



Les Propriétés physico-thermiques des mortiers à base des agrégats composites « PET-sable siliceux » (The physico- thermal properties of mortars made of composite aggregates "PET- siliceous sand")

M.T. Gouasmi^{1,*}, A.S. Benosman^{1,2,3}, H. Taïbi¹, M. Belbachir¹, Y. Senhadji^{2,4}

¹ Faculté des Sciences Exactes et Appliquées, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d'Oran 1, Ahmed Benbella, BP 1524, El Mnaouer, Oran 31000; Algérie.

² Département de Génie Civil, Laboratoire des Matériaux LABMAT, ENPO, Oran 31000, Algérie.

³ Département de Chimie, EPST Tlemcen, BP 165 RP, Bel-Horizon, Tlemcen 13000, Algérie.

⁴ Faculté des Sciences Techniques, Université Mustapha Stambouli, Mascara, Algérie.

*Corresponding Author. E-mail: m.t.gouasmi@hotmail.fr; Tel: (+213555017417)

Abstract

Reducing the consumption of energy used for heating and refreshing buildings has become an urgent necessity. This issue has, for years, interested all entrepreneurs and industrial manufacturers of building materials to produce more insulating materials for construction. Several studies, about the introduction of industrial and household wastes in construction materials, have been conducted in recent years. Therefore, the development of composite materials with low thermal conductivity from recovered wastes, mainly plastic, would be a very interesting alternative to meet both the economic and environmental demands. This study aims to show the direct effect of a PET-siliceous sand composite material (WPLA), made of upgraded plastic waste from polyethylene terephthalate (PET) bottles and silica sand. This composite is used as an aggregate to investigate the physico-thermal properties of mortars, when substituting the initial conventional limestone aggregate (natural) in amounts by weight of 25, 50, 75 and 100 %. The thermal conductivity (λ), thermal diffusivity, heat capacity, effusivity, thermal resistance (R), surface transfer coefficients (U) and the densities of composite mortars (WPLA) obtained, were compared. Very encouraging results were obtained; this requires particular interest which will certainly open up prospects for further research in the future.

Keywords: Thermal Conductivity; Composite; Waste Recovery; PET; Lightweight Aggregate WPLA.

Résumé

La réduction de la consommation énergétique due au chauffage et au rafraîchissement des bâtiments est devenue une nécessité pressante. Elle a suscité depuis des années tous les engouements des constructeurs et industriels des matériaux de construction à produire de plus en plus de matériaux isolants pour la construction. Plusieurs études sur l'introduction des déchets industriels et ménagers revalorisés dans le domaine de la construction ont été menées ces dernières années. Par conséquent, le développement des matériaux composites à faible conductivité thermique à partir des déchets revalorisés et notamment plastique serait une alternative plus qu'intéressante pour résoudre à la fois une demande économique et environnementale. Cette étude consiste à voir l'effet direct d'un matériau composite PET-sable siliceux (WPLA), conçu à partir de la revalorisation des déchets plastiques provenant des bouteilles en polytéréphthalate d'éthylène PET et du sable siliceux, et utilisé comme agrégat sur les propriétés thermo-physique des mortiers, substituant l'agrégat calcaire conventionnel (naturel) du départ à des teneurs en poids de 25, 50, 75 et 100 %. Les comparaisons qui ont eu lieu concernaient la conductivité thermique (λ), la diffusivité thermique, la capacité calorifique, l'effusivité, la résistance thermique (R), les coefficients de transmission surfacique (U) et les masses volumiques des mortiers composites WPLA conçus. Les résultats très encourageants qui ont été obtenus nécessitent un intérêt particulier ouvrant des perspectives pour de nouvelles recherches dans l'avenir.

Mots clés: Conductivité Thermique, Composite, Valorisation des déchets, PET, Agrégat léger WPLA.

1. Introduction

Avec la croissance rapide des populations urbaines et l'évolution des modes de consommation, la gestion des déchets constitue au niveau mondial un enjeu majeur. La production mondiale de déchets solides municipaux aurait ainsi doublé ces dix dernières années, soulevant ainsi de nombreux défis en termes de protection de l'environnement et de la santé publique [1]. Parmi ces déchets, on cite les déchets plastiques (PET, PEHD, PEBD, PVC, PP) qui occupent des volumes importants que ce soit dans les points de collecte, les centres de gestions et d'enfouissements et même la nature, laissant apparaître des paysages disgracieux et inesthétique pour de très longues périodes à cause de leurs très faible biodégradabilité. Il y a donc lieu d'encourager leur revalorisation ou leur recyclage.

