

Fig. 11: Vitesse de séchage réduite du bois hêtre
Calcul en direction transversale

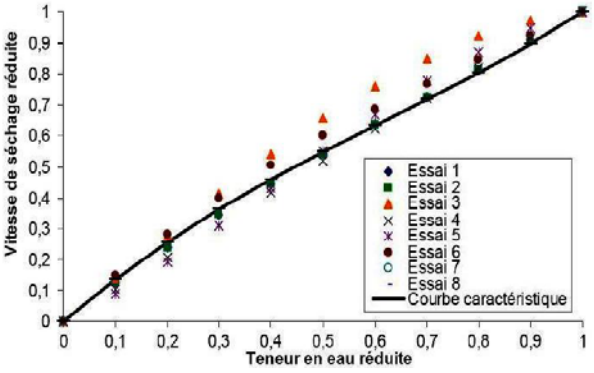

Fig. 12: Vitesse de séchage réduite du bois de sapin rouge
Calcul sur le témoin (direction transversale + direction longitudinale)

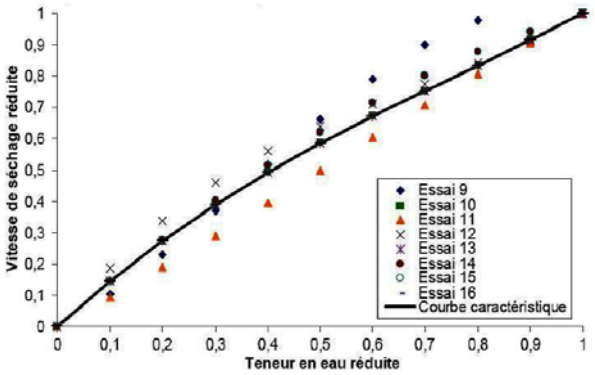

Fig. 13: Vitesse de séchage réduite du bois de sapin rouge
Calcul en direction transversale

5.3 Calcul de la capacité évaporatoire

La capacité évaporatoire est définie comme étant la quantité d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'échange du matériau. Cette grandeur est employée à des fins de dimensionnement des séchoirs industriels [16-19].

Les capacités évaporatoires calculées pour l'ensemble des essais réalisés sont portées en fonction de flux massique, sur la figure 14. Cette figure montre que la capacité évaporatoire dépend linéairement de flux massique maximale.

Bien que le séchage se termine dans la phase de décroissance, les variables opératoires qui maximisent le flux sont celles qui fournissent la capacité évaporatoire la plus élevée. Ceci est probablement dû au fait que l'essentiel du séchage se fait aux limites extragranulaires ce qui maximise le flux maximise également la capacité évaporatoire.

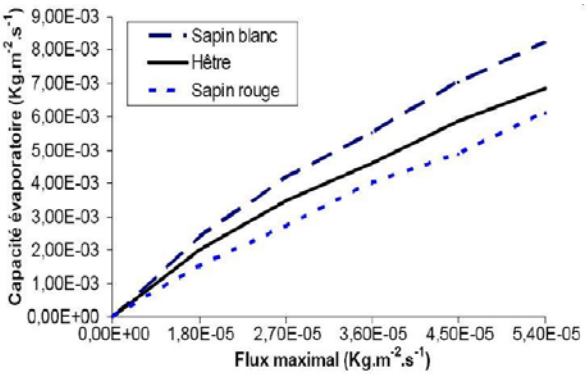

Fig. 14: Capacité évaporatoire en fonction du flux maximal

6. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons déterminé les courbes caractéristiques et les capacités évaporatoires de séchage de trois espèces de bois, à savoir: le sapin blanc, le hêtre et le sapin rouge. Nous avons montré que les cœfficients obtenus pour chaque courbe

caractéristique issue de chacun des essais décrits dans le plan expérimental sont semblables.

Ceci indique que la courbe caractéristique de séchage peut être considérée comme indépendante des variables opératoires et une courbe unique suffit à la caractériser dans tous les cas. Cette courbe permet le regroupement des résultats acquis dans des conditions différentes de vitesse d'air, de température et de taux d'humidité de l'air et permettrait aux sécheurs de bois d'extraire un maximum d'informations sur les conditions de séchage de l'espèce étudiée, quel que soit l'environnement de séchage proposé.

Nous avons montré aussi qu'il existe une relation linéaire entre la capacité évaporatoire et le flux maximal. Cette relation indique que l'essentiel du séchage se déroule, lorsque les limites extragranulaires au transfert sont prédominantes. Les capacités évaporatoires calculées sont plus grandes pour les bois de sapin blanc et de hêtre, que pour le bois de sapin rouge, indiquant que des sécheurs plus volumineux seront nécessaires pour le séchage du sapin rouge.

En ce qui concerne les courbes de vitesse de séchage, les courbes obtenues notent l'absence des phases de mise en température du produit (phase 0), et de séchage à allure constante (phase 1) et présence unique de la phase 2. Cette phase appelée phase de séchage à vitesse décroissante, au cours de laquelle la chute du flux d'évaporation de l'eau est due au passage de la surface dans le domaine hygroscopique et est compensée partiellement par une montée de la température du bois.

