

CONTRIBUTION AUX ETUDES EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DES ISOTHERMES DE SORPTION DE TROIS ESPECES DU BOIS

A. KHOUYA, A. DRAOUI

*Laboratoire d'Energétique – Equipe des Transferts Thermiques et Energétique,
Université Abdelmalek Essaâdi - Facultés des Sciences et Techniques de Tanger
BP 416- Tanger – Maroc - Email : ahmedkhouya3@yahoo.fr*

RESUME

L'objectif principal de cette communication est d'élargir les connaissances sur l'état de sorption de l'eau dans le bois, en particulier de contribuer à la détermination numérique et expérimentale des isothermes d'adsorption et désorption de trois espèces de bois à savoir deux résineux tempérés (le bois de sapin blanc et du sapin rouge) et un feuillu tempérés (le bois de l'hêtre). Ce travail a été effectué à l'aide d'une cellule contrôlée en humidité relative et en température. Nous avons ainsi proposé un modèle mathématique dont les paramètres sont identifiés par application de certains principes thermodynamiques des phases. Cette étude montre que, le phénomène d'hystérésis est observé de manière récurrente en adsorption et en désorption et implique certains facteurs notamment la température, que nous avons occultée dans notre travail.

Mot clé : Isotherme de sorption - Bois - Humidité relative - Température.

NOMENCLATURE

Symbole	Définition
a	Constante de calibration $([-])$
C_g	Constante de Guggenheim reliant la monocouche à la chaleur de sorption $([-])$
K	Facteur de correction des propriétés des molécules des multicouches $([-])$
H_r	Humidité relative (%)
W_m	Teneur en eau de la monocouche $([-])$
w_s	Point de saturation des fibres $([-])$
ϕ	Paramètre thermodynamique $([-])$

1. INTRODUCTION

La détermination des isothermes de sorption a un intérêt important dans tout procédé de séchage. Ces isothermes permettent de connaître la teneur finale en eau d'un produit exposé à des conditions de séchage définies (température et humidité), et fournit des informations quant aux conditions limites lors de la modélisation, particulièrement lorsque le matériau est hygroscopique.

Plusieurs auteurs ont étudiées les isothermes de sorption de différentes espèces du bois [1, 2, 3, 7, 9, 10].

DJOLANI [1] a constaté que les matières ligno-cellulosiques sont les principales responsables de l'hystérésis de sorption dans le bois. **SKAAR** [2] a étudié la sorption de l'eau dans les échantillons du bois de Douglas pour différentes conditions de température de l'environnement. Il a expliqué la diminution de l'hystérésis avec l'augmentation de la température par la réhydratation incomplète des sites de sorption de la cellulose lors d'une nouvelle adsorption. **GIANA** [3] quant à lui, a étudié l'effet de la structure et de la taille des pores sur le phénomène d'hystérésis dans le bois. Il a montré que la boucle d'hystérésis à des humidités relatives importante est reliée directement à la taille des pores. Ainsi l'objectif de ce travail est de contribuer à la détermination des isothermes de sorption de trois espèces de bois fréquemment utilisées au nord du Maroc, il s'agit du bois de l'hêtre, sapin rouge et sapin blanc. Une telle contribution est indispensable pour mieux exploiter ces trois espèces de bois.

2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Le but des essais expérimentaux de sorption est de suivre le comportement massique des pièces en bois soumises, à des conditions d'humidité et de température contrôlées en utilisant une cellule de sorption (figure 1). Les conditions hygrométriques de l'ambiance sont fixées pour un régime transitoire jusqu'à obtention de l'équilibre hygroscopique de l'échantillon.

