

Effet de la nature et des caractéristiques du milieu d'immersion sur le comportement hygrothermique des composites polyester/fibre de verre

M. HARCHAY, H. BEN DALY

Laboratoire de Génie Mécanique, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Avenue Ibn EL Jazzar , 5019 Monastir, Tunisie

Résumé :

Dans ce travail, nous caractérisons les effets de la nature du milieu d'immersion (eau distillée/eau de mer), de sa température, de sa vitesse d'écoulement et de sa direction par rapport à la surface des échantillons exposés sur la cinétique d'absorption d'humidité dans le matériau composite polyester/fibre de verre. Les résultats obtenus montrent que, généralement, l'eau distillée s'infiltrer beaucoup plus facilement dans ce matériau que l'eau de mer, quelque soit les conditions d'immersion. Cela a été attribué à la présence des cristaux de sel dans l'eau de mer qui, apparemment, retardent la diffusion des molécules d'eau dans le matériau composite. De plus, nous avons remarqué que pour une faible température d'immersion (25°C), les courbes d'absorption d'humidité de matériau composite utilisé dans ce travail sont caractérisées par une croissance rapide et linéaire de la quantité d'humidité absorbée (D_x), suivie d'un plateau de saturation (m_m). Les caractéristiques de ces courbes changent beaucoup avec la variation de la température d'immersion et la vitesse d'écoulement de l'eau. En effet, l'augmentation de ces deux paramètres augmente considérablement D_x et m_m . Lorsque la température d'immersion devient relativement importante (65°C), nous avons remarqué, après le processus de saturation, une diminution de la masse des échantillons exposés, surtout pour des vitesses d'écoulement de l'eau relativement importantes. Cette chute de masse témoigne de la présence d'un phénomène de dégradation au sein de ces échantillons. L'effet de la direction d'écoulement par rapport à la surface de l'échantillon exposé a montré que, généralement, un échantillon orienté perpendiculairement à cette direction absorbe plus d'humidité qu'un échantillon orienté dans le sens parallèle.

Abstract:

The aim of present study is to investigate the effect of the nature of the immersion environment (distilled water/ sea water), its temperature, velocity and direction with respect to the external surfaces of the exposed specimen on the humidity absorption process in glass fiber reinforced polyester composite. The obtained results indicate that the distilled water diffuses in the composite used in this study much more rapidly than the sea water. This behavior is explained by the fact that the presence of large salt molecules in sea water (notably sodium chloride) slows the diffusion process of water molecules into the matrix of the composite materials, resulting therefore in a lower absorption kinetic parameters. At a low immersion temperature (25°C), the water absorption process was found to be characterized by a rapid linear take-off (D_x), followed by a stabilization (m_m), where a constant and a maximum water content seemed to be reached. Both (D_x) and (m_m) depend on the water's temperature, velocity and direction with respect to the external surface of the exposed specimen. At a high temperature immersion (65°C), and after the saturation process, a mass loss of the exposed specimen has been noted. The extend of such loss increases as the water's velocity increases. Results obtained in this study have been also indicated that specimens oriented perpendicular to the water's flow direction absorb much more humidity than those oriented parallel to that direction.

Mots clefs: composite, humidité, dynamique, diffusion.

1 Introduction

Du fait des nombreux avantages qu'offrent les matériaux composites, et en particulier ceux à base de résine polyester renforcés de fibres de verre, par rapport aux matériaux métalliques conventionnels, leurs utilisations comme matériaux de structure ne cesse d'augmenter et cela dans diverses applications tel que l'aéronautique, le transport de l'eau, le naval...etc. L'handicape majeur de ces matériaux cependant est qu'ils absorbent une quantité significative d'humidité lorsqu'ils sont exposés à des conditions hygrothermiques très sévères. Cela va considérablement affecter leurs diverses propriétés mécaniques et physiques.

Pour prédire la quantité d'humidité absorbée par une plaque plane d'épaisseur (h) et possédant une surface d'exposition suffisamment importante, Shen et Springer [1] ont appliqué les lois de Fick et ont proposé la relation suivante :

$$G = \frac{m - m_i}{m_m - m_i} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\exp\left[-(2j+1)^2 \pi^2 \left(\frac{D_x t}{h^2}\right)\right]}{(2j+1)^2} \quad (1)$$

Avec m_i est la masse d'humidité initiale (avant vieillissement) présente dans le matériau exposé, m_m est la masse d'humidité à la saturation, c'est-à-dire lorsque le matériau est complètement en équilibre avec le milieu environnant et D_x est le coefficient de diffusion qui peut être déterminé à partir de la pente de la partie linéaire de la courbe de gain de poids, en utilisant la relation suivante :

$$D_x = \pi \left(\frac{h}{4m_m} \right)^2 \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (2)$$

Où M_1 et M_2 sont les prises d'humidité aux instants t_1 et t_2 respectivement.

