



Lissage des Isothermes de Sorption d'un Tissu en Coton par la méthode du Simplexe

Using the Simplex Method for fitting the sorption isotherms of a cotton fabric

Bhourri N.^{1,2}, Houngan C. A.^{1,3}, Ben N. S.², Vianou A.³, Perré P.¹

¹LERFOB-UMR, Agro Paris Tech, ENGREF INRA Nancy, France

²LESTE, ENIM Avenue IBN ELJAZZAR, 5019 Monastir, Tunisie

³Laboratoire de Caractérisation Thermophysique des Matériaux et d'Appropriation Energétique (C.T.M.A.E)
Ecole Polytechnique d'Abomey-calavi (E.P.A.C) - 01BP 2009, Cotonou (Bénin) - Tél : 97328255 / 64007491

Email : hounaris@yahoo.fr

Reçu Décembre 2013 – Accepté mai 2014

Résumé

Ce papier présente un dispositif expérimental utilisé pour la mesure des courbes de sorption des matériaux poreux suivant la méthode gravimétrique en utilisant une balance à suspension magnétique de 0,01mg de précision. Des expériences des cinétiques d'adsorption et de désorption d'un Tissu Toile en coton ont été effectuées à la température de 25°C et de 35°C. Le réglage de l'humidité du banc d'essai est effectué par le mélange d'un air sec et d'un air saturé selon des proportions contrôlées à l'aide de deux contrôleurs de débit massique. La commande de l'humidité et de la température et l'enregistrement régulier de la masse sont effectués automatiquement à l'aide d'un logiciel écrit en Visual Basic. Les résultats et les interprétations des isothermes, nous ont montré une allure délimitant trois zones de sorption en relation avec le type de fixation de l'eau avec la matière. Une hystérésis de sorption entre la phase d'adsorption et la phase de désorption a été mise en évidence à la température de 25°C et de 35°C. Enfin, un lissage des isothermes par le modèle de GAB a été effectué afin de déterminer les paramètres correspondant à l'aide d'une procédure utilisant la méthode de simplexe.

Keywords : Toile ; Isothermes de sorption ; Balance à suspension magnétique ; Méthode de simplexe ; Hystérésis.

Abstract

This paper presents an experimental device used in the measurement of sorption curves of porous materials based on the gravimetric method by using magnetic suspension balance of 0,01 mg precision. Kinetics experiments of adsorption and desorption of a cotton linen have been carried out at temperature 25°C and 35°C. The adjustment of the setting of test-bed humidity is carried out through the mixture of dry air and saturated air according to controlled proportions with the aid of two mass flow controllers. The control of humidity, temperature and the regular registration of the mass are automatically carried out through written software written in Visual BASIC. The results and interpretations of the isotherms showed us a rate delimiting three zones of sorption in relation to the type of water fixing with the matter. A sorption hysteresis between adsorption and desorption phase has been highlighted at temperature 25°C and 35°C. Finally, a preening of the isotherms through the GAB model has been carried out in order to determine the parameters corresponding through a procedure using the simplex method.

Keywords: Linen, sorption Isotherms, magnetic suspension balance, Simplex Method, Hysteresis.

1. Introduction

Le vêtement est une interface qui crée, par une couche d'air qu'il confine, un microclimat près du corps plus agréable que l'environnement extérieur. Il est capable de pomper l'humidité dégagée par le corps pour l'évacuer plus tard vers l'ambiance externe permettant ainsi de contribuer au maintien de la sensation du confort thermique (Bhourri, 2009). Cette aptitude dépend de la qualité des transferts couplés de chaleur et de masse générée par les processus d'adsorption/désorption de l'eau sous ses formes biphasées (Li et al, 2001). D'où l'importance de savoir, à chaque humidité, la teneur en eau emprisonnée dans le tissu, permettant de le stabiliser avec l'environnement. Ce qui montre l'intérêt des isothermes de sorption qui relient, à une température donnée, la teneur en eau à l'équilibre, du matériau, à l'humidité relative de l'ambiance (Jannot, 2003). Nous allons présenter le dispositif expérimental utilisé pour la détermination des courbes de sorption des matériaux poreux que nous allons utiliser pour la de 0,01 °C).

mesure de la teneur en eau à l'équilibre d'un Tissu Toile en coton. Les isothermes d'adsorption et de désorption obtenues à la température de 25°C et de 35°C sont analysées pour identifier trois zones de sorption dépendant du type de fixation de l'eau avec la matière. Une hystérésis de sorption a été mise en évidence. Les interprétations de l'hystérésis et sa dépendance de la température sera effectuées, avant de finir par une présentation des paramètres de GAB obtenus selon un lissage à l'aide d'une procédure développée en utilisant la méthode de Simplexe.