L'utilisation des déchets polymériques recyclables dans l'élaboration des matériaux pour la construction ne cesse de se développer depuis des décennies, elle a vu naître des chapes, mortiers et bétons composites, des agrégats plastiques [2] et agrégats composites WPLA [3]. Leurs développements répondent à des demandes spécifiques exprimées par les professionnels du BTP notamment celles relatives à la durabilité et au confort acoustique et thermique.

En construction, le rôle de la chape est d'assurer la mise à niveau de la dalle et la régularité de sa surface. Elle doit aussi présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, pour résister aux efforts d'usure et d'abrasion. Elle peut constituer le support d'un revêtement de sol ou d'un revêtement d'étanchéité [4]. La chape peut enfin participer à l'isolation thermique et/ou acoustique des locaux. En fonction de leur conception et de leur mode d'exécution, on distingue entre les chapes adhérentes, qui sont incorporées ou rapportées et les chapes flottantes. Ces chapes sont dites flottantes parce qu'elles supposent l'interposition, entre la dalle support et la chape proprement dite, d'une couche de désolidarisation ou d'une sous-couche isolante lorsque des performances thermiques ou acoustiques sont recherchées [4].

Le but de ce travail est de présenter les résultats d'une première étude expérimentale portant sur les comportements physico-thermiques des mortiers chape à base des agrégats composites PET-sable siliceux, qui contiennent du déchet de PET broyé, comme substituant à l'agrégat naturel et ceci pour la réalisation d'une chape composite industrielle conçue pour le développement durable. Certaines proportions clés sont également étudiées, contrairement à ce qui a été entrepris dans les travaux antérieurs [3, 5-10] afin de déterminer les limites de faisabilité. Donc, ce travail a pour but d'identifier l'importance de la gestion des déchets plastiques dans le cadre du développement durable.

2. Matériaux Utilisés

2.1. Le ciment

Il s'agit du ciment Matine CPJ 42.5 CEM II/A provenant de l'usine LCO du groupe LAFARGE sise à OGGAZ (Nord-Ouest de l'Algérie). Ce ciment est d'une finesse de 4500 cm²/g, de densité absolue de 3.09 g/cm³ et de résistances moyennes à la compression de 22 MPa à 2 jours et 48 MPa à 28 jours. Les compositions chimiques du ciment et minéralogiques de son clinker sont données par les tableaux 1 et 2.

Tableau 1: Composition chimique élémentaire du ciment CPJ 42.5, Sables siliceux et calcaire.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	PAF	Cl ⁻	CaCO ₃	CO ₂
Ciment	17.40	4.12	2.97	61.15	1.16	0.66	2.46	0.13	8.85	0.017	-	-
<i>S_S</i>	83.29	0.21	0.45	7.03	4.2	-	-	-	-	-	2.27	1.00
<i>S_C</i>	11.76	-	0.91	44.35	-	-	-	-	-	-	59.09	26

Tableau 2: Composition minéralogique du clinker (%).

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
64	15	8	12.16

2.2. L'agrégat composite WPLA

C'est une synthèse à partir d'un élément naturel qui est le sable siliceux et d'un déchet de bouteilles en PET revalorisé. Un traitement thermique suivi par un refroidissement par paliers été nécessaire pour avoir des galettes d'une dureté proche à celle de la roche naturelle. Ces galettes ont subies un broyage industriel donnant différentes fractions granulaires dont la 0/0.3 qui a été utilisée dans cette étude. Les paramètres thermiques mesurés de

l'agrégat WPLA montrent une conductivité thermique de 0.589 W/m.K, une capacité calorifique $C_p = 1.48 \times 10^6 \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ et la diffusivité thermique $a = 0.398 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

La composition chimique du sable siliceux, l'analyse de la microstructure de l'agrégat composite WPLA par IRTF ainsi que sa distribution granulométrique par