



**HAL**  
open science

## Méthodologie de caractérisation hydrique d'une bande de convoyeur en matériau composite

Rawdha Kessentini, Olga Klinkova, Hanen Jrad, Imad Tawfiq, Mohamed Haddar

► **To cite this version:**

Rawdha Kessentini, Olga Klinkova, Hanen Jrad, Imad Tawfiq, Mohamed Haddar. Méthodologie de caractérisation hydrique d'une bande de convoyeur en matériau composite. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623687

**HAL Id: hal-01623687**

**<https://hal.science/hal-01623687>**

Submitted on 25 Oct 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Méthodologie de caractérisation hydrique d'une bande de convoyeur en matériau composite**

### ***Humid characterization methodology of conveyor belt composite material***

**Rawdha KESSENTINI<sup>1,2</sup>, Olga KLINKOVA<sup>1</sup>, Hanen JRAD<sup>2</sup>, Imad TAWFIQ<sup>1</sup> Mohamed HADDAR<sup>2</sup>**

1 : Laboratoire QUARTZ EA7393, Institut Supérieur de Mécanique de Paris (SUPMECA), 3 rue Fernand Hainaut, 93407 Saint Ouen Cedex, Paris, France

e-mail : kessentinirawdha@yahoo.fr  
olga.klinkova@supmeca.fr  
imad.tawfiq@supmeca.fr

2 : Laboratoire Modélisation, Mécanique et Productique (LA2MP), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), BP N° 1173, Sfax, 3038, Tunisie.  
e-mail : hanen.j@gmail.com  
mohamed.haddar@enis.rnu.tn

### **Résumé**

Le convoyeur à bande est le mode de transport le plus utilisé dans les industries des mines, entre autres, la bande qui constitue l'élément productif de ce système de transport est exposée aux différentes sollicitations d'origine mécanique tels que la traction, les chocs, les vibrations, etc., ainsi qu'aux conditions environnementales (thermique, UV, humidité). Les sollicitations mécaniques couplées avec le vieillissement hygrothermique peuvent nuire au bon fonctionnement et provoquer des dommages irréversibles de la bande. Dans ce contexte, une méthodologie expérimentale est présentée à fin de déterminer les variations dimensionnelles dues à l'exposition de la bande à des milieux humides. La déformation hydrique est liée à la différence de teneur en humidité par un coefficient d'expansion hydrique. L'objectif de ce travail est de mesurer le coefficient d'expansion hydrique de la bande en fonction de la teneur en humidité. Ce coefficient est utilisé pour calculer les déformations ou contraintes auxquelles est soumise la bande en matériau composite lorsque sa teneur en humidité varie. La détermination du coefficient de diffusion par l'essai gravimétrique permet d'implanter la loi de diffusion et de prédire le temps de saturation de la bande exposée à un milieu humide. En fin, la détermination des paramètres hydriques et de diffusion permet d'enrichir le modèle numérique de prédiction de la durée de vie de la bande. La structure composite utilisée dans ce travail est une bande en caoutchouc renforcée par 4 plis de tissu de polyester (UP)-polyamide (PA).

### **Abstract**

The belt conveyor is the most widely used mode of transport in the mining industries. In fact, the belt which constitutes the productive element of this transport system is exposed to different loading conditions: mechanical load such as traction, shocks, vibration, and environmental aging (thermal, UV, humidity). Mechanical stress coupled with hygrothermal aging can disturb the normal operation and causes irreversible damage of the belt. Experimental methodology have been undertaken to characterise the diffusion of a rubber fiber reinforced composite. The aim of this work is to quantify the coefficient of swelling expansion of the belt as a function of the moisture content. This coefficient is used to evaluate the hygroscopic deformations produced in structural composite material when its moisture content varies. The determination of the diffusion coefficient by the gravimetric test allows to implement the diffusion law and to predict the saturation time of the belt exposed to a humid environment. The composite structure used in this work is a rubber reinforced by 4 plies of polyester (UP) –polyamide (PA) fabric.