2. Présentation du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (figure 1) est composé d'un générateur d'air humide, d'une unité d'acquisition et d'une balance à suspension magnétique connectée à la chambre de mesure. Le tout est thermostaté à l'aide de la circulation de l'eau à température régulée à l'aide d'un cryothermostat (précision



Figure 1. Photos du dispositif expérimental (a) en position de mesure (b) enceinte isotherme à double paroi abaissée pour accéder à l'échantillon. 1 : débitmètres, 2 : saturateur, 3 : balance, 4 : échantillon, 5 : enceinte à double parois

2.1. Balance à suspension magnétique

La balance à suspension magnétique permet de mesurer avec une grande précision les variations de masse dans une ambiance contrôlée en température, pression et humidité relative. La masse maximale pesée par la balance est de 25 g avec une résolution de 0,01 mg (Dreisbach et al, 2000). (La zone interne de l'échantillon est régulée en Température, Pression et Humidité). La balance offre la possibilité d'effectuer des tarages réguliers sans toucher aux conditions de la chambre de mesure à l'aide du système de fixation de l'échantillon sur un crochet suspendu à la partie inférieure de l'électroaimant. Deux positions particulières de la suspension magnétique peuvent être repérées (figure 2) :

- Position Zéro ZP : le mobile magnétique est suffisamment bas pour que l'échantillon soit

découplé de la balance, cette configuration correspond à une balance non chargée. Elle permet le tarage et l'étalonnage.

- Position Mesure MP : le mobile magnétique est dans une position plus haute qui permet de soulever l'échantillon par l'intermédiaire de la cage d'accouplement, la balance indique la masse de l'échantillon mesurée.

L'électroaimant de la balance est situé au dessus de la chambre de mesure, ce qui permet de l'isoler complètement d'où le niveau expérimentale de la température, d'humidité et de pression ne perturbent pas la pesée. Un régulateur PID assure le positionnement du noyau par rapport à la bobine de détection par l'intermédiaire d'un système électromagnétique. La variation de la masse est

transmise au module d'affichage par l'intermédiaire

d'un convertisseur de courant induit.

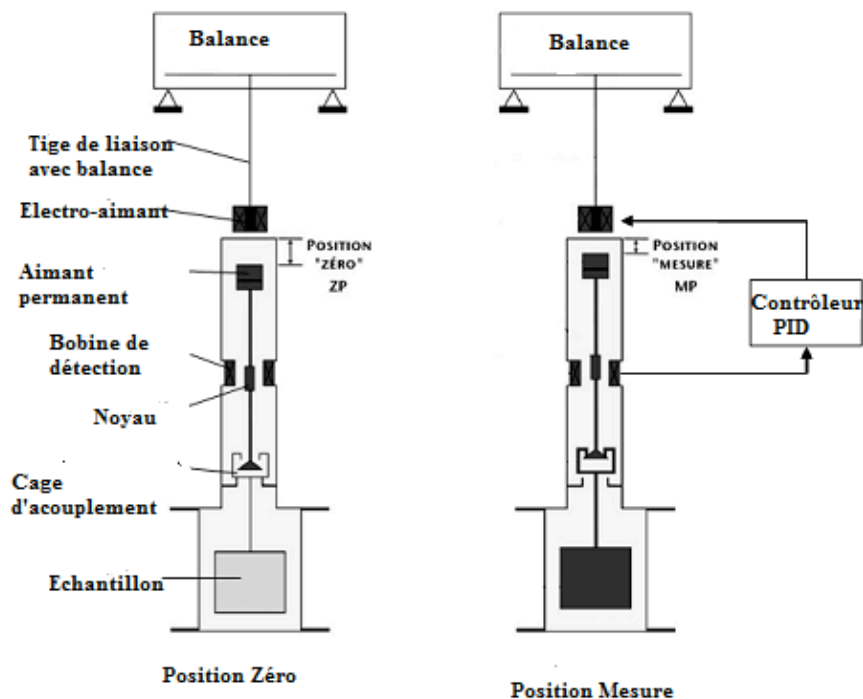


Figure 2. Représentation schématique de la balance à suspension magnétique

2.2. Générateur d'air humide

Le mélange d'un air sec et d'un air saturé selon des proportions contrôlées à l'aide de deux débitmètres massiques (figure 1) permet de fixer les consignes des humidités relatives. Un saturateur formé par une double enceinte cylindrique de diamètre 110 mm /180 mm et de hauteur 835 mm a été dimensionnée et réalisée en acier inoxydable pour assurer la formation de l'air saturée par barbotage dans l'eau. Les flux d'air sec et d'air saturé sont mélangés à la sortie du saturateur.