Selon notre recherche bibliographique, la cinétique d'absorption d'humidité dans les matériaux composites est généralement caractérisée lorsque les milieux d'immersion sont statiques (stagnants), par rapport aux surfaces des échantillons exposés. Cependant, dans plusieurs autres cas, ce milieu n'est plus statique, mais il a un mouvement quelconque (dynamique) par rapport aux surfaces de ces échantillons. Dans ce travail, on se propose de caractériser les effets, de la température du milieu d'immersion (eau distillée/eau de mer), de sa vitesse et de son orientation par rapport aux surfaces des échantillons exposées sur la cinétique d'absorption d'humidité des matériaux composites polyester/fibre de verre.

2 Protocole expérimental

Le matériau composite utilisé dans ce travail est le polyester/fibre de verre contenant 20% des charges d'argile ASP 400 et 15% des additifs thermoplastiques LPA. Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont résumées dans la référence [2]. Des échantillons de dimensions 20*8*6.3 mm³ ont été découpés à partir de ce matériau pour être exposés dans différents milieux d'humidification. Les conditions d'exposition sont résumées dans le tableau suivant :

TAB. 1 – Les conditions d'exposition

Températures du milieu d'immersion	25°C, 45°C, 65°C
Milieu d'immersion	Eau distillée, eau de mer
Directions d'écoulement de l'eau	0° (parallèle), 90°(perpendiculaire)
Vitesses d'écoulement de l'eau	0.018 Km/h, 0.027 Km/h, 0.038 Km/h, 5.6 Km/h, 8.15 Km/h, 11.5 Km/h

Pour les conditions d'exposition dynamiques (vitesses d'écoulement par rapport à la surface des échantillons exposés non nulle), un montage expérimental a été développé. Les caractéristiques de ce montage sont décrites dans la référence [3].

Après un temps d'exposition dans un milieu statique ou dynamique, les échantillons exposés ont été retirés du montage d'humidification et leurs masses $M(t)$ ont été déterminées en utilisant une balance électronique de précision égale à 10⁻⁴g. Le gain d'humidité $H(t)$ absorbée par ces échantillons est déterminé en utilisant la relation suivante :

$$H(t) = \frac{M(t) - M_0}{M_0} * 100 \quad (3)$$

La variation de $H(t)$ en fonction de $(\frac{\sqrt{t}}{h})$ a été comparé à celle déterminée théoriquement en utilisant la relation (1).

3 Résultats et discussion

La figure 1 présente la variation de degré d'humidité absorbée en fonction de la racine carrée de temps d'immersion, normalisé par rapport à l'épaisseur de l'échantillon utilisé. Les résultats montrés sur cette figure sont celles obtenus pour les différentes vitesses d'écoulement de l'eau distillée utilisés dans ce travail, pour deux différentes orientations de l'échantillon par rapport à la direction de ces vitesses. La température considérée cependant est égale à 25°C. De plus, sur cette figure sont représentées les courbes d'absorption d'humidité dans le cas statique ($V=0$ Km/h). Pour cette faible température d'exposition, nous remarquons qu'une augmentation de la vitesse de l'écoulement de l'eau distillée ne semble pas trop affecter les caractéristiques de la courbe d'absorption d'humidité. En effet, cette dernière demeure caractérisée par la présence de deux régions distinctes. Une première région, caractérisée par une variation linéaire de l'humidité suivie d'une autre région asymptotique et concave à l'axe des temps. L'augmentation de la vitesse d'écoulement affecte l'étendu de ces différentes régions dans les courbes d'absorption d'humidité. En effet, nous notons d'après la figure 1 que lorsque cette vitesse augmente, la pente de la partie linéaire (première région) ainsi que le maximum de la courbe d'absorption d'humidité augmentent. De plus, nous constatons d'après cette figure une diminution du temps de saturation (fin de la partie linéaire) lorsque cette vitesse augmente. Ces résultats indiquent clairement que lorsque la vitesse d'écoulement de l'eau augmente, la diffusion de l'eau dans le matériau composite sera favorisée. Plusieurs interprétations peuvent expliquer ces résultats. Nous croyons qu'une augmentation de la vitesse d'écoulement de l'eau augmente la pression exercée sur la surface de l'échantillon exposé, ce qui, à son tour permet à cet échantillon d'absorber beaucoup plus d'humidité. Des études complémentaires sur l'effet de la pression sur le mécanisme d'absorption d'humidité des matériaux composites sont en train d'être menées dans notre laboratoire pour comprendre ces constatations.