**Mots Clés :** Les bandes de convoyeur, expansion hydrique, méthodologie expérimentale, durée de vie, polyester-polyamide

**Keywords:** Belt, swelling expansion, experimental methodology, life time, polyester-polyamide

## 1. Introduction

Le convoyeur à bande est le mode de transport qui répond aux nombreux critères de choix ; il favorise la solution présentant le meilleur rapport coût/efficacité en fonction du volume de produits transporté, du matériel et de sa maintenance. Pour optimiser le fonctionnement des convoyeurs, la bande en matériau composite structurale qui est en contact direct avec le système d'entraînement et la marchandise doit s'adapter aux conditions opérationnelles. Généralement les bandes sont distinguées selon leurs natures. Elles peuvent être métallique ou en caoutchouc renforcée (1 à 7 plis). Ces bandes permettent de transporter des charges importantes sur des distances de plusieurs kilomètres. Elles sont généralement montées sur les châssis du convoyeur sous forme de plusieurs tronçons assemblés. Elles doivent être ajustées entre deux tambours d'entraînement et bien centrées sur les rouleaux rotatifs des châssis. Pour ces raisons, il faut prévoir toute variation dimensionnelle de la bande soit pour assurer le centrage ou pour contrôler la durabilité des joints d'assemblage des tronçons.

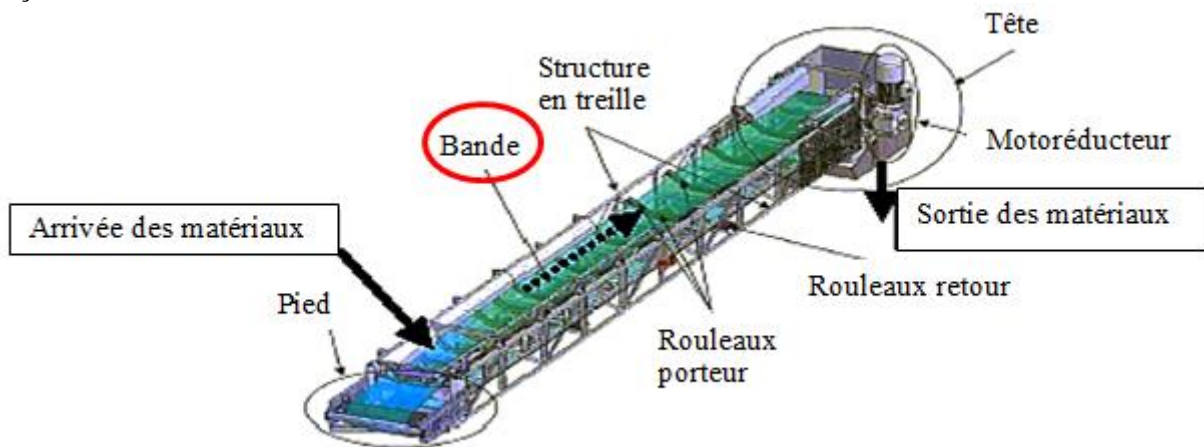


Fig. 1. Structure d'un convoyeur à bande

Afin de recevoir le produit à transporter et transmettre la force nécessaire pour déplacer les charges, les bandes doivent notamment supporter des efforts de traction nécessaires à son entraînement, des efforts dynamiques aléatoires dus à l'impact. En revanche, les variations climatiques importantes peuvent contribuer à l'endommagement de la bande en jouant un rôle prépondérant sur la durée de vie, comme ils peuvent introduire des variations dimensionnelles néfastes pour le maintien de l'ajustement de la bande. Cependant ces bandes doivent aussi s'adapter aux conditions climatiques au cours de son fonctionnement. Dans ce contexte, de nombreuses études expérimentales sont élaborées afin d'évaluer les contraintes hygroscopiques induites dans les matériaux composites. La méthode la plus utilisée consiste à déterminer les variations de masse de l'échantillon avant et pendant l'exposition à l'humidité [1-2]. Pour limiter l'incertitude de mesures suite au séchage superficiel de l'éprouvette, Tsai et al. [3] ont développé une méthode en conservant les éprouvettes dans leur environnement durant l'essai.

