



Transferts couplés de chaleur et de masse dans des matériaux de construction

Ali CHIKHI^{1,2}, Azeddine BELHAMRI², Patrick GLOUANNEC³

¹Département de Génie Civil, Faculté de Technologie, Université Ferhat Abbas Sétif1, 19000 Algérie.

Email : a.chikhi@yahoo.fr

²Laboratoire de Génie Climatique, Faculté des Sciences de la Technologie, Université Constantine1, 25000 Algérie. *Email : belhamri@umc.edu.dz*

³Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL), Université de Bretagne Sud, Centre de Recherche, Lorient, France. *Email : patrick.glouannec@univ-ubs.fr*

Résumé : Les matériaux de construction sont généralement poreux et hygroscopiques donc ils sont susceptibles de contenir de l'air et de l'humidité, d'où la nécessité de modéliser les transferts de chaleur et de masse dans ces milieux. La présente étude comporte des travaux expérimentaux et numériques effectués sur deux types de matériaux: le mortier de ciment qui sert de référence et le béton de polystyrène ayant un caractère isolant. L'objectif est de présenter les résultats expérimentaux des mesures réalisées (thermiques et hydriques) et faire des simulations sur les transferts de chaleur et de masse au sein de parois de bâtiment et prédire leur comportement thermo hydrique afin de rationaliser la consommation énergétique et améliorer le confort thermique.

Mots clés : transferts couplés de chaleur et de masse, milieux poreux, matériaux de construction, expérimentation, modélisation numérique.

1. Introduction

Plusieurs études ont été réalisées dans le but d'effectuer une analyse plus réaliste conduisant à un coût réduit de consommation de l'énergie dans les immeubles. L'emploi de matériaux traditionnels pour assurer le confort (thermique, hydrique, acoustique) nécessite la juxtaposition de différents matériaux (isolants thermiques et acoustiques, pare-vapeur...) ayant chacun une tâche dévolue. Cette accumulation de matériaux augmente le coût de la construction et occupe un volume non négligeable. Les préoccupations actuelles sont de favoriser des produits composites capables de remplir plusieurs usages. L'ajout d'un enduit ou d'une peinture en surface vient en complément de ces produits composites et permet d'améliorer les performances de l'ensemble d'une paroi. Le développement actuel des bétons (bétons allégés,...) montre bien cette tendance qui consiste à surmonter les faiblesses du béton ordinaire en conservant ses performances mécaniques tout en intégrant d'autres composants non conventionnels. Ces derniers présentent de nouvelles propriétés physiques (mécaniques, thermo hydriques, acoustiques,...). On peut notamment trouver dans la littérature scientifique des travaux montrant l'intérêt d'améliorer les bétons existants en additionnant aux mélanges classiques des matériaux possédant des propriétés physiques différentes [1-3]. Ces matériaux doivent être économiquement viables, intégrer les problématiques liées au confort et au développement durable (coût de l'énergie, recyclabilité,...) [4-6].

2. Modélisation

La modélisation mathématique des phénomènes de transferts en milieux poreux s'inspire directement des méthodes classiques de la mécanique des milieux continus. L'étude scientifique des transferts couplés de chaleur et de masse est relativement récente puisqu'elle n'a réellement débuté que dans les années 50 du 20^{ème} siècle. Le matériau poreux est assimilé à un milieu continu fictif équivalent pour lequel les valeurs locales des variables et paramètres physiques sont identifiées à des valeurs moyennes sur un certain volume de milieu poreux. Plusieurs modèles ont été établis pour décrire ces phénomènes. Le choix du modèle mathématique à utiliser dépend principalement des hypothèses prises en compte.

En considérant les hypothèses suivantes :

- la phase solide constituant le milieu poreux est homogène, indéformable et isotrope,
- les différentes phases sont en équilibre thermique,
- la phase gazeuse est à pression constante et uniforme,
- il n'y a pas de réaction chimique,
- la masse volumique de la phase liquide est constante,
- le transfert de chaleur par radiation est négligeable.