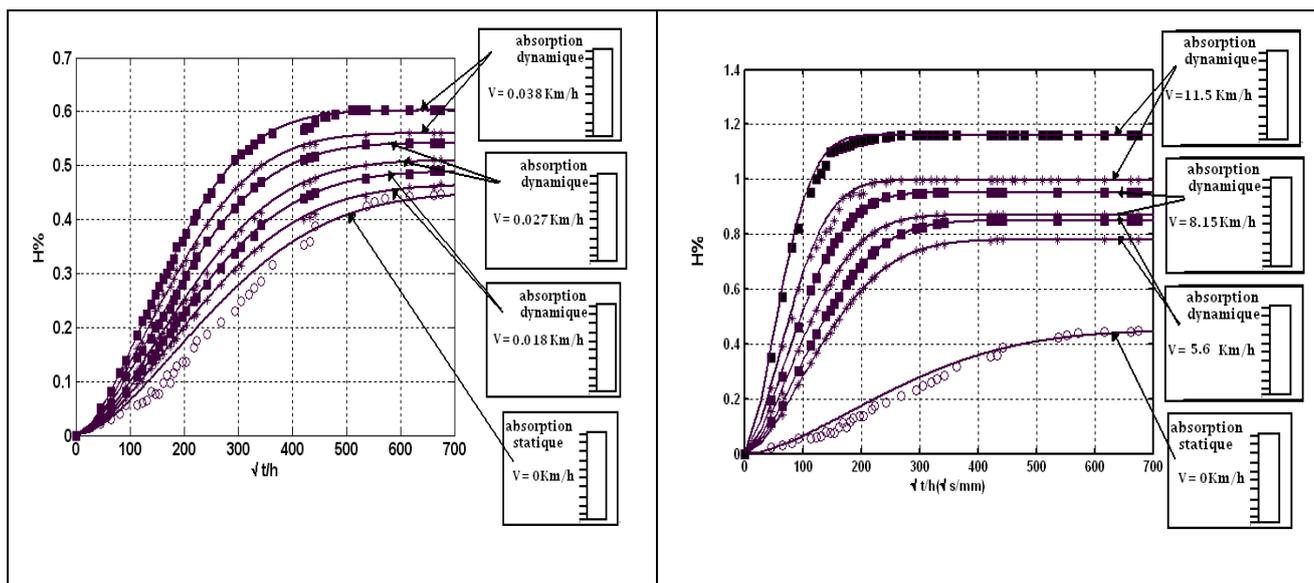


FIG. 1 – Effet de la vitesse d'écoulement de l'eau distillée ($T=25^{\circ}\text{C}$) sur la cinétique d'absorption d'humidité du composite polyester/fibre de verre (* : 0° , ■ : 90° , — : loi de Fick)

Les résultats montrés sur la figure 1 indiquent aussi que quelque soit la vitesse d'écoulement utilisée, une exposition de l'échantillon perpendiculairement à la direction de cette vitesse permet à ce dernier d'absorber une quantité d'humidité supérieure à celle obtenue lors d'une exposition parallèle. Ce résultat nous paraît évident car dans le cas d'une exposition perpendiculaire, les particules d'eau ont la possibilité de heurter directement la surface de l'échantillon exposé, ce qui va leur permettre de mieux s'infiltrer dans cet échantillon, comparativement à une orientation parallèle. De plus, nous avons déterminé les forces de trainée exercées sur la surface des échantillons suite à une exposition parallèle et perpendiculaire à la direction d'écoulement. Les valeurs obtenues dans la direction perpendiculaire sont supérieures à celles déterminées dans l'autre direction. Cette différence entre les intensités des ces forces de trainée dans ces deux directions peut expliquer les résultats discutés ci- haut. Remarquons aussi d'après la figure 1 que plus la vitesse de l'eau est importante, plus la différence entre les courbes d'absorption d'humidité obtenues dans le sens parallèle et perpendiculaire à la direction de cette vitesse augmente. Ce résultat nous paraît être évident car une augmentation progressive de la vitesse d'écoulement de 0.018 Km/h à 11.5 Km/h et compte tenu des dimensions des conduites du montage utilisés dans ce travail, nous fait passer d'un régime d'écoulement laminaire à un régime d'écoulement turbulent. Si l'orientation de l'échantillon est perpendiculaire à la direction de l'écoulement de l'eau apparemment le régime turbulent devient exagéré. Dans ce cas le composite devrait absorber beaucoup plus d'humidité.