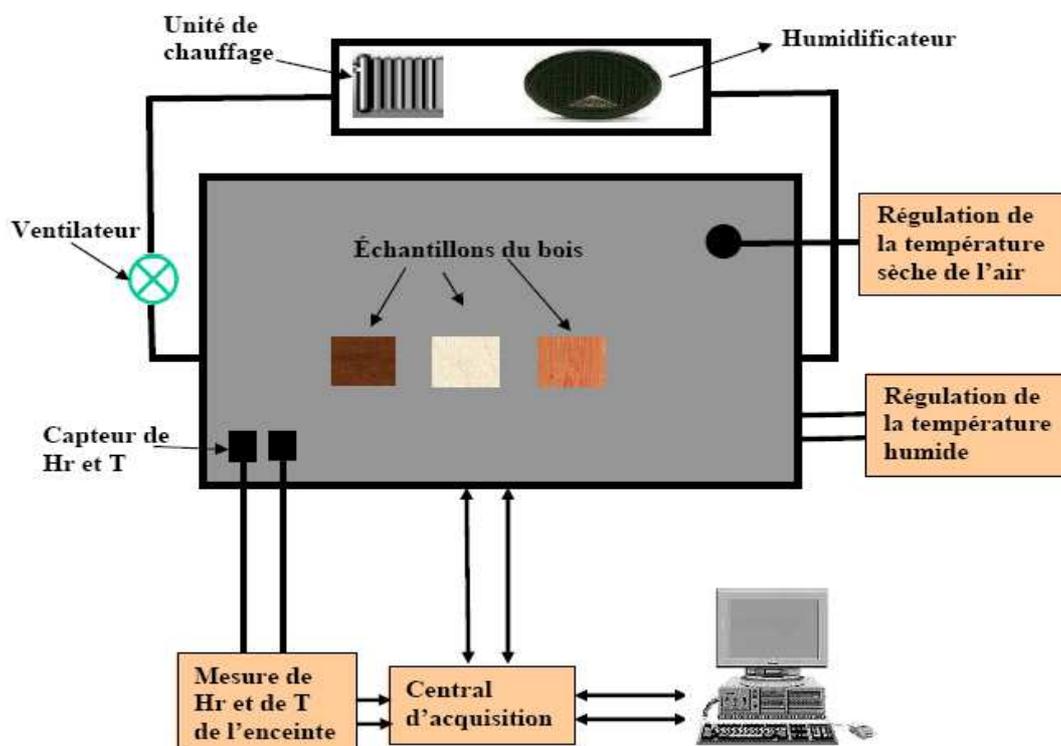


Figure 1 : Cellule expérimentale de sorption

3. MODELISATION DES ISOTHERMES

De nombreuses équations ont été proposées pour modéliser les isothermes. Certaines se basent sur un modèle théorique d'adsorption, alors que d'autres sont de nature empirique. Un inconvénient de ces relations est qu'elles ne sont pas applicables sur toute la gamme des humidités relatives. Le tableau 1 reprend les modèles les plus utilisés [7].

GAB [4]	$C_e = \frac{W_m \cdot C_g \cdot K \cdot Hr}{(1 - K \cdot Hr)(1 + (C_g - 1)K \cdot Hr)}$	0,1 < Hr < 0,90
Henderson [5]*	$C_e = \left(-\frac{\ln(1 - Hr)}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$	0,5 < Hr < 0,95
Dent [6]*	$C_e = \frac{Hr}{A \cdot (Hr)^2 + B \cdot (Hr) + C}$	0,1 < Hr < 0,95
Thermodynamique des phases (Merakeb [7])	$C_e = w_s \exp(\phi \cdot \ln Hr \cdot \exp(a \cdot Hr))$	0 < Hr < 1

* : A, B, et C sont des constantes à déterminer expérimentalement

Tableau 1 : Modèles d'isothermes les plus utilisés.

4. RESULTAS

Pour identifier les modèles des isothermes de sorption décrits dans le paragraphe précédent sur le phénomène d'hystérésis, nous avons effectué des mesures de teneur en eau d'équilibre sur les trois espèces de bois étudiées. Un certain nombre de modèles mathématiques décrivant des isothermes de sorption ont été testés pour minimiser l'écart entre les résultats pratiques et numériques. Vu leur faible gamme de validité ou les mauvais résultats obtenus, quelques modèles n'ont pas été retenus, nous citons à titre d'exemple le modèle de **GAB** [4] et de **Henderson** [5]. Le tableau 2 présente les valeurs des Erreurs Quadratiques Moyenne (EQM) (équation (1)) obtenues après ajustement, pour différents modèles d'isotherme d'adsorption et désorption testés. La comparaison de l'adéquation de chaque modèle pour identifier les résultats expérimentaux est faite sur la base de la valeur des EQM.