Le modèle de Philip et De-Vries s'écrit, dans le cas de transferts monodimensionnels, de la manière suivante :

$$\varepsilon \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\varepsilon (D_{\theta l} + D_{\theta v}) \frac{\partial S}{\partial x} + (D_{Tl} + D_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (1)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho_l L_v \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon D_{\theta v} \frac{\partial S}{\partial x} \right) \quad (2)$$

Le degré de saturation en eau (S) est défini comme le rapport du volume d'eau contenu dans les pores sur le volume des pores ouverts. Il est lié à la teneur en eau massique et à la teneur volumique par la relation suivante :

$$S = w \rho_s / \varepsilon \rho_l \quad (3)$$

On aura remarqué que le modèle considère des équations - d'énergie et de diffusion - fortement couplées et non linéaires. Un code de calcul est développé à cet effet.

3. Etude expérimentale - confrontation simulation/expérience

3.1. Choix et composition des matériaux étudiés

Le matériau « idéal » doit à la fois avoir des impacts limités sur l'environnement extérieur durant tout son cycle de vie et être performant (thermiquement, acoustiquement...). Toutefois, le choix de ce matériau est complexe car les qualités des matériaux peuvent être contradictoires. Il faut alors définir des priorités. Dans le présent travail, deux matériaux de construction sont étudiés : le mortier de ciment et le béton chargé de billes de polystyrène. En plus du caractère isolant de ce dernier matériau, il permet de valoriser et de recycler un déchet domestique et industriel qui est le polystyrène.

3.1.1. Mortier de ciment

Le mortier de ciment est un matériau de construction composé d'un mélange de sable et une sélection de granulats avec une quantité spécifiée d'eau [7- 11]. Il peut être utilisé pour plusieurs applications.

Le mortier a été utilisé pendant des siècles comme un moyen d'adhésion entre briques ou blocs de béton. Il continue d'être utilisé dans de nombreux types de construction. Il est aussi un excellent moyen pour créer une surface lisse aux murs faits de briques et d'autres formes de maçonnerie. Souvent, il est appliqué en couches, ce qui permet de réaliser progressivement un revêtement qui adhère bien à la surface du mur.

3.1.2. Béton de polystyrène

L'introduction de matériaux « déchets » tel que le polystyrène dans le béton ordinaire semble une solution intéressante. Le choix de cet ajout est justifié par le fait que le polystyrène compte parmi les matériaux les plus abondants en Algérie. Les propriétés thermiques de ce matériau permettent par rapport à un béton classique d'alléger le produit de base, de proposer une meilleure isolation, d'améliorer l'inertie thermique, de recycler certains déchets et de réduire le dégagement de CO₂ dû à la combustion pour le chauffage des bâtiments.

Les propriétés suivantes du polystyrène font de lui un ajout intéressant au béton :

- bonne isolation thermique : 0.045 W.m-1.K-1,
- masse volumique faible : comprise entre 10 et 30 kg/m³, ce qui permet d'obtenir un béton léger,
- capacité d'amortissement des chocs,
- imperméabilité à l'eau [12],
- mise en forme facile (moulage, découpage,...),
- possibilité de recyclage.

Néanmoins, le béton à billes de polystyrène présente quelques inconvénients telle que la résistance à la compression qui diminue lorsqu'on augmente le taux et la taille des billes [13]. Par contre, l'ajout du polystyrène a moins d'influence sur la résistance à la flexion [14].

3.1.3. Préparation des échantillons

Le mortier de ciment est constitué de ciment, de sable et d'eau. Le béton est constitué des mêmes ingrédients du mortier avec en plus, un rajout de billes de polystyrène au mélange, avant malaxage. Le polystyrène utilisé dans cette étude est expansé (des billes de granulométrie de : 1.5 à 2.5 mm). La composition des matériaux retenus dans cette étude est décrite dans le tableau 1.

