

Isothermes de sorption de la latérite stabilisée au ciment et du composite ciment bois à l'aide d'une balance à suspension magnétique.

Aristide Comlan HOUNGAN^{1*}, Malahimi ANJORIN¹, Naïmoulaï CHITOU¹, Léandre Mathias VISSOH¹, Antoine VIANOU¹, Patrick PERRE²

¹Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (L.E.M.A), Ecole Polytechnique d'Abomey-calavi (E.P.A.C) 01BP 2009, Cotonou (Bénin)

²Laboratoire d'Etudes et Recherches sur le Matériau Bois (LERMAB), UMR1093 LERMAB-INRA/ENGREF/UHP 14, rue Girardet Nancy 54042 France

*(hounaris@yahoo.fr)

Résumé - Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'amélioration du confort hygrothermique dans le bâtiment au Bénin et porte en particulier sur l'établissement des isothermes de sorption de la latérite stabilisée au ciment et du composite ciment-bois pour deux niveaux de températures (30°C et 50°C). Les résultats et interprétations des isothermes de sorption ont permis de mettre en évidence une hystérésis de sorption dont la boucle diminue avec l'augmentation de la température. Enfin un lissage des isothermes par les modèles de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) et de BET (Brunauer, Emmett et Teller) a été proposé en utilisant l'algorithme du simplex.

Nomenclature

<i>M</i>	masses de l'échantillon, <i>kg</i>		
<i>X</i>	teneur en eau en base sèche, <i>kg.kg⁻¹</i>		<i>Indices et exposants</i>
<i>Hr</i>	humidité relative, %	<i>i</i>	indice
<i>C</i>	constante liée à la chaleur de sorption de la mono couche	<i>s</i>	sèche
<i>K</i>	constante liée à la chaleur de sorption de la multicouche	<i>mes</i>	mesurée
<i>n</i>	nombre de couches	<i>cal</i>	calculée
		<i>n_p</i>	nombre des points expérimentaux
		<i>e</i>	équilibre

1. Introduction

L'emploi des matériaux locaux de construction, comme la latérite stabilisée et le composite bois-ciment, permet à l'enveloppe du bâtiment, en plus de son rôle d'isolant, de réguler elle-même les températures et l'hygrométrie intérieure. De plus, ceci contribue à minimiser les consommations énergétiques du bâtiment. Matériau hygroscopique, la latérite stabilisée ou le composite ciment sciure de bois fonctionne comme un régulateur naturel de l'humidité dans nos maisons. Les mécanismes de transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux hygroscopiques doivent être compris et pris en compte lors de la conception du bâtiment afin de réaliser des constructions adéquates et durables.

Nous nous proposons, dans ce papier, d'établir les isothermes de sorption (adsorption et désorption) de la latérite stabilisée au ciment et du composite ciment-sciure de bois. L'étude a pour point de départ la présentation du dispositif expérimental des mesures de cinétiques de sorption, suivie de l'illustration des isothermes de sorption de ces matériaux. Un dernier volet prendra en compte le lissage des courbes de sorption par méthode inverse en utilisant l'algorithme du simplex. Une comparaison entre les paramètres donnés par le modèle de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) et le modèle de BET (Brunauer, Emmett et Teller) des isothermes de sorption obtenues a été effectuée.

2. Présentation du dispositif expérimental

Pour la mesure des cinétiques et des isothermes de sorption des matériaux poreux nous avons utilisé le dispositif expérimental (Figure1) qui a été conçu et réalisé au LERMAB. Le principe se base sur des pesées régulières de l'échantillon introduit dans une chambre à conditions climatiques (température, humidité relative) contrôlées à l'aide d'une balance électronique à suspension magnétique Rubotherm de 80g de capacité, d'une résolution de 10^{-5} g et peut travailler jusqu'à 250°C [1].

Cette balance permet d'effectuer des tarages réguliers en cours de mesure (via un logiciel d'acquisition) pour annuler les dérives sans toucher aux conditions expérimentales. Cet avantage favorise de longues acquisitions sans perte de précision (10^{-5} g), le réglage des conditions hydriques se fait grâce à deux contrôleurs de débit massique à contrôle électronique qui sont connectés à un générateur d'humidité. L'un des flux est composé d'air sec tandis que l'autre barbote dans l'eau à même température que celle de la chambre de mesure pour fournir de l'air saturé. Le mélange des deux fluides à des proportions choisies permet d'assurer les humidités désirées. Le mélange ainsi obtenu sera guidé par un tube isolé vers la chambre de mesure tout en obéissant au régime laminaire pour assurer la stabilité des mesures. La température du système est contrôlée par un thermocryostat, offrant la possibilité de réguler l'eau circulante (pompe de débit maximal = 18l/min) entre -25°C et 150°C.