Le générateur d'humidité, les tubes conduisant l'air humide et la double enceinte cylindrique (diamètres : 100 mm/160 mm, hauteur : 425 mm) entourant la chambre de mesure (diamètre : 34 mm, hauteur : 220 mm) sont thermo régulés par la circulation continue (circuit fermée) de l'eau du cryothermostat afin de maintenir la température isotherme tout le long des cycles de mesure (figure 3).

Un capteur de température et d'humidité (HIH 3602C de Honeywell qui comprend une sonde Pt1000 et un capteur capacitif d'humidité) a été utilisé pour le contrôle des conditions climatiques (Température, Humidité relative) placé à proximité de l'échantillon à l'intérieur de la chambre de mesure.

2.3. Unité d'acquisition

Grâce à un logiciel développé en Visual Basic, un micro-ordinateur commande les débitmètres massiques pour choisir les proportions d'air sec et

d'air humide permettant de produire l'humidité désirée. Ce logiciel permet également d'assurer le tarage régulier de la balance, de fixer la température de consigne du cryothermostat et d'enregistrer régulièrement la masse, la température et l'humidité relative via une centrale d'acquisition (Agilent 34970 A). Les données sont enregistrées dans un fichier pour les traitements ultérieurs.

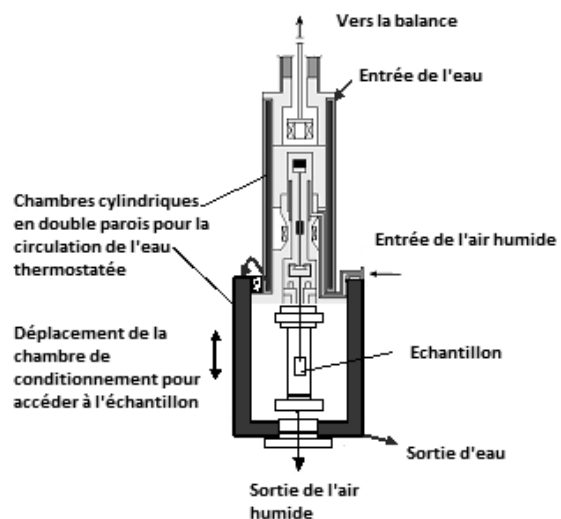


Figure 3. Le principe de contrôle de la température et de l'humidité relative dans la chambre de mesure

2.3.1. Etalonnage des capteurs et mesure préliminaires

La précision des mesures dépend de la précision des outils et de la fiabilité des capteurs utilisés. L'étalonnage du capteur de température et d'humidité relative a été effectué pour vérifier la fiabilité des résultats offerts. Des mesures préliminaires ont été effectuées afin de vérifier la stabilité de la température, l'efficacité de l'isolation thermique et la précision de la balance en notant la fréquence optimale de tarage.

Un capteur RTD a été utilisé pour effectuer des relevés de température dans la chambre de mesure. Ces relevés ont montré la nécessité de faire une isolation du générateur d'humidité, de la chambre de mesure et des canalisations de l'air humide. Ces améliorations expérimentales ont permis d'avoir une bonne stabilité thermique avec un écart type de $\pm 0,02$ °C.

Nous avons appliqué des proportions contrôlées d'air sec et d'air saturé pour avoir des humidités relatives théoriques qui correspondent à celles données par le capteur capacitif (HIH 3602C) d'humidité. Nous avons utilisé un analyseur de point de rosé (HYGRO M4-DP) pour étalonner notre capteur aux humidités de 18%, 36 %, 54 % et 90 %. Une stabilité de $\pm 0,04$ % de l'humidité relative a été enregistrée.