Une autre manière de caractérisation de la diffusion d'humidité sans sortir l'éprouvette d'enceinte, proposée par Mulle et Collombet [4] consiste à insérer des capteurs à fibres optiques (réseaux de Bragg) à cœur du composite. L'inconvénient de cette technique intrusive réside dans la difficulté de placement des capteurs. Cette étude a été complétée numériquement par [5] en considérant que le matériau suit la loi de Fick. En revanche, afin d'établir une démarche expérimentale appropriée aux bandes de convoyeur à base de caoutchouc renforcé, les méthodes existantes de caractérisation hydrique sont peu développées et ne permettent pas facilement le transfert à d'autres types de matériau. Le présent travail décrit une méthodologie expérimentale permettant de déterminer le comportement d'expansion hydrique des bandes en matériau composite structurale en fonction de leur teneur en humidité. Différents paliers d'humidité relative jusqu'à l'immersion sont envisagés

dans cette étude. La caractérisation hydrique permet d'enrichir les modèles de prédiction du comportement hydrique de la bande en caoutchouc renforcé par 4 plis de tissu en taffetas polyester polyamide UP/PA. La structure étudiée est orthotrope dans le plan du pli.

## 2. Matériaux et méthodes

Les caractéristiques d'une bande transporteuse dépendent de l'architecture et la nature de sa carcasse, de la qualité des revêtements, de nombre de pli et de type de jonction lors de l'installation de la bande. En effet, la carcasse a comme fonctions de résister aux efforts d'entraînement de la bande (la résistance à la traction) jusqu'à la rupture, de supporter les chocs au point de chargement, de résister à la déchirure dus aux objets tranchants et d'assurer la bonne tenue dans la mise en auge. La carcasse est protégée par des substrats en caoutchouc. C'est ce qu'on appelle communément le «revêtements». Le rôle du revêtement en caoutchouc est de protéger la carcasse contre les dommages. Il existe plusieurs types ou «qualités» de revêtement, dont chacun est conçu pour contenir des propriétés spécifiques. Les caractéristiques de qualité du type du revêtement, déterminent en grande partie la capacité de la bande à résister à des effets nocifs tels que l'usure causée par l'abrasion, le déchirement, la déchirure, la chaleur, le froid et les nombreux autres effets potentiellement dangereux causés par le feu, l'humidité, les réactions chimiques. La spécification et la qualité du revêtement dépendent en grande partie de la nature des matériaux que la bande doit transporter et des conditions de fonctionnement environnementales.

La bande transporteuse étudiée est de type DELTA [9], elle est composée de 4 plis de tissu de fibres polyester-polyamide (UP-PA) (Fig. 2a), le tissu de pli est de type taffetas équilibré. Les 4 plis de tissu sont collés par des couches fines d'adhésif en caoutchouc et protégés par des revêtements inférieur et supérieur en caoutchouc de type B [9]. Les paramètres géométriques et mécanique des éléments constituant la structure de la bande sont présentés dans le tableau 1. Ce type de bande est couramment utilisé dans le transport des carrières.

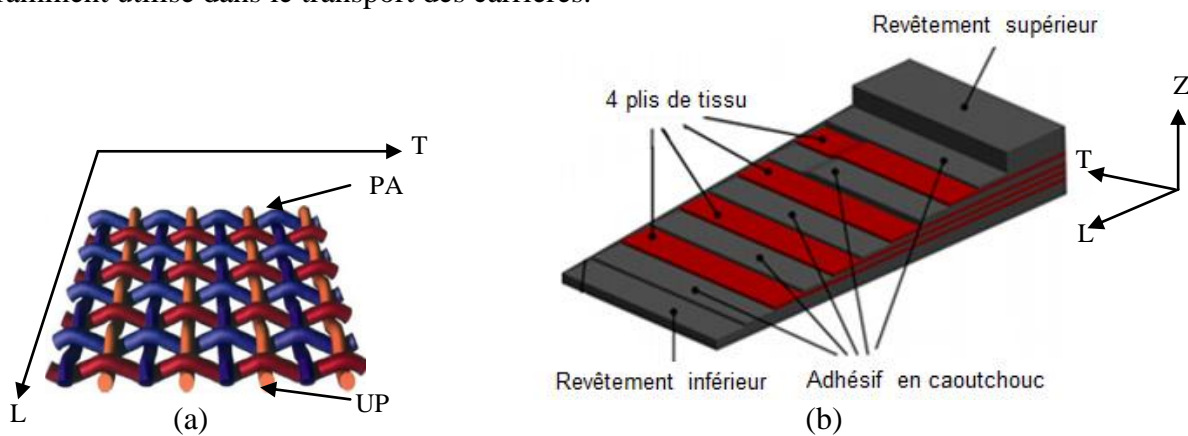


Fig. 2. (a) Architecture de tissu Taffetas e UP-PA. (b) La structure d'une bande à convoyeur