En perspective, cette étude nous servira pour optimiser dans un travail ultérieur les conditions de déshydratation des espèces étudiées, en déterminant leurs cinétiques de séchage à l'aide d'un séchoir indirect partiellement solaire.

NOMENCLATURE

F	: Flux massique ($kg.m^{-2}.s^{-2}$)
Hr	: Humidité relative (%)
M	: Masse de l'échantillon à l'instant t (kg)
M_i	: Masse initiale (g)
M_f	: Masse finale (g)
MR	: Teneur en eau réduite (%)
t	: Temps (s)
T	: Température (°C)
W	: Teneur en eau de l'échantillon (%)
W_e	: Teneur en eau d'équilibre (%)
W_c	: Teneur en eau critique (%)

REFERENCES

[1] C. Moyne, '*Etablissement des Courbes de Séchage - Courbes Caractéristiques et Exploitation*', Cahier de L'AFSIA, N°1, pp. 3 - 18, 1985.

[2] R. Rémond, '*Approche Déterministe du Séchage des Avivés de Résineux de Fortes Epaisseurs pour Proposer des Conduites Industrielles Adaptées*', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale de Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Centre de Nancy, 2004.

[3] J.C. Cerre, '*Le Bois du Monde*', 2002. http://www.tous-les-bois.com/.

[4] A. Cloutier, '*Modélisation du Séchage du Bois Basé sur le Concept de Potentiel Hydrique*', Thèse de Ph.D., Université de Laval, Québec, Canada, 275 p., 1991.

[5] A. Giana, '*Influence de la Structure du Bois sur ses Propriétés Physico-Mécaniques à des Teneurs en Humidité Elevées*', Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 232 p., 2006.

[6] S. Merakeb, '*Modélisation des Structures en Bois en Environnement Variable*', Thèse de Doctorat, N°43, Université de Limoges, France, 2004. *http://www.unilim.fr/theses/2006/sciences/2006limo0031/html/index.html*

[7] P. Perré, '*A Heterogeneous Wood Drying Computational Model That Accounts for Material Property Variation Across Growth Rings*', Chemical Engineering Journal, Vol. 86, pp. 117 - 131, 2002.

[8] Y. Shirmer, '*Numerical and Experimental Study of Dryer in Forced Convection*', International Journal of Energy Research, Vol 25, pp. 537 - 553, 2001.

[9] C. Tremblay, A. Cloutier and B. Grandjean, '*Experimental Determination of the Ratio ε of Moisture Movement in the Vapour Phase over the Total Moisture Movement in Wood During a Drying Session*', Wood and Fiber Science, Vol. 3l, N°3, pp. 235 - 248, 1999.

[10] B. Djolani, '*Hystérèse et Effets de Second Ordre de la Sorption d'humidité dans le bois aux températures de 5, 21, 35 et 50 °C*', Note de recherches, N°8, Département d'Exploitation et Utilisation des Bois, Université Laval, Québec, 58 p., 1970.

[11] A. Khouya, '*Contribution aux Etudes Expérimentale et Numérique d'un Processus de Séchage du Bois*', Thèse de Doctorat, Université Abdelmalek Essaâdi, FST de Tanger, Maroc, 2008.

[12] J.P. Nadeau et J.R. Puiggali, '*Séchage des Processus Physiques aux Procédés Industriels'*, Technique et Documentation - Lavoisier : Paris 1995.

[13] P. Joly et C.F. Moré, '*Théorie, Pratique & Economie du Séchage des Bois*', H. Vial. Dourdan, 204 p., 1980.

[14] A. Cloutier and Y. Fortin, '*A Model of Moisture Movement in Wood Based on the Water Potential and the Determination of the Effective Water Conductivity*', Wood and Fiber Science, Vol. 27, pp. 95, 1 - 14, 1993.

[15] VO. Ogwuagwu, '*Numerical Simulation of Moisture Transfer in Wood Drying in Open-Wall Timber Shades*', Leonardo Journal of Sciences, N°10, pp. 17 - 24, 2007.

[16] G. Négrié, '*Journées Séchage Artificiel et Traitement Thermique des Bois*', Urgence et Nécessité, Rhône-Alpes., 2008.

[17] A. Khouya, J. Ben Abdelouhab et A. Draoui, '*Simulation Numérique des Transferts Thermiques dans un Système de Séchage Solaire du Bois*', 13ème Journées Internationales de Thermiques, Albi, France, pp. 416 - 420, 2007. *(http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00164180/en/).*

[18] A. Khouya and A. Draoui, '*Numerical Study of the Energy and Mass Transfers in Solar Drying Systems of a Wooden Pile with and Without Thermal Storage*', ISESCO Sciences and Technology Vision, (acceptée, à paraître en 2008).

[19] Y. Fortin, M. Savard et M. Amazouz, '*Programme de Réduction de la Consommation Energétique des Séchoirs − Industrie du Bois*', Rapport sur l'Analyse des Résultats de l'Enquête Effectuée auprès des Usines de Sciage du Québec, Université Laval, 2003.