Afin de quantifier l'influence de la variation des conditions climatiques sur les relevés massiques, nous avons mené une acquisition continue de la masse du crochet dont la valeur est constante chaque 30s avec un tarage régulier chaque 30mn, un tarage régulier chaque 5mn et sans tarage. Les conditions climatiques sont variables respectivement entre 29,5°C et 32 °C pour la température et entre 0 et 90 % pour l'humidité relative. La variation de la masse du crochet en fonction du temps durant 11h d'acquisition continue est optimale pour le cas du tarage régulier chaque 5 mn, il est de 2029,99 mg avec un écart type de 0,02 mg et une incertitude de 0,001 %. Cette incertitude est très proche de la résolution de la balance (0,01 mg). Pour déterminer la durée à partir de laquelle les échantillons atteignent leurs états d'équilibre, nous avons mené des expériences préliminaires des cinétiques d'adsorption et de désorption. Pour cela, nous avons réglé la température à 25 °C (figure 4a et 4b) et nous avons mesuré la teneur en eau en fonction du temps lors de l'adsorption pour les humidités de 33%, 47 % et 55 %, et lors de la désorption pour les humidités de 43 %, 17 % et 3 %. Les résultats présentés montrent que l'équilibre hydrique des échantillons est atteint au bout d'une heure de conditionnement.

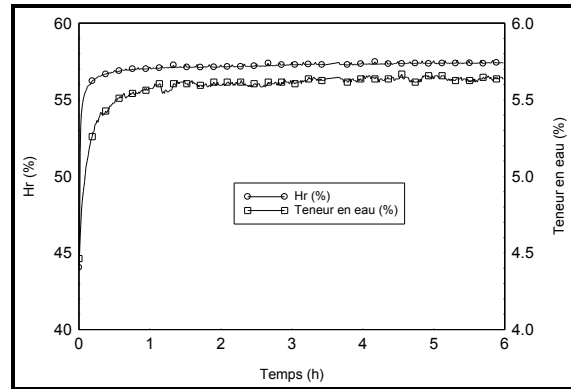


Figure 4a. La cinétique d'adsorption d'un tissu toile en coton

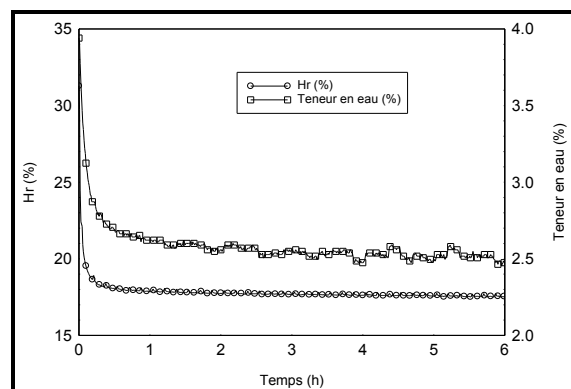


Figure 4b. La cinétique de désorption d'un tissu toile en coton

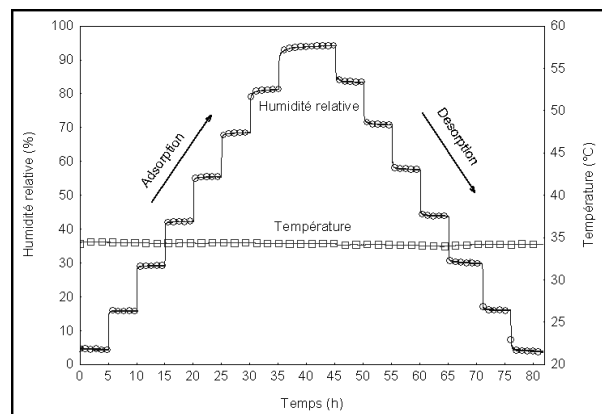


Figure 5. Les conditions de température et d'humidité pendant un cycle d'adsorption-désorption

3. Le protocole de mesure et les cinétiques de sorption.

Les conditions climatiques (température, humidité relative) de la chambre de mesure ont été réglées selon le protocole de la figure 5. En effet, nous avons fixé au départ la température à 35 °C (les mesures sont répétées à la température de 25 °C) et nous avons

varié les débits de l'air humide et de l'air sec pour décrire toute la plage d'humidité relative allant de 3 % à 95 % en adsorption et en désorption. Vu la rapidité de la réponse de sorption des échantillons en coton, nous avons choisi une durée de 6h pour chaque palier et, nous avons programmé un tarage automatique régulier de la balance toutes les 5 minutes. Les enregistrements de la masse sont effectués toutes les 30 secondes. Nous avons appliqué ce protocole pour les échantillons de tissu Toile dont les propriétés sont représentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Propriétés métrologiques du tissu Toile en coton

| Armure | Toile |
|------------------|----------------------|
| Nm fil de chaîne | 38,5 |
| Nm fil de trame | 30 |
| Compte chaîne | 24 fils/cm |
| Compte trame | 22 fils/cm |
| Masse surfacique | 130 g/m ² |
| Retrait | 1,385% |
| Embuvage | 8% |
| Epaisseur | 0,4133 mm |