Tableau 1 : Composition des matériaux étudiés

Désignation	Dénomination	Fraction massique (%)				Pourcentage de polystyrène
		Ciment	Sable	Eau	Polystyrène	
MP0	Mortier de ciment	22,22	66,67	11,11	0,00	0%
MP1	Béton de polystyrène	22,17	66,52	11,09	0,22	1%
MP2	Béton de polystyrène	22,12	66,37	11,06	0,44	2%
MP3	Béton de polystyrène	22,08	66,23	11,04	0,66	3%
MP4	Béton de polystyrène	22,03	66,08	11,01	0,88	4%

Après mélange des différents constituants et gâchage dans un malaxeur, le mortier (MP0) et le béton (MP4) sont versés dans des moules parallélépipédiques en bois laqué de dimensions :

- 25cm de côtés et 5cm de profondeur pour le mortier ;
- 30 cm de côtés et 10cm de profondeur pour le béton à billes de polystyrène.

D'autres échantillons de dimensions plus petites ($13 \times 13 \times 5 \text{ cm}^3$) ont été confectionnés pour tous les types de matériaux cités ci-dessus. Ces plaques ont été utilisées pour la mesure de quelques propriétés thermophysiques du matériau telles que la conductivité thermique et la masse volumique. La porosité est tirée de la bibliographie [15].

D'autres échantillons de faibles dimensions ont été aussi confectionnés afin d'être utilisés pour la détermination expérimentale des courbes de sorption et de désorption.

3.2. Mesure des propriétés thermophysiques

La collecte des propriétés des éléments de construction représente l'un des facteurs les plus importants pour déterminer le climat intérieur.

3.2.1. Masse volumique

L'influence de l'incorporation des billes de polystyrène sur la masse volumique du béton est étudiée, les résultats obtenus sont regroupés sur le tableau 2. Il apparaît clairement que la masse volumique du béton allégé décroît avec l'augmentation du pourcentage de billes. La masse volumique du mortier de ciment MP0 (0% de polystyrène) est de 2200 kg/m^3 , alors que celle du béton MP4 (4% de polystyrène) est de 1220 kg/m^3 , ce qui correspond à une diminution de 44.5%.

Le béton léger obtenu présente, en plus de l'isolation thermique, l'avantage de réduire le poids des bâtiments. Les pièces de bétons légers sont donc plus légères, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations. De plus, on note une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau, les pièces de béton léger sont plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté. Il est aussi possible de faire des économies sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire.

Tableau 2 : Masse volumique des matériaux étudiés

Matériau	Masse volumique (kg.m^{-3})
MP0	2200
MP1	1820
MP2	1540
MP3	1370
MP4	1220

3.2.2. Conductivité thermique

La méthode utilisée pour mesurer la conductivité thermique est celle de la plaque chaude gardée. Les mesures sont effectuées sur des échantillons à leur état normal c'est-à-dire qu'ils sont en permanence à l'air libre, dans les conditions naturelles de température, de pression et d'humidité de la salle de mesure.

La conductivité thermique évolue en sens inverse du dosage en billes de polystyrène (figure 1), ceci se justifie par le fait que le polystyrène est un matériau isolant et que sa conductivité thermique est très faible ($0.045 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) comparativement à celle du ciment et du sable. Ainsi pour un volume donné, en augmentant le pourcentage massique de ce matériau dans le béton, on rend par conséquent ce dernier plus isolant thermiquement.

Il est à signaler que la variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage massique du polystyrène n'est pas linéaire, elle suit plutôt une corrélation parabolique.