La figure 2 montre les courbes d'absorption d'humidité pour une température égale à 65°C. Comparativement aux résultats montrés sur la figure 1, deux constatations peuvent être dégagées. Dans un premier temps, on remarque que l'augmentation de la température d'immersion a augmenté à la fois la pente de la partie linéaire de la courbe d'absorption d'humidité (coefficient de diffusion (D_x)) et son maximum (mm). Des résultats semblables ont été présentés dans la littérature [4]. Cette augmentation de ces paramètres hygrothermiques s'explique par le phénomène d'agitation des molécules d'eau lorsque la température augmente, qui va leur permettre de s'infiltrer de plus en plus facilement dans le matériau exposé.

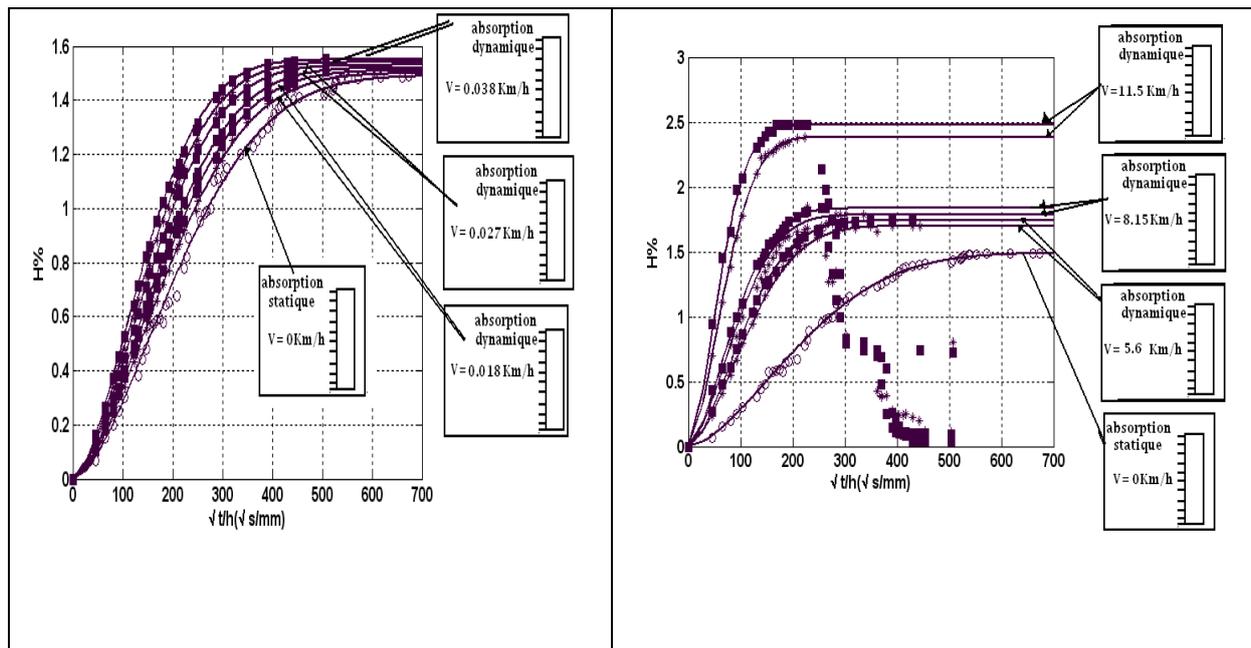


FIG. 2 – Effet de la vitesse d'écoulement de l'eau distillée ($T=65^{\circ}\text{C}$) sur la cinétique d'absorption d'humidité du composite polyester/fibre de (* : 0° , ■ : 90° , — : loi de Fick)