	Epaisseur (mm)	Résistance à la rupture Rm (MPa)	Allongement à la rupture A%
Revêtement supérieur	4	14	400
Tissu UP	1	80	10
Adhésif en caoutchouc	0.2	-	-
Revêtement inférieur	2	14	400

Tab. 1. Caractéristiques de la bande DELTA.

## 2.1. Principe de la caractérisation hydrique

Le coefficient d'expansion hydrique est le rapport entre la différence de la déformation hydrique et la variation de la teneur en humidité. Il est calculé en reliant la variation de longueur d'une éprouvette engendré par une variation définie de la teneur en humidité. La variation de longueur est mesurée à des intervalles de temps réduits. L'expansion hydrique est supposé achevée lorsque le graphe des mesures atteint une valeur constante (figure 3). La saturation de l'éprouvette en immersion est supposé atteinte lorsque la variation de la masse est inférieure à 0.1%. Les deux plages d'essais (a) et (b) de la figure 3 correspondent à la plage d'humidité hygroscopique et la plage d'humidité hyper hygroscopique respectivement. L'humidité relative pour la plage (a) est entre 30% HR et 95%HR. La plage hyper hygroscopique correspond à l'immersion totale.

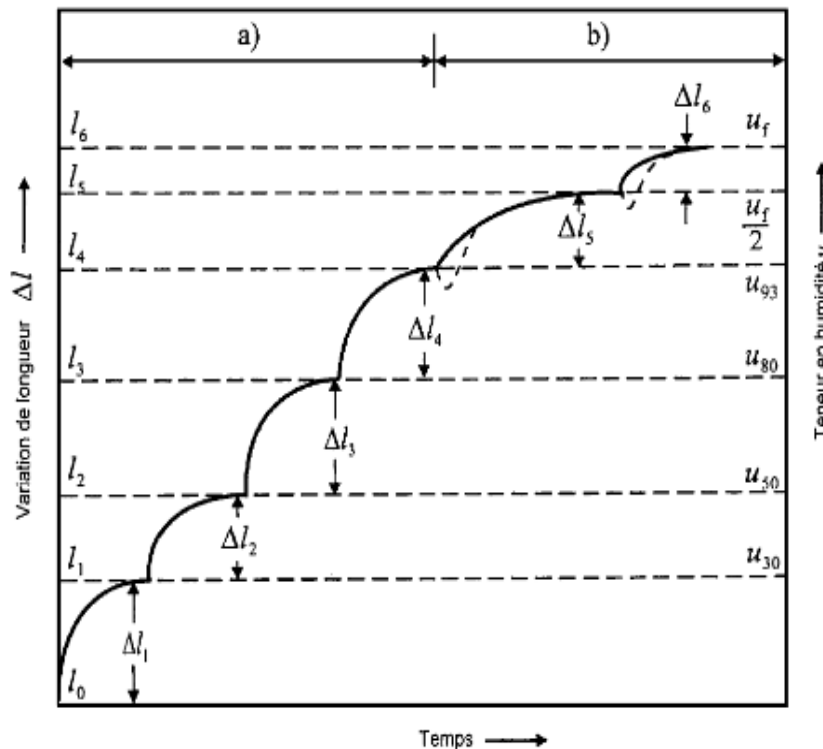


Fig. 3. Principe du graphe de mesures des variations de longueur hydriques entre les paliers successifs de teneur en humidité.