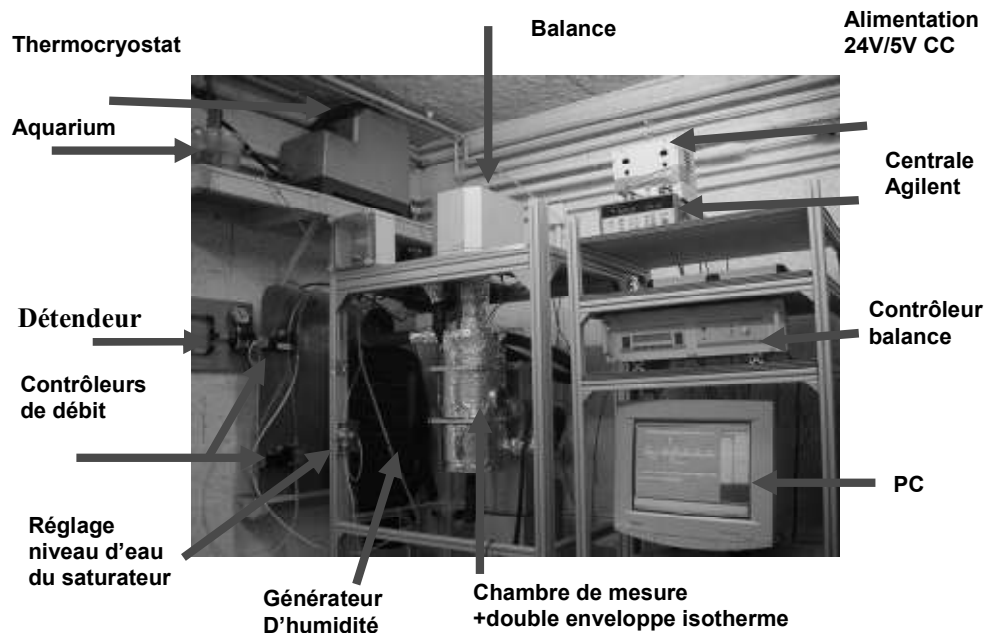


Figure1 : Photo du dispositif expérimental

Une isolation thermique de la chambre de mesure et du générateur d'air humide à l'aide d'une couche en mousse de polyméthacrylate de méthyle et une couche en mousse de polyuréthane a été effectuée pour assurer une stabilité thermique de $\pm 0,02^\circ\text{C}$. Un capteur Honeywell « 3602 C » est utilisé pour la mesure de la température et de l'humidité relative à l'intérieur de la chambre de mesure et un thermocouple type J pour le contrôle des conditions ambiantes. L'ensemble est commandé par un microordinateur pour la synchronisation entre les différents éléments et l'enregistrement réguliers des relevés.

Éprouvettes	Latérite stabilisée au ciment	Composite Ciment Bois
Dosage	Terre latéritique : 1900 kg/m ³ Dosage au ciment à 20 % Rapport E/C : 2,4 Latérite : 20 kg Ciment : 5 kg Eau : 12 kg	Rapport C/S : 1,14 [2] Rapport E/C: 1,5 Sciure: 330 kg /m ³ S : 8,8 kg Ciment CPJ 35 : 400 kg/m ³ C: 10 kg ; Eau: 1000 kg/m ³ ; E : 15 kg
Dimensions (mm)	20 x 20 x 5	20 x 20 x 5
Température (°C)	30-50	30-50
Humidité relative (%)	0-90	0-90

Tableau 1 : Eprouvettes et conditions hygrothermique des essais C : Ciment, S : sciure, E : Eau

3. Préparation des échantillons

Les échantillons de la latérite stabilisée au ciment et du composite ciment-bois sont découpés en section rectangulaire d'épaisseur 5 mm à l'aide d'une tronçonneuse.

Le tableau 1 ci-dessus présente les caractéristiques (dosage) des éprouvettes utilisées et les conditions hygrothermiques de mesure. La figure 2 montre la photo des échantillons testés.