L'augmentation de la température d'immersion a aussi affecté le comportement d'absorption d'humidité du matériau composite utilisé dans ce travail, surtout pour des vitesses d'écoulement relativement importantes ($V \geq 5.6$ Km/h). En effet, nous avons noté la présence d'une chute remarquable dans les courbes, après un temps d'exposition relativement long. Selon la littérature, cette chute indique l'occurrence d'un phénomène de dégradation physico-chimique dans le matériau composite exposé. Plusieurs interprétations ont été proposées dans la littérature pour expliquer l'origine de cette dégradation. Selon Weitsman [5], pour le cas des résines polyesters, l'infiltration de l'eau dans les microvides présents dans la matrice des matériaux composites augmente la taille de ces microvides et ces derniers auront les dimensions remarquables

(formation des craques). Après un temps d'exposition relativement important, la matrice de matériau composite commence à perdre certaines de ses chaînes moléculaires qui peuvent se décomposer dans l'eau contenue dans les craques ainsi formés.

La figure 3 montre les courbes d'absorption d'humidité suite à une immersion dans l'eau de mer à 65°C. Comparativement aux résultats montrés sur la figure 2, on peut remarquer que la nature du milieu d'immersion affecte aussi la cinétique d'absorption dynamique d'humidité du matériau composite considéré dans cette étude. En effet, nous avons remarqué que la pente de la partie linéaire et le maximum d'humidité absorbée changent avec la vitesse et la direction d'écoulement de l'eau de mer. Cependant, l'eau de mer donne une cinétique beaucoup plus faible que celle obtenue durant une immersion dans l'eau distillée. Cela a été attribué à la présence des molécules de sel de grande taille dans l'eau de mer qui gênent l'infiltration des molécules de l'eau pure dans notre matériau.

De plus, nous notons d'après cette figure, que la chute dans les courbes d'absorption d'humidité se produit dans l'eau de mer quelque soit la vitesse d'écoulement, mais à des temps beaucoup plus courts que ceux obtenus suite à une immersion dans l'eau distillée. Ce résultat confirme l'effet dégradant que peut avoir l'eau de mer sur la résine polyester, tel que discuté ci-haut.