## 2.1 Protocole expérimental

La cinétique de diffusion a été étudiée dans le sens longitudinal (L) et transversal (T) de la bande en composite structural. Deux séries d'éprouvettes sont découpées dans les deux directions de l'orthotrope selon les spécifications de la norme NF13009 pour pouvoir effectuer les mesures dans les deux directions. Pour les essais en humidité hygroscopique, les échantillons ont été placés dans une chambre climatique EXCAL 1423 HA capable de produire différents paliers d'humidité relative compris entre 40%HR et 80% HR à une température régulée de  $T = (23 \pm 1) ^\circ\text{C}$ . Pour l'essai hyper hygroscopique, les échantillons sont immergés dans l'eau distillée et placés dans un four réglé à  $T = 50^\circ\text{C}$ . La température de la pièce a été contrôlée avec un thermomètre précis à  $\pm 0,4^\circ\text{C}$ . Les éprouvettes d'essai sont des parallélépipèdes de dimensions  $10 \times 200 \times 20 \text{ mm}^3$  dont la plus grande dimension est utilisée comme axe de mesure.

Le suivi gravimétrique pour l'essai d'immersion a permis de tracer la prise de masse en fonction de la racine carrée du temps (équation 1). Les mesures de masse ont été réalisées sur une balance de précision ( $\pm 0.1 \text{ mg}$ ).

$$M(t)(\%) = \frac{m(t) - m_0(t_0)}{m_0(t_0)} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

L'essai de gonflement a été réalisé pour calculer le coefficient d'expansion hydrique  $\beta$  en reliant la variation de longueur mesurée d'une éprouvette, causée par une variation défini de la prise de masse. La variation de longueur est mesurée dans le sens de la plus grande dimension des éprouvettes entre deux instants  $t$  et  $t_0$ . A chaque condition d'humidité relative, les dimensions initiales de chaque éprouvette ont été mesurées à sec. Ensuite des mesures ont été réalisées à intervalle de temps régulier. 5 mesures au pied à coulisse précis à 0,01 mm ont été prises dans le sens longitudinal des éprouvettes prises dans les deux sens du tissu. Le taux de gonflement est déterminé par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{hygro}(\%) = \frac{l(t) - l_0}{l_0} \times 100 \quad (\text{Eq.2})$$

Avec  $\varepsilon_{hygro}$  correspond à la déformation hygroscopique de l'éprouvette,  $l(t)$  la longueur de l'éprouvette à l'instant  $t$  et  $l_0$  sa longueur initiale (à l'instant  $t_0$ ).

En fin, La relation reliant la déformation due au gonflement hygroscopique au coefficient de dilatation hygroscopique est la suivante :

$$\varepsilon_{hygro} = \beta \cdot \Delta u \quad (\text{Eq.3})$$

Avec  $\beta$  le coefficient d'expansion hydrique et  $\Delta u$  est la variation de la teneur en humidité dans le matériau au cours de l'expansion hygroscopique.

### 3. Etude de la diffusion d'humidité dans la bande à carcasse UP-PA

#### 3.1 Détermination du modèle de diffusion

Le composite structurale de la bande suit une cinétique de diffusion de type Fickienne : évolution linéaire de la teneur en humidité en fonction de la racine carré du temps puis atteinte d'un plateau de saturation. L'expression traduisant le modèle de Fick dans le cas de plaques de dimensions planes infinies devant leur épaisseur (cas unidirectionnelle) permet de résoudre le problème de la modélisation analytique de la cinétique de diffusion, elle est de la forme [8] :

$$Mt = M_\infty \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D \cdot t}{e^2}\right) \right]$$

(Eq.4)

Avec  $Mt$ , le gain de masse à l'instant  $t$ ,  $M_\infty$  le taux d'absorption du matériau à l'instant de saturation,  $D$  le coefficient de diffusion et  $e$  l'épaisseur de l'échantillon.

Le coefficient  $D$  est calculé à partir de l'équation (4) et les données de l'essai gravimétrique, la variation de la teneur en humidité  $\Delta u$  est calculée comme suit [8].

$$\Delta u = 1 - \frac{4}{\pi} \left( u_0 + \sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{(2N+1)} \sin\left(\frac{(2N+1)\pi Z}{h_i}\right) \exp\left[-\frac{(2N+1)^2 \pi^2 D_i \cdot t}{h_i^2}\right] \right)$$

(Eq.5)

Avec  $u_0$  est le taux de saturation atteinte pour chaque palier d'humidité relative.

La détermination du coefficient de diffusion  $D$  et du taux de saturation sert ensuite à enrichir le modèle de Fick. Le modèle prédictif du comportement de diffusion est développé en utilisant le code Matlab. La figure 4 présente la variation de la concentration normalisé de la teneur en

humidité en fonction de l'épaisseur des éprouvettes pour 1, 2, 4, 6, 8 et 12 semaine d'absorption en immersion.