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_1^N |X_{cal} - X_{exp}|^2 \quad (1)$$

	EQM		
	Hêtre	Sapin blanc	Sapin rouge
Température	T= 30°C	T= 30°C	T= 30°C
GAB [4]	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	$0,48 \cdot 10^{-2}$
Henderson [5]	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$5,86 \cdot 10^{-3}$	$2,69 \cdot 10^{-3}$
Dent [6]	$0,66 \cdot 10^{-4}$	$4,33 \cdot 10^{-4}$	$6,56 \cdot 10^{-4}$
Merrakeb [7]	$7,25 \cdot 10^{-5}$	$9,04 \cdot 10^{-5}$	$7,25 \cdot 10^{-5}$

Tableau 2 : EQM relatif à l'ajustement des modèles des isothermes de sorption pour les trois espèces de bois.

Par la suite, le modèle thermodynamique [7] sera retenu pour décrire les isothermes de sorption des trois espèces de bois étudiées, car il permet d'obtenir l'Erreur Quadratique Moyenne la plus faible (tableau 2).

Les figures 2, 3 et 4 représentent les résultats expérimentaux et numériques décrivant les isothermes de sorption des espèces de bois étudiées à la température de 30°C. Notons que les diverses conditions à l'adsorption de l'eau par les échantillons de bois étudiés ont toujours été faites à partir de l'état anhydre. Par contre, la désorption a été réalisée suite à une saturation totale ou suite à des adsorptions intermédiaires. Nous remarquons d'après ces figures que les branches d'adsorption et de désorption ont chacune une forme sigmoïdale S caractéristique du type II qui forme une pointe allongée aux basses humidités, voit sa largeur s'accroître progressivement pour passer par un maximum à une humidité relative de l'air d'environ 90%, et pour terminer ensuite de nouveau en pointe. Nous remarquons aussi que l'isotherme d'adsorption est toujours inférieure à l'isotherme de désorption et que l'humidité d'équilibre du bois augmente avec l'humidité relative de l'air. Les isothermes de sorption obtenus ont été extrapolés pour des humidités relatives au-dessus de 100%. Ainsi les méthodes de sorption utilisées dans ce travail ne permettent pas d'obtenir un contrôle assez précis à ces niveaux d'humidité relative. Cependant, les données d'humidité d'équilibre du bois à des humidités relatives élevées sont très importantes puisque c'est dans cette région que les forces capillaires interagissent dans le bois.

La figure 5 montre l'effet de la température sur l'hystérésis de sorption du bois de sapin rouge. L'analyse de cette figure montre que l'hystérèse est fortement affectée par la température: à 50°C elle est déjà deux ou trois fois moindre qu'à 30°C et elle peut disparaître à 80°C pour le cas du sapin rouge et de l'hêtre. La teneur en eau à l'équilibre diminue lorsque la température augmente de 30°C à 50°C. Cette observation est en accord avec les isothermes de la plupart des produits organiques fortement hygroscopiques ([1], [8], [9], [10]).