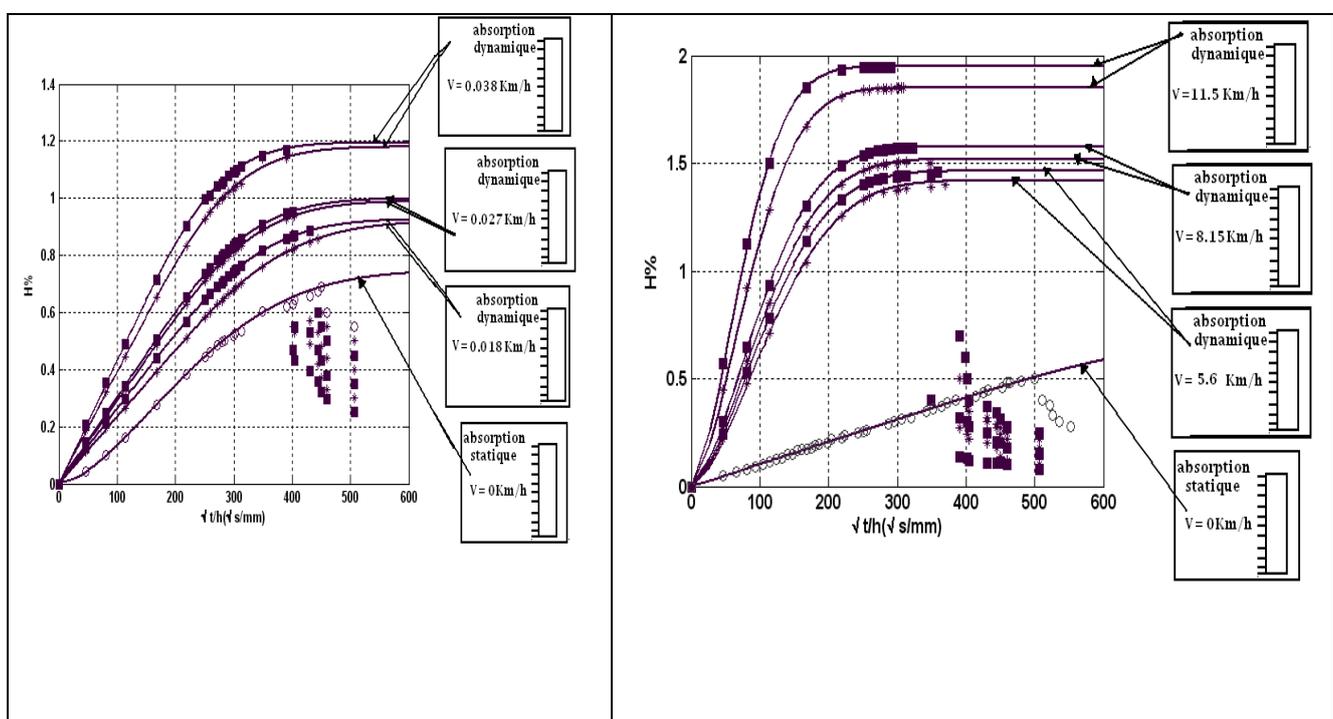


FIG. 3 – Effet de la vitesse d'écoulement de l'eau de mer ($T=65^{\circ}\text{C}$) sur la cinétique d'absorption d'humidité du composite polyester/fibre de verre (* : 0° , ■ : 90° , — : loi de Fick)

A partir des différentes courbes d'absorption d'humidité présentées sur les figures montrées ci haut, nous avons déterminé le coefficient de diffusion (D_x) (équation 2) et le maximum d'humidité absorbé (m_m), pour les différentes conditions d'exposition résumées dans le tableau 1. Les résultats obtenus ne sont pas présentés dans ce travail. Ces paramètres hygrothermiques (D_x , m_m) ont été par la suite utilisés (équation 1) pour prédire la quantité d'humidité absorbée. Une comparaison entre les courbes théoriques obtenues et celles déterminées expérimentalement est montrée sur les figures 1, 2 et 3. Avant tout phénomène de perte de masse, une très bonne concordance est observée entre ces courbes, indiquant que le phénomène de diffusion d'humidité dans notre matériau composite est Fickien, se produisant sans aucune dégradation notable.

4 Conclusion

Les principaux résultats obtenus dans ce travail peuvent être résumés comme suit:

- Le coefficient de diffusion (D_x) et le maximum d'humidité absorbée (m_m) du matériau composite utilisé dans ce travail dépendent de la vitesse d'écoulement. Plus cette vitesse augmente, plus ces deux paramètres hygrothermiques sont importants. De plus, ils dépendent de la nature du milieu

- d'immersion : les échantillons immergés dans l'eau distillée absorbent plus facilement l'humidité que ceux immergés dans l'eau de mer quelque soit la température utilisée.
- (D_x) et (m_m) dépendent aussi de l'orientation de la surface de l'échantillon exposé par rapport à la direction d'écoulement. Les résultats obtenus dans ce travail confirment qu'une exposition perpendiculaire à cette direction permettra à cet échantillon d'absorber plus d'humidité.
 - L'absorption dynamique d'humidité à basse température (25°C) a un comportement Fickien car les résultats théoriques confirment les résultats expérimentaux. Lorsque cette température augmente (65°C), nous avons noté une chute dans les courbes d'absorption d'humidité suite à une exposition dans l'eau de mer, et cela quelque soit la vitesse de l'écoulement. Ce résultat a été attribué à une dégradation physico-chimique de composite exposé. Cependant, dans l'eau distillée, cette chute n'apparaît que pour des vitesses d'écoulement relativement importantes (≥ 5.6 Km/h).

References

- [1] C. H. Shen and G. S. Springer in "Environmental Effects on Composite Materials" (Ed. G. S. Springer), Technomic Publishing, West port, 15 (1981).
- [2] R. Boukhili, H. Boukehili, H. Ben Daly and A. Gasmi, Polymer Composites, 27, 71, (2006).
- [3] M. Harchay, H. Ben Daly, H. Bel hadj Salah, « Absorption dynamique d'humidité dans les composites polyester/fibre de verre », COTUME 2008 (Premier Congrès Tunisien de Mécanique)
- [4] H. Ben Daly, H. Ben brahim, N. Hfaeidh, M. Harchay, R. Boukhili, "Investigation of water absorption in pultruded composites containing fillers and low profile additives", Polymer Composites, V28, N°3, P 355-364, (2007).
- [5] Kaushal S., Tankala K., Rao R.M.V.G.K., Kishore, some hygrothermal effects on the mechanical behaviour and fractography of glass-epoxy composites with modified interface, Journal of materials Science, V.26, 1991, p.6293-6299.