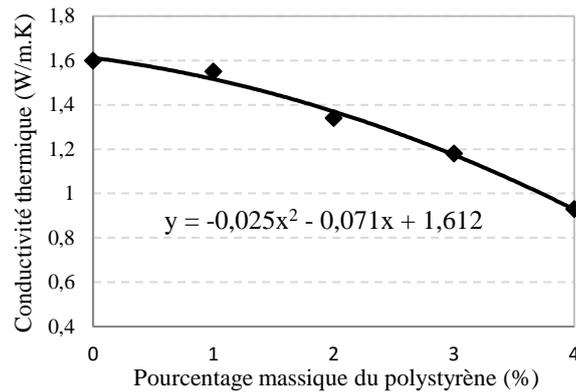


Figure 1 : Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage massique de polystyrène (plaque chaude à une température de 33.2°C)

Pour montrer l'influence de la température sur la conductivité thermique, des tests sont effectués sur deux types de béton à billes de polystyrène (MP3 et MP4). Sur la figure 2, sont reportés les résultats de mesure de la conductivité thermique apparente moyenne pour deux températures différentes : 20°C et 30°C . La figure montre qu'elle évolue en fonction de la température. Ce phénomène a été observé aussi par [16]. Leur travail consiste à faire des mesures de la conductivité thermique des bétons argileux à base de ciment. Nous pouvons interpréter le comportement thermique de nos matériaux en se référant à leur étude ; ils ont observé que la conductivité thermique ne varie presque pas pour des températures inférieures à 20°C et qu'elle commence à croître au-delà de cette température. Ce phénomène est d'autant plus remarqué que le taux de porosité est important. Leur explication est soutenue par l'étude de l'évolution, en fonction de la température, de la conductivité thermique de l'air humide, ils ont constaté que cette dernière commence à survoler à partir de 20°C . Et comme le béton à billes de polystyrène présente un taux de porosité important et que les pores sont remplis d'air humide, l'évolution de sa conductivité thermique en fonction de la température est donc justifiée.

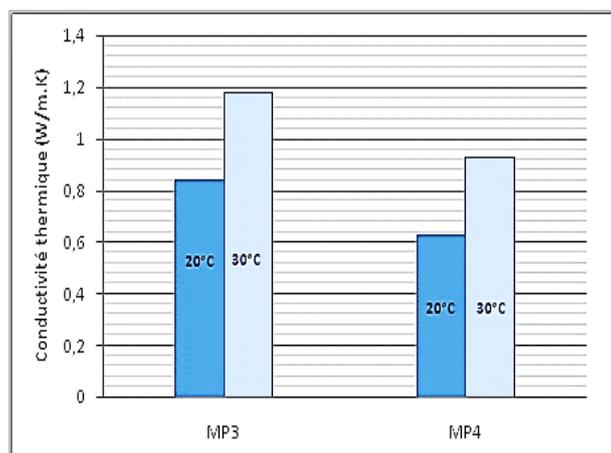


Figure 2 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la température

3.3. Comportement thermo hydrique

Dans cette manipulation, le bloc de mortier de ciment et celui de béton de polystyrène sont emboîtés, à tour de rôle, en position verticale, dans un coffret à l'intérieur duquel est fixée une plaque dont la température est pilotée par un bain thermostaté. L'humidification est obtenue par injection d'eau pulvérisée dans l'air compris entre l'échangeur et la face non isolée de l'échantillon. Des capteurs de température et d'humidité, répartis sur les différents éléments du banc expérimental, sont reliés à une centrale d'acquisition, elle-même reliée à un ordinateur.

La figure 3 présente l'évolution de l'humidité relative et de la température pour une séquence de mesure réalisée avec le mortier de ciment. Elle consiste à faire baisser la température de la plaque froide (échangeur) en imposant une température de consigne dans le bain thermostaté.

Sur la figure 3.b, la température reste constante jusqu'au temps 20h. En appliquant une baisse de température dans l'échangeur de chaleur, on observe une chute de la température de l'air, suivie de la température dans les différents points de mesure. Cette chute génère une élévation de l'humidité relative de l'air puis celle de l'intérieur du matériau (à $x=1$ cm, figure 3.a). Dans cette première séquence, la réponse de ϕ au sein du bloc est très lente à cause de ϕ de l'air qui était initialement inférieure à ϕ du matériau et en phase de descente (figure 3.a, de 10 à 20 heures). En plus, la baisse de la température n'a pas entraîné une importante élévation de ϕ de l'air. On observe quand même une variation faible mais continue de l'humidité relative au sein de l'échantillon. Il est à noter que le faible gradient de température entre la surface de l'échantillon et le fond (figure 3.b) est dû à la valeur de la conductivité thermique ($1.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) et à une épaisseur du bloc relativement faible (5cm). On peut distinguer aussi un retard de la réponse d'environ 5h, par rapport à la variation des conditions appliquées.