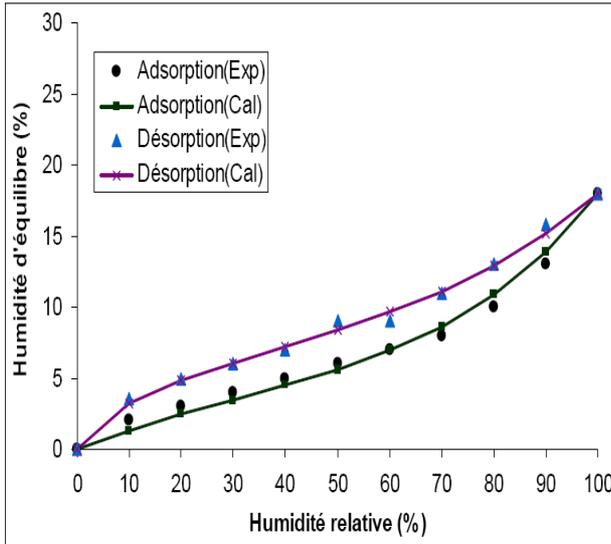


Figure 2 : Hystérésis de sorption pour le bois de sapin rouge
($T= 30^{\circ}\text{C}$; $\varphi_s=1,02$; $\varphi_d=0,67$; $w_s=18\%$; et $a=1$).

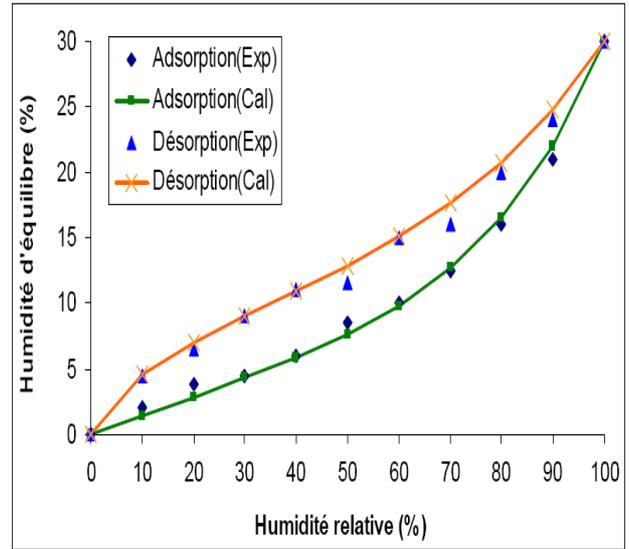


Figure 3 : Hystérésis de sorption du bois de sapin blanc
($T= 30^{\circ}\text{C}$; $\varphi_s=1,15$; $\varphi_d=0,74$; $w_s=30\%$; et $a=1$).

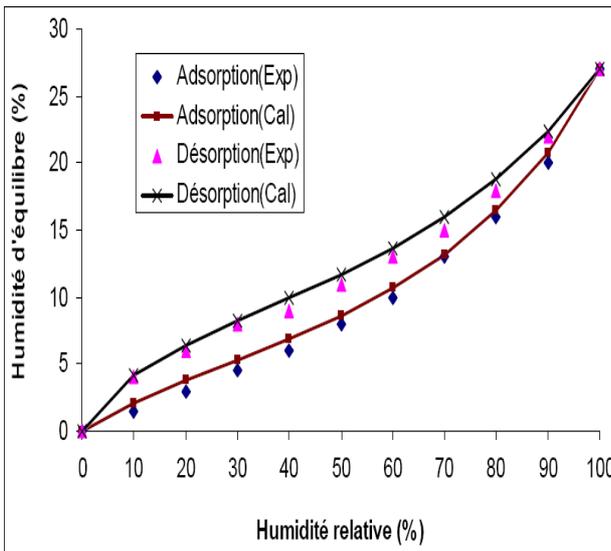


Figure 4 : Hystérésis de sorption de l'hêtre
($T= 30^{\circ}\text{C}$; $\varphi_s=1,02$; $\varphi_d=0,73$; $w_s=27\%$; et $a=1$).