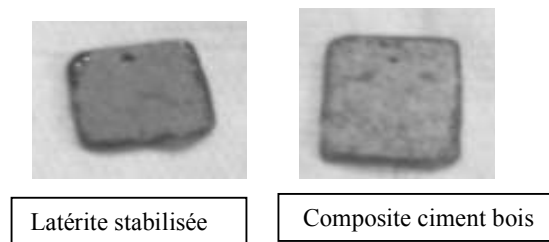


Figure 2 : Photo des échantillons instrumentés

4. Résultats et Interprétations

4.1. Les cinétiques de sorption

Les mesures expérimentales en régime transitoire nécessitent le suivi, au cours du temps, de la masse de l'échantillon préalablement équilibré au sein d'un environnement à humidité relative contrôlée et qui subit une variation brusque de cette dernière. Ainsi, afin d'établir les isothermes de sorption, il est nécessaire d'équilibrer initialement la latérite stabilisée ou le composite ciment- sciure de bois (Figure 3) à une humidité relative donnée (0 ou 90 %) dans la chambre de mesure et ensuite de soumettre chaque échantillon à une humidité relative plus élevée ou plus basse selon qu'on se trouve en processus d'adsorption ou de désorption.

La figure 3 présente la cinétique d'adsorption du composite ciment-bois à 30°C pour différents paliers d'humidité relative (0 %, 18 %, 36 %, 54 %, 72 %, 90%). On note sur cette courbe une parfaite concordance entre l'humidité théorique imposée et celle mesurée par le capteur Honeywell (HIH 3602-C). La température est très stable, ceci est un facteur nécessaire pour avoir des cinétiques de sorptions fiables. Nous constatons également qu'une durée minimale de 8 heures est suffisante pour stabiliser un échantillon de composite ciment bois et 10 heures pour la latérite stabilisée d'épaisseur 5mm. Il faut noter qu'au fur et à mesure que l'humidité relative augmente, le temps de stabilisation devient plus élevé (Figure 3). Ceci peut être expliqué par les phénomènes non-Fickiens [3] qui sont dus au comportement des macromolécules des parois du matériau. Pour de fortes teneurs en eau, une réorganisation moléculaire est nécessaire pour libérer les sites de sorption. Ce phénomène est

aussi présent sur la cinétique de sorption du composite ciment- sciure de bois. De ces cinétiques, il est possible d'établir les isothermes de sorption de ces matériaux.

4.2. Les isothermes de sorption

Nous avons calculé la moyenne des teneurs en eau à l'équilibre pour chaque humidité du cycle d'absorption et de désorption et nous les avons représentées aux figures 4, 5 et 6.

$$Xe (\%) = \frac{M(t) - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

L'analyse de la figure 6 montre que pour une température de sorption donnée, le composite ciment-bois est plus hygroscopique que la latérite stabilisée au ciment car la teneur en eau fixée à l'équilibre par ce matériau est plus élevée que celle la latérite, ce qui explique le fait que son isotherme de sorption est au dessus de celle du matériau latérite. Nos résultats confirment que les isothermes d'adsorption ne se superposent pas, en général, avec les isothermes de désorption : le phénomène de sorption présente une hystérésis. Ceci reste valable pour les deux matériaux étudiés (Figure 4 et 5).

L'hystérésis de sorption peut être expliquée par l'effet de l'histoire hydrique sur la conformation des clusters des molécules d'eau condensées dans les microporosités du matériau. Nous constatons que quand la température augmente, la boucle d'hystérésis diminue (Figure 5). La boucle d'hystérésis est plus grande chez le composite ciment bois (Figure 4). Ce résultat est en accord avec la littérature [4] et peut être expliqué par la présence de microporosité dans la matrice cimentaire qui a une grande affinité pour l'eau qui retient une quantité plus élevée de molécules pendant la phase de désorption.