L'évolution de l'humidité relative et de la température montre une bonne concordance entre les valeurs calculées et celles mesurées.

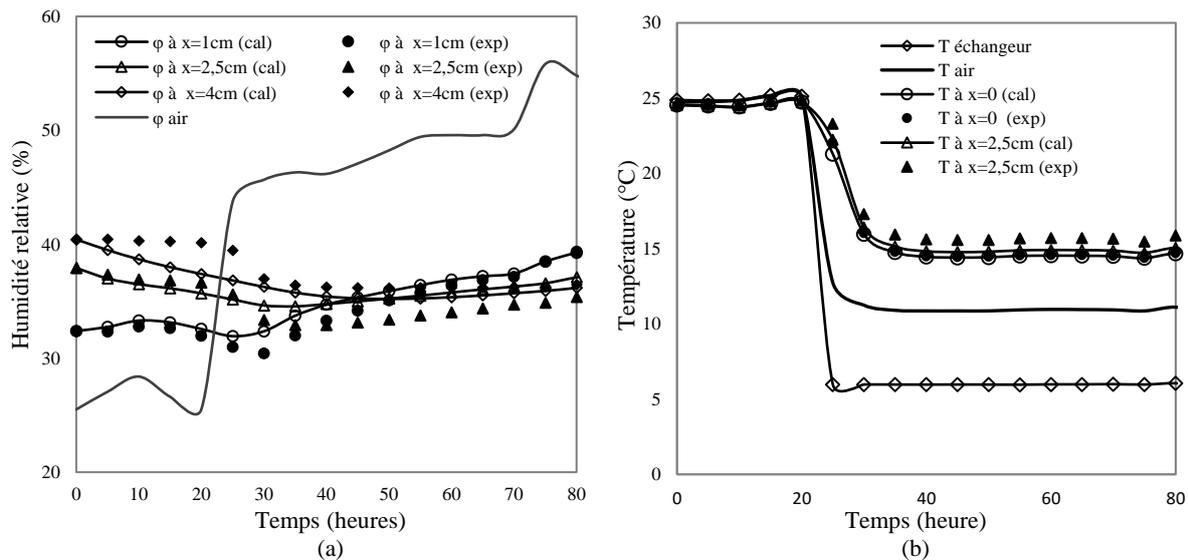


Figure 3 : Evolution de l'humidité relative et de la température - Comparaison entre modèle et expérience (Mortier de ciment)

La figure 4 illustre le comportement thermo-hydrique du béton de polystyrène type MP4 soumis à des conditions variables de température et d'humidité relative de l'air ambiant. La figure (4.a) montre l'évolution de l'humidité relative de l'air ambiant et à différentes profondeurs du béton. Ce graphe montre une bonne concordance entre la modélisation et l'expérimentation. La figure (4.b), qui représente la variation de la température au milieu de l'échantillon, confirme cette conclusion.

Notons que, pour le calcul de l'humidité relative – activité - à l'intérieur du béton de polystyrène, on se réfère à la courbe de sorption obtenue expérimentalement [17].