La teneur en eau X(%) est calculée selon l'équation (1) :

$$X = \frac{M(t) - M_s}{M_s} \quad (1)$$

Avec M(t) : masse de l'échantillon à l'instant t
M_s : masse sèche obtenue de l'échantillon après un étuvage de 6 heures dans une étuve à 105 °C.

Les figures 6a et 6b présentent l'évolution de la teneur en eau du tissu le long d'un cycle d'adsorption et de désorption pour les températures de 25 °C et de 35 °C. Elle montre la rapidité des échantillons à atteindre leurs états d'équilibre pour les faibles humidités et la difficulté à atteindre cette stabilité pour les plus hautes humidités. En fait, pour des humidités relatives de l'air inférieur à 75%, les échantillons atteignent leurs équilibres après une heure de stabilité hydrique. Par contre, ils ne trouvent pas l'équilibre après 6h de stabilité pour des HR > 90%. Ceci s'explique par le fait qu'aux hautes humidités relatives, les molécules d'eau adsorbées vont causer un encombrement stérique au niveau de la surface du matériau, ce qui entraîne une mobilité des chaînes moléculaires pour créer des nouveaux sites de sorption d'où le retard de l'équilibre hydrique (Watt et al, 1979). Nous constatons également que les capacités de sorption du Jersey décroissent avec la température. Ceci s'explique par la diminution des formations de liaisons hydrogène à cause de l'augmentation de la mobilité des molécules d'eau en fonction de la \square hydroxyles constituant la cellulose en formant une couche monomoléculaire.

température (Dwiargo, 1994).

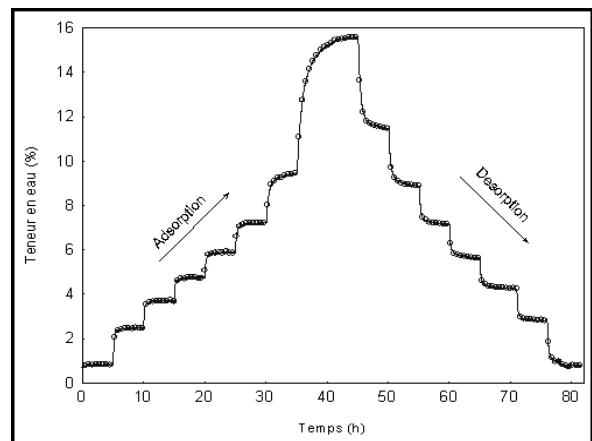


Figure 6a. Évolution de la teneur en eau d'un tissu Toile durant un cycle de mesure à T=25 °C.

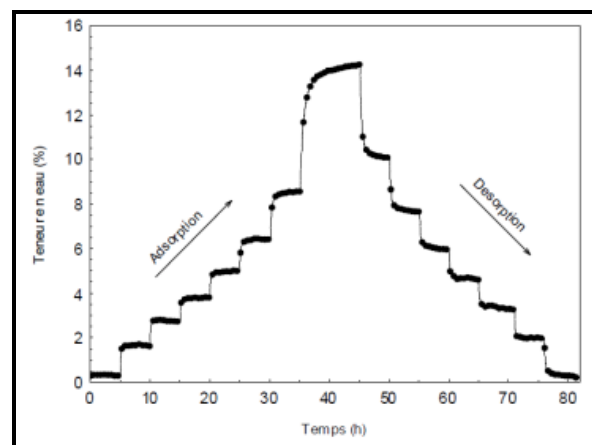


Figure 6b. Évolution de la teneur en eau d'un tissu Toile durant un cycle de mesure à T=35 °C

4. Résultats et discussions

4.1. Les isothermes de sorption et l'hystérésis de sorption

Nous avons représenté la teneur en eau à l'équilibre en fonction des humidités du cycle d'adsorption et de désorption, dans la figure 7, pour obtenir respectivement les isothermes d'adsorption et de désorption à la température de 35 °C (gauche) et à la température de 25 °C (droite). Les isothermes d'adsorption et de désorption présentent une allure identique sous forme de 'S' marquée par la présence de deux points d'inflexion qui limitent trois zones de sorption différentes :