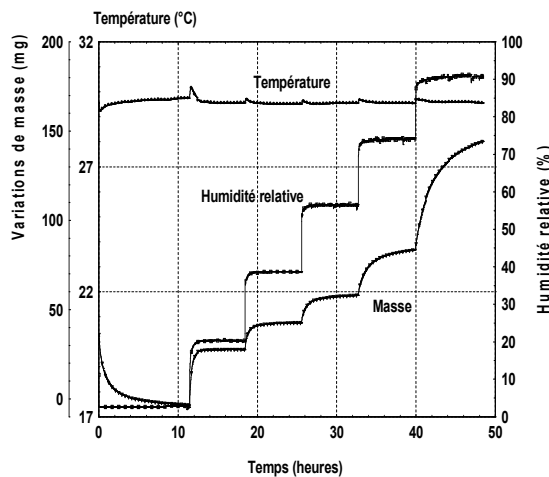


Figure 3 : Cinétique de sorption du CCB à 30 °C

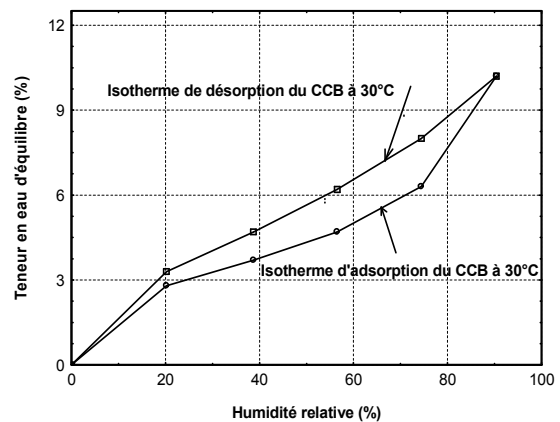


Figure 4 : Isotherme de sorption du CCB à 30 °C

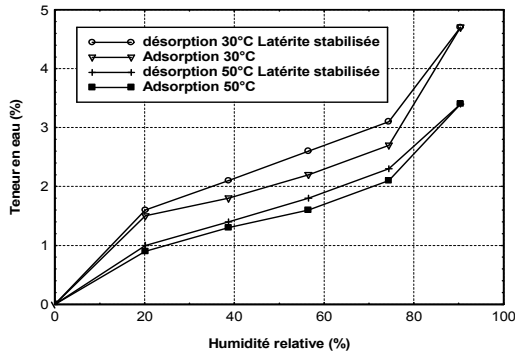


Figure 5 : Isothermes de sorption de la latérite stabilisée au ciment à 30°C et à 50°C

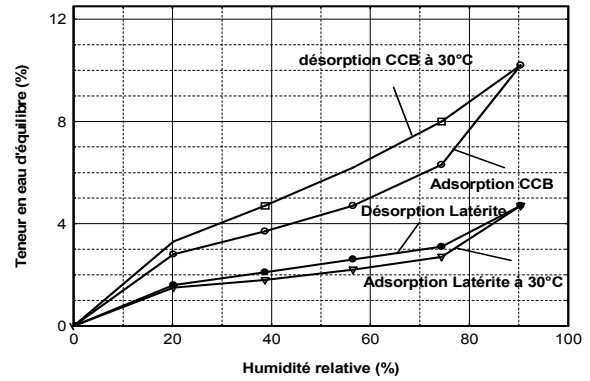


Figure 6 : Isothermes de sorption du Composite Ciment Bois et de la latérite stabilisée à 30°C

4.3. Le 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 BET (zone 1 : $Hr \leq 30\%$, dans cette zone les premières molécules d'eau adsorbées se fixent sur les groupements hydroxyles de la cellulose pour former la monocouche ; zone 2 : $30\% \leq Hr \leq 70\%$, dans cette zone les molécules d'eau se superposent pour former des couches d'eau empilées dans le matériau : on parle d'adsorption multicouches), le modèle Langmuir (zone 1), et ceux qui s'intéressent par la totalité de la courbe tels que les modèles de GAB et d'Oswin [4]. Nous proposons ci-dessous d'utiliser le modèle de GAB et celui de BET pour le lissage des isothermes d'adsorption et de désorption de la latérite stabilisée et du composite ciment-sciure de bois pour identifier leurs paramètres physiques. Le tableau 2 présente les équations paramétrées de chacun des modèles étudiés.

Modèles		Paramètres	Equations
GAB		X_0 (%)	$X = \frac{X_0 Hr CK}{(1 - Hr K)(1 + (C - 1) K Hr)}$
		C	
		K	
BET	ZONE 1	X_0	$X = \frac{X_0 Hr C}{(1 - Hr)(1 + (C - 1) Hr)}$
		C	
	ZONE 2	X_0 (%)	$X = X_0 \frac{CHr}{1 - Hr} \frac{1 - (n + 1)Hr^n + nHr^{n+1}}{1 + (C - 1)Hr - CHr^{n+1}}$
		C	
		n	