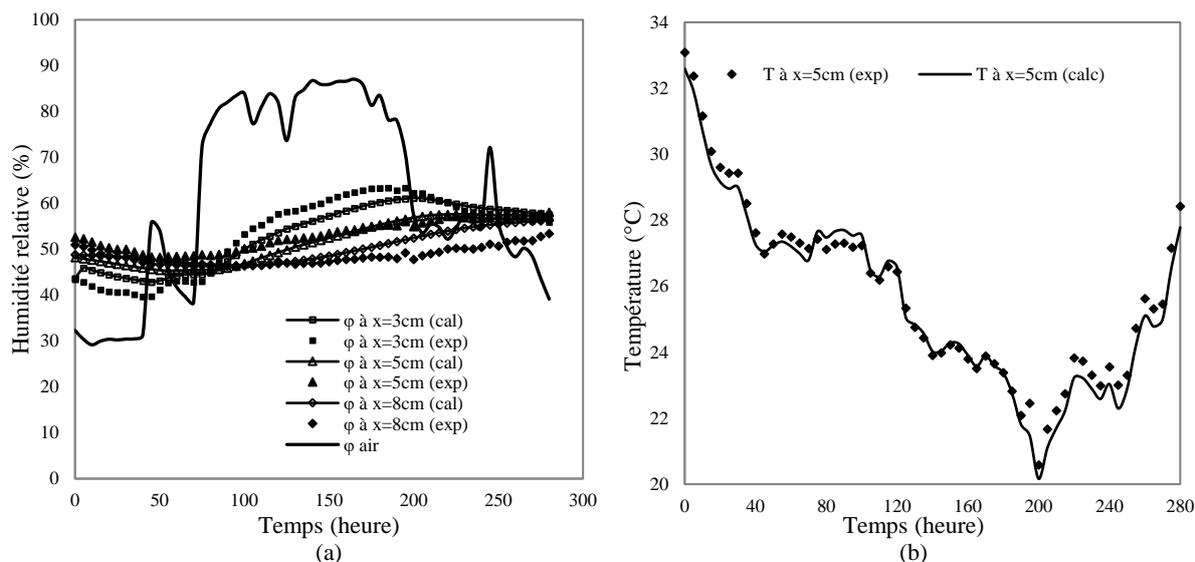


Figure 4 : Evolution de l'humidité relative et de la température - Comparaison entre modèle et expérience (Béton de polystyrène MP4)

Conclusion

Les résultats ont montré que la masse volumique et la conductivité thermique du béton décroissent avec l'augmentation du pourcentage des billes de polystyrène. Le béton léger obtenu présente, en plus de l'isolation thermique, l'avantage de réduire le poids des bâtiments, ce qui permet de réduire considérablement les dimensions et le poids des fondations et de faire des économies sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire. En plus, des déchets domestiques et industriels de polystyrène sont récupérés.

Des essais ont été effectués sur des blocs de béton de polystyrène et en mortier de ciment. Les expériences réalisées ont permis d'observer la réponse des matériaux aux sollicitations thermiques et hydriques variables. Les matériaux sont influencés par la variation des paramètres de l'air extérieur. Ils réagissent aux fluctuations de l'humidité de l'air. Cette réaction est d'autant plus rapide quand on s'approche de la surface du matériau.

En parallèle aux études expérimentales, un code de calcul numérique a été développé afin de prédire le comportement thermo-hydrique des matériaux étudiés vis-à-vis des sollicitations extérieures.

Le modèle adopté est validé par la confrontation de réponses simulées et expérimentales. Il permet d'approcher, avec une précision satisfaisante, les profils réels d'humidité et de température internes.

Nomenclature

c	chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
D_{Tl}	coefficient de diffusion de l'eau liquide sous l'effet d'un gradient de la température, $m^2.s^{-1}.K^{-1}$
D_{Tv}	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de la température, $m^2.s^{-1}.K^{-1}$
$D_{\theta l}$	coefficient de diffusion de l'eau liquide sous l'effet d'un gradient de la teneur en eau, $m^2.s^{-1}$
$D_{\theta v}$	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de la teneur en eau, $m^2.s^{-1}$
L_v	chaleur latente de vaporisation, $J.kg^{-1}$
S	degré de saturation, (-)