\square Une première zone (Hr < 30 %), correspond à l'action de l'eau fortement liée sur la structure micro poreuse du tissu. En effet, les molécules d'eau se fixent sur les groupements

\square Dans la deuxième zone (30 % < Hr < 70 %), la formation des mono couches se poursuit tandis que les molécules d'eau se fixent sur celle déjà adsorbées

pour former une couche poly moléculaire. La masse d'eau adsorbée croît à peu près linéairement.

□ Une troisième zone ($H_r > 70\%$) où la pression partielle de vapeur d'eau est élevée et la surface poreuse de la matière est occupée par des multicouches d'eau (Figure 7a et b). La liaison de l'eau avec la matière devient de plus en plus faible et les multicouches au niveau des micropores se rejoignent pour former l'eau capillaire.

Le décalage entre les isothermes d'adsorption et de désorption du tissu (figure 7) met en évidence la boucle d'hystérèse de sorption. En effet pour une même humidité relative, nous constatons que la teneur en eau à l'équilibre d'un échantillon lors de l'adsorption est inférieure à celle obtenue par désorption (Bhourri et al, 2006). Ceci correspond aux différences de structure interne des fibres qui composent le tissu (ponts hydrogène entre les groupements hydroxyles des macromolécules et/ou les molécules d'eau) en fonction de leurs histoires hydriques. Dans les fortes valeurs d'humidité relative (troisième zone des isothermes), l'hystérésis paraît plus importante, ce qui peut être expliqué par l'effet de l'histoire hydrique sur la formation des amas de molécules d'eau condensés dans les microporosités des fils (Bhourri et al, 2007).

L'élévation de la température permet de réduire la largeur de la boucle d'hystérèse de sorption du Jersey en coton. En effet, l'élévation de la température réduit les capacités de sorption du matériau d'une façon irréversible ce qui cause un encombrement moins important des molécules d'eau et une diminution de la déformation structurelle. Ces effets ont été étudiés par Engelhardt (1979) et par Djolani (1970) sur différentes espèces de bois, et ils ont montré que l'hystérésis diminue de trois à quatre fois entre 25°C et 50°C et elle disparaît à partir de 75°C pour le hêtre (Fan et al, 2005).

4.2. Lissage des isothermes d'adsorption et de désorption

Plusieurs modèles sont utilisés pour le lissage des isothermes de sorption, parmi lesquels nous notons ceux qui s'intéressent par la modélisation d'une partie de la courbe tel que le modèle de Langmuir (zone 1), le modèle de BET (zone 1, zone 2), et ceux qui s'intéressent par la totalité de la courbe tels que les modèles de GAB et d'Oswin (Bassal et al, 1993 ; Jannot et al, 2006). Nous proposons ci-dessous d'utiliser le modèle de GAB (2) pour le lissage des isothermes d'adsorption et de désorption du tissu Toile pour identifier ses paramètres physiques.

$$X(\%) = \frac{X_0 \cdot H_r \cdot C \cdot K \times 100}{(100 - H_r K)(100 + H_r C K - H_r K^2)}$$

Avec X_0 : La teneur en eau de la mono couche (transition entre zone 1 et zone 2). C : Constante liée à

Copyright © *Revue Cames SAI*, Vol.1, N° 1, Juin 2014

la chaleur de sorption de la mono couche.

K : Constante liée à la chaleur de sorption de la multicouche. Pour la détermination des paramètres X_0 , C , K les mieux représentatifs de nos courbes expérimentaux, nous avons utilisé un algorithme d'identification permettant de minimiser la fonction:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{i, \text{imes}} - X_{i, \text{ical}})^2}{n} \quad (3)$$

avec ($X_{i, \text{imes}}$: La teneur en eau mesurée expérimentalement $X_{i, \text{ical}}$: La teneur en eau calculée par le modèle de GAB, n : Le nombre des points expérimentaux) en utilisant la méthode de simplexe explicitée dans la figure 8 (Nelder et al, 1965). Le coefficient de corrélation R^2 et les paramètres de GAB du tissu Toile en coton en adsorption et désorption pour les températures 25 °C et 35 °C sont consignés dans le tableau II. L'ajustement des points expérimentaux obtenus en adsorption et en désorption à la température de 25 °C et de 35 °C pour le tissu Toile en coton par le modèle de GAB est statistiquement satisfaisant ($R^2 = 0,99$).