Tableau 2 : Présentation des modèles étudiés

Pour la détermination des paramètres X_0 , C, K, n les mieux représentatifs de nos courbes expérimentaux, nous avons utilisé un algorithme d'identification permettant de minimiser la fonction de l'équation (2) en utilisant la méthode de simplex [5],

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

Le coefficient de détermination R^2 et les paramètres de GAB et de BET pour la latérite et le composite ciment-sciure de teck en adsorption et désorption pour les températures 30 et 50°C sont consignés dans le Tableau 3. L'ajustement des points expérimentaux obtenus en adsorption et en désorption à la température de 30°C et 50°C pour la latérite stabilisée et pour le composite ciment-sciure par les modèles de GAB et de BET est statistiquement satisfaisant

($R^2 = 0,99$). Nous constatons que la teneur en eau de la monocouche X_0 est plus élevée en désorption qu'en adsorption, ce qui met en évidence l'hystérésis classique pour ces deux matériaux. Pour le modèle de GAB et de BET, nous notons la réduction la teneur en eau de la monocouche avec l'augmentation de la température (Tableau 3). Ceci entraîne la réduction des sites actifs de sorption notamment pour la latérite stabilisée. Les courbes prédites par le modèle de GAB coïncident avec les points expérimentaux dans le domaine d'humidité relative allant de 0 – 90% alors que le modèle de BET ne prend pas en compte toute l'isotherme de sorption pour le lissage (humidité relative inférieure à 70%).

Modèles	Paramètres	Adsorption				Désorption				
		Latérite stabilisée		CCB		Latérite stabilisée		CCB		
		30 °C	50 °C	30 °C	50 °C	30 °C	50 °C	30 °C	50 °C	
GAB	X_0 (%)	<i>1,1</i>	<i>0,8</i>	<i>2,4</i>	<i>2,6</i>	<i>1,4</i>	<i>0,9</i>	<i>4,5</i>	<i>4,3</i>	
	C	250	250	277	249	250	250	11	14	
	K	0,83	0,84	0,84	0,88	0,77	0,79	0,64	0,78	
	R^2	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	
BET	<i>Zone 1</i>	X_0 (%)	<i>1,1</i>	<i>0,7</i>	<i>2,2</i>	<i>2,6</i>	<i>1,3</i>	<i>0,8</i>	<i>2,8</i>	<i>3,1</i>
		C	250	250	277	277	250	250	277	277
		R^2	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	<i>Zone 2</i>	X_0 (%)	<i>1,1</i>	<i>0,8</i>	<i>2,2</i>	<i>2,6</i>	<i>1,3</i>	<i>0,87</i>	<i>2,9</i>	<i>3,3</i>
		C	249	243	249	246	249	243	245	244
		n	4,8	5,8	6,5	6,5	4,5	5,8	6,2	7,5
		R^2	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

Tableau 3 : Les paramètres estimés du modèle de GAB et du modèle de BET

5. Conclusion

Les courbes d'adsorption et de désorption de la latérite stabilisée et du composite ciment bois ont été déterminées expérimentalement pour les deux niveaux de températures de 30°C et 50°C à l'aide d'un dispositif se basant sur la méthode gravimétrique conçu et réalisé au LERMAB. Partant des cinétiques de sorption de ces matériaux nous avons pu extraire leur isotherme de sorption et nous avons mis en évidence une hystérésis causée par l'effet de l'histoire hydrique sur les relations eau/matériau dans le domaine hygroscopique. Une comparaison entre les paramètres donnés par le modèle de GAB et BET des isothermes de sorption obtenues a été effectuée.

Références

- [1] 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), 515-521.
- [2] A. Tchéouali, A. Foudjet, A. Vianou, V. Gbaguidi, Vers les planchers légers à partir d'entrevous en composite ciment bois, *J. Rech. Univ. Lomé, (Togo)*. 6(2) (2002), 121-129.
- [3] P. Perré, A. C. Houngan, P. Jacquin, Mass diffusivity of beech determined in unsteady-state using a magnetic suspension balance, *Drying Technology.*, 25(7-8) (2007), 1341-1347.
- [4] V. Baroghel-Bouny, Water sorption experiments on hardened cementitious materials. Part I: Essential tool for analysis of hypothermal behaviour and its relation to pore structure. *Cement and Concrete Research*. 37(2007), 414-437.
- [5] J. A. Nelder, R. Mead, A Simplex Method for Function Minimization, *Computer Journal*. 7(1965), 308-313.