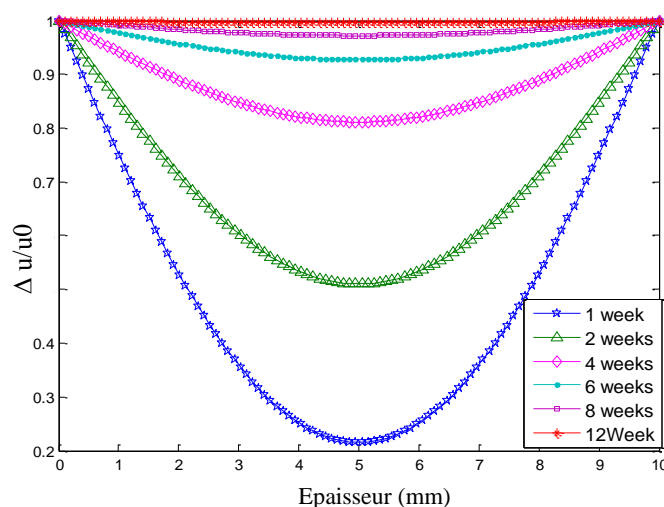


Fig. 4. La variation de la teneur en eau normalisé jusqu'à la saturation en immersion de la bande.

La saturation en immersion du caoutchouc renforcé par des fibres polyester polyamide est effectuée dans 12 semaines en appliquant la loi de Fick (figure4). En reliant la variation de la teneur en eau à la variation de la déformation hydrique, le coefficient  $\beta$  dans le cas de l'immersion de la bande est égal à 0.112 %.

#### 4. Conclusion

Cette étude portant sur la description de la méthodologie expérimentale de caractérisation hydrique d'une bande de convoyeur en matériau composite a permis d'appréhender le comportement diffusif du matériau suite à des sollicitations hydriques. Il a été montré que le matériau suit une cinétique de diffusion fickienne dans les différentes conditions d'exposition humide. En outre, les résultats de l'essai gravimétrique montrent que la capacité maximale d'absorption du caoutchouc renforcé par un tissu taffetas UP-PA est supérieure à celle du caoutchouc non renforcé. Ceci est directement lié au caractère hydrophile des fibres polyester - polyamide qui conduit le phénomène de diffusion au sein de la bande. A travers cette étude, il semblerait que la durabilité de la bande suite à des sollicitations hygroscopiques est contrôlée non plus par la matrice en caoutchouc mais par les tissus fibreux.

#### Références

- [1] B. Mortaigne. « Vieillissement des composites-évolution des propriétés et modélisation », Technique de l'ingénieur. COR113 V1, 2005
- [2] L. Zuda, P. Bayer, P. Rovnaník and R. Černý, «Mechanical and hydric properties of alkali-activated aluminosilicate composite with electrical porcelain aggregates», Cement and Concrete Composites, Vol 30, pp. 266 – 273, 2008
- [3] C.L. Tsai, I.T Hung and T.W. Chang, «Characterization of principal diffusivities of composites by suspension method», Composite Science and Technology, Vol. 66, No5, pp. 2837-2843, 2006
- [4] M. Mulle, F. Collombet, « Mesures à coeur par réseaux de Bragg pour caractériser la diffusion d'humidité dans les composites», JNC 16, Toulouse, Vol 10, pp. 2-20, 2009
- [5] J. Fajoui, M. Mulle, S. Freour, F. Jacquemin, F. Collombet « Etude numérique de la diffusion d'humidité dans les matériaux composites instrumentés par des fibres optiques à réseaux de Bragg» JNC 17, Poitiers, 2011
- [6] Norme NF EN ISO 12571 :2013 :10 : performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment-détermination des propriétés d'absorption hygroscopique.
- [7] Norme NF EN 13009 : 2000-06 : performance hygrothermique des matériaux et produit pour le bâtiment- détermination du coefficient d'expansion hydrique.
- [8] Crank, J. The mathematics of diffusion, Clarendon Press, Oxford (1975).
- [9] Depreux catalogue. Bandes résistantes à l'abrasion aux impacts et aux chocs