Nous constatons que la teneur en eau de la monocouche (X_0) pendant la phase d'adsorption est supérieure à celle obtenue pendant la phase de la désorption ce qui montre que l'hystérésis de sorption est marquée dès la formation de la monocouche d'eau dans les sites de sorption microscopiques. Nous notons, également, que la température permet de réduire les capacités de sorption de la monocouche ceci se justifie par l'augmentation de la mobilité des molécules d'eau ce qui réduit la probabilité de fixer les molécules d'eau sur la matière.

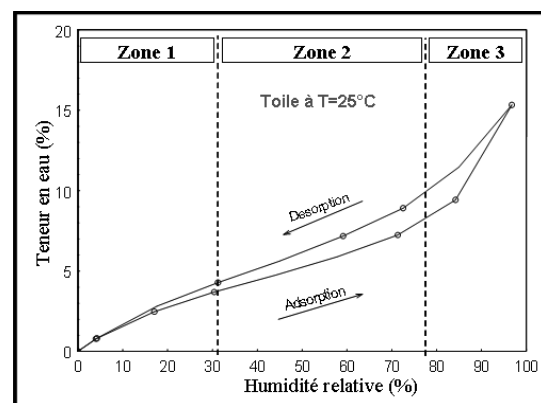


Figure 7a. Isothermes d'adsorption et de désorption à $T = 25^\circ\text{C}$ d'un tissu Toile en coton

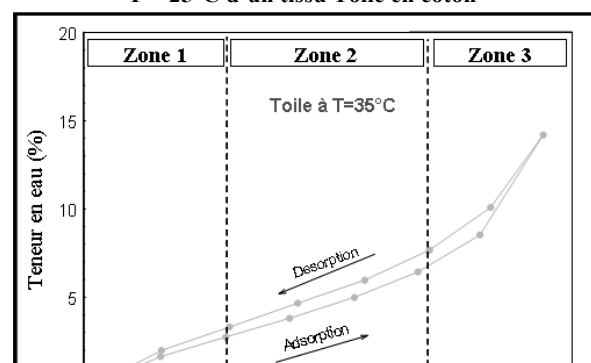


Figure 7b. Isothermes d'adsorption et de désorption à T = 35°C d'un tissu Toile en coton

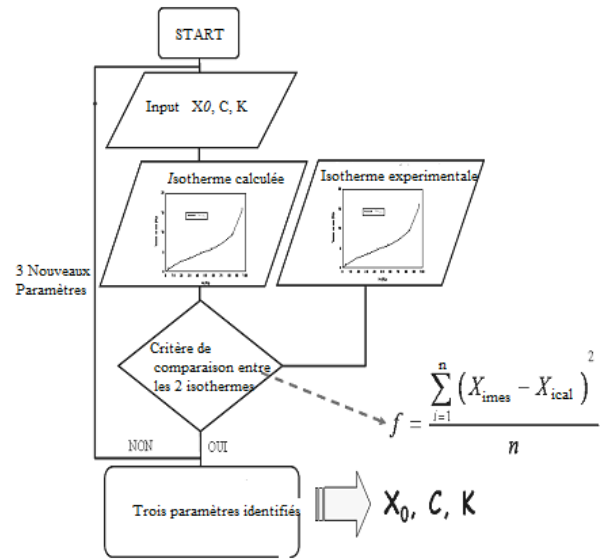


Figure 8. Procédure de l'identification des paramètres de GAB selon la méthode du simplexe

Tableau 2. Paramètres de GAB identifiés par la méthode de Simplexe

| Modèles | Paramètres | Toile en Coton | | | |
|---------|------------|----------------|--------|------------|--------|
| | | Adsorption | | Désorption | |
| | | 25°C | 35°C | 25°C | 35°C |
| GAB | X_0 (%) | 3,1855 | 2,9848 | 4,7499 | 3,8852 |
| | C | 13,5781 | 6,3573 | 7,3881 | 5,7443 |
| | K | 0,8198 | 0,8461 | 0,6686 | 0,7862 |
| | R^2 | 0,9982 | 0,9990 | 0,9999 | 0,9993 |