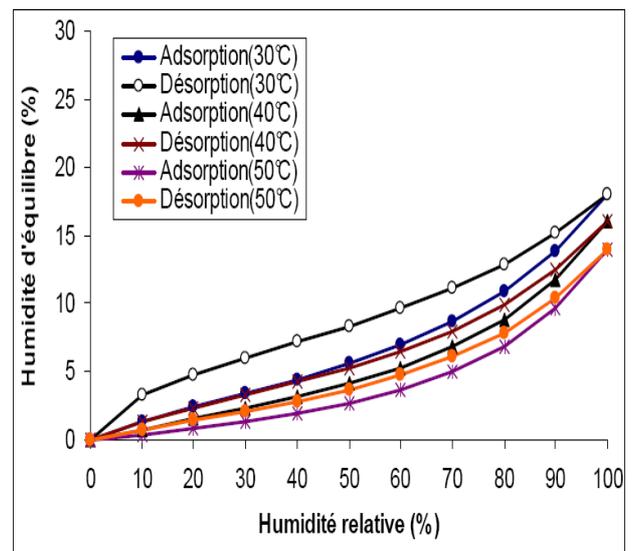


Figure 5 : Hystérésis de sorption du bois de sapin rouge : influence de la température

5. CONCLUSION :

Dans ce travail nous avons déterminé les isothermes de sorption de trois espèces de bois a savoir : le bois de sapin blanc, sapin rouge et l'hêtre. Ces isothermes sont essentielles pour établir un modèle numérique décrivant les mécanismes de transfert de chaleur et de masse

dans le matériau poreux car elles fournissent une véritable carte d'identité « hygro – structurale » à l'équilibre. Les échantillons de bois qui sont soumis au processus de diffusion étaient de petite dimension, essentiellement pour réduire la durée des essais. Le contrôle des conditions climatiques est effectué grâce à une chambre climatique pouvant être réglée à une humidité relative et une température fixée. Nous avons ainsi proposé un modèle dont les paramètres sont identifiés par application de certains principes thermodynamiques des phases. Les résultats obtenus montre que, le phénomène d'hystérésis est observé de manière récurrente à chaque changement du sens de variation de l'humidité relative et doit impliquer plusieurs facteurs notamment la température, que nous avons occultée dans notre travail. Cependant, les essais réalisés ont porté sur des cycles d'humidité relative dont les amplitudes sont centrées sur 50%. Nous pensons tout de même que les hystérésis sont de grandes amplitudes si les chaleurs d'adsorption et de désorption mises en jeu dans le phénomène d'hygroscopie sont plus grandes, c'est-à-dire quand le bois est proche de l'état anhydre. Il est donc nécessaire de compléter les essais pour une meilleure connaissance du comportement hygroscopique du bois, quelles que soient les variations climatiques de l'environnement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **DJOLANI B. (1970)**, "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.*
- [2] **SKAAR C. (1984)**, "Wood water relationships in "the chemistry of the solid wood", Am, chem. Soc. Washington.
- [3] **GIANA A. (2006)**, "Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées". *Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, 232.PP.*
- [4] **GUGGENHEIM E. (1966)**, "*Applications of statistical mechanics*". Clarendon Press: Oxford, UK.
- [5] **HENDERSON. S. M.** (1952), "A basic concept of equilibrium moisture," *Agric. Eng.*, 33, PP: 29-32.
- [6] **DENT R.W. (1977)**, "A multilayer theory for gas sorption, Part I: Sorption for a single gas". *Textile Research Journal. Vol. 47, PP : 145-152.*
- [7] **MERAKEB. S.**, "Modélisation des structures en bois en environnement variable", *Thèse de Doctorat N° 43, Université de Limoges, Faculté des Sciences et Techniques, 2006. <http://www.unilim.fr/theses/2006/sciences/2006limo0031/html/index.html>.*
- [8] **PERALTA P. N. et BANGI A. P. (2003)**, "A nonlinear regression technique for calculating the average diffusion coefficient of wood during drying". *Wood and Fiber Science, 35(3), PP: 401-408.*
- [9] **FORTIN Y. (1982)**, "Les mouvements de l'eau dans le bois. Dans: Compte rendu du symposium : Entretien du bois". *Association des Anciens Elèves de l'école Supérieure du Bois. Paris. PP: 3 - 8.*
- [10] **KHOUYA A. (2008)**, " Contribution aux études expérimentale et numérique d'un processus de séchage du bois". *Thèse de Doctorat, Université Abdelmalek Essaâdi, FST de Tanger, Maroc.*