T	température, K ou °C
t	temps, s
w	teneur en eau massique en base sèche, $kg.kg^{-1}$

Symboles grecs

θ	teneur en eau volumique, $m^3.m^{-3}$
φ	humidité relative, % ou (-)
ε	porosité, (-)
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$

Exposant, Indices

l	liquide
s	solide

Références

- [1] M. Bederina, L. Marmoret, K. Mezreb, M. Khenfer, A. Bali et M. Quéneudec, Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modeling, *Construction and Building Materials*, Volume 21, Pages 662–668, 2007.
- [2] Ru Wang, T. Zhang et P. Wang, Waste printed circuit boards nonmetallic powder as admixture in cement mortar, *Materials and Structures*, Volume 45, Pages 1439–1445, 2012.
- [3] H.S. Jang et S.Y. So, The properties of cement-based mortar using different particle size of grinding waste insulator powder, *Journal of Building Engineering*, Volume 3, Pages 48–57, 2015.
- [4] J. de Brito, J. Ferreira, J. Pacheco, D. Soares et M. Guerreiro, Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete, *Journal of Building Engineering*, Volume 6, Pages 1–16, 2016.
- [5] T. Colinart, D. Lelievre et P. Glouannec, Experimental and numerical analysis of the transient hygrothermal behavior of multilayered hemp concrete wall, *Energy and Buildings*, Volume 112, Pages 1–11, 2016.
- [6] D. Lelievre, T. Colinart et P. Glouannec, Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: experimental and numerical analyses, *Energy and Buildings*, Volume 84, Pages 617-627, 2014.
- [7] R. Bouras, A. Kaci et M. Chaouche, Influence of viscosity modifying admixtures on the rheological behavior of cement and mortar pastes, *Korea-Australia Rheology Journal*, Volume 24, Issue 1, Pages 35-44, 2012.
- [8] M. Aamer et R. Bhutta, Effects of polymer cement ratio and accelerated curing on flexural behavior of hardener-free epoxy-modified mortar panels, *Materials and Structures*, Volume 43, Pages 429-439, 2010.
- [9] F. Wang, Z. Liu et S. Hu, Early age volume change of cement asphalt mortar in the presence of aluminum powder, *Materials and Structures*, Volume 43, Pages 493-48, 2010.
- [10] F. Wang, Z. Liu, T. Wang et S.Hu, A novel method to evaluate the setting process of cement and asphalt emulsion in CA mortar, *Materials and Structures*, Volume 41, Pages 643-667, 2008.
- [11] S., Xu et Y. Zhu, Experimental determination of fracture parameters for crack propagation in hardening cement paste and mortar, *International Journal Fracture*, Volume 157, Pages 33-43, 2009.
- [12] K. Yamura et M. Yamauchi, Use of polystyrene pieces for aggregate of concrete. *Proc. Annual conf. of Chugoku-Shikoku Branch of JSCE, Japan*, Pages 295- 329, 1982.
- [13] K. Miled, K. Sab et R. Le Roy, Effet d'échelle dans le béton léger de polystyrène expansé, *Colloque Microstructure et propriétés des matériaux, ENPC*, Pages 189- 194, 2005.
- [14] N. Chafi, Matrice cimentaire renforcée de fibres, *Mémoire de magistère, Université Constantine1*, 2005.
- [15] Da Chen, Modélisation du comportement hydromécanique d'un mortier sous compression et dessiccation, *thèse de doctorat, Université de Lille, France*, 2005.
- [16] M.S. Goual, A. Bali, M. Queneudec, et T'kint, Influence de la température et de la teneur en humidité sur la conductivité thermique des bétons argileux cellulaires, *A.J.O.T, International Publication, Série A*, Volume 15, N° 1, 2002.
- [17] A. Chikhi, A. Belhamri, P. Glouannec et A. Magueresse, Experimental study and modeling of polystyrene concrete and cement mortar. Application to a multilayered wall, *Journal of Building Engineering, Elsevier*, Volume 7, Pages 183-193, 2016.