5. Conclusion

Ce papier a présenté les caractéristiques techniques du dispositif expérimental utilisé pour la mesure des cinétiques et des isothermes de sorption d'un Tissu Toile en Coton à la température de 25°C et de 35°C. Les résultats ont montré la rapidité des échantillons à atteindre leurs états d'équilibre pour les faibles humidités et la difficulté à atteindre cette stabilité pour les plus hautes humidités à cause de la création des nouveaux sites de sorption lors de la formation des amas d'eau dans les pores du tissu. Les formes des isothermes ont été identifiées et justifiées par le type des liaisons entre les molécules d'eau et la matière. Une hystérésis causée par l'effet de l'histoire hydrique de la matière a été mise en évidence, cette hystérésis se réduit sous l'effet de la température pour montrer l'effet de la mobilité des molécules d'eau lors de l'augmentation de la température. Une

procédure de lissage des isothermes par le modèle de GAB a été développée afin d'identifier les paramètres physiques.

REFERENCES

- [1] N. Bhouri. "Comportement thermodynamique et dimensionnel des matériaux textiles soumis à des variations de conditions climatiques". Thèse en cotutelle entre l'ENIM et l'UHP. Nancy 1. 2009.
- [2] Y. Li, Q.Y. Zhu, Z. X. Luo. "Numerical Simulation of heat transfer coupled with moisture sorption and liquid transport in porous textiles". 6th Asian Textile Conference. August 22-24. 2001, Hong Kong.
- [3] Y. Jannot. Isothermes de sorption : modèles et détermination. Communication de LEPT, ESAM. 2003. Bordeaux-Talence.
- [4] F. Dreisbach, H. Lösch. "Magnetic suspension balance

for simultaneous measurement of a sample and the density of the measuring fluid". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 62 (2). 2000. pp. 515-521. [doi:10.1023/A:1010179306714](https://doi.org/10.1023/A:1010179306714). ISSN: 1418-2874.

[5] I. C.Watt, R. L. Dart. "Water Vapour adsorption isotherms of wool". *Journal of the Textile Institute*.1979.70:298-307. [doi:10.1080/00405007908658854](https://doi.org/10.1080/00405007908658854)

[6] B. Dwiargo. "Détermination expérimentale de l'influence de l'hystérésis sur les propriétés hydriques des matériaux poreux du génie civil". Thèse en systèmes énergétiques et procédé au matériau à l'INSA. 1994. Toulouse.

[7] N. Bhourri, A. Houngan, P. Perré. "Détermination des isothermes d'adsorption et de désorption d'un tissu à l'aide d'une balance à suspension magnétique". 1er Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies de Séchage. 17-19 Décembre 2006. Tozeur-Tunisie.

[8] N. Bhourri, A. Houngan, P. Perré. "Etude de l'influence du liage Jersey sur les capacités de sorption des fils en Coton pour deux Températures différentes". Congrès de la Société Française de Thermique. 29/05-01/06/2007. Marseille-France.

[9] E. Engelhardt. "Untersuchungen über die Wasser dampfsorption durch buchenholz im temperaturbereich von 110° bis 170 °C". *Holz als Roh-und Werkstoff*. (37). 1979. pp.99-112. [Doi : 10.1007/BF02610854](https://doi.org/10.1007/BF02610854).

[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. 1970. Université Université de Laval, Québec.

[11] L. Fan, M. Zhang, Q. Tao, G. Xiao. "Sorption isotherms of vacuum fried carrot chips". *Drying Technology*. N°7 (23). 2005 pp. 1569-1579. [doi :10.1081/DRT-200063553](https://doi.org/10.1081/DRT-200063553).

[12] A. Bassal, J. Vasseur, A. Lebert. Measurement of water activity above 100 °C. *Journal of Food Science*, N°2 (58). 1993 pp. 449-452. [doi: 10.1111/j.1365-2621.1993.tb04295.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb04295.x).

[13] Y. Jannot, A. Kanmogne, A. Talla, L. Monkam. "Experimental determination and modelling of water desorption isotherms of tropical woods: Afzelia, Ebony, Iroko, Moabi and Obeche". *Holz als RohundWerkstoff*. 2006 (64).pp.121-124. [doi: 10.1007/s00107-0051-2](https://doi.org/10.1007/s00107-0051-2).

[14] J. A. Nelder, R. Mead. "A Simplex Method for Function Minimization". *Computer Journal*, (7). 1965. pp. 308-313. [doi: 10.1093/comjnl/7.4.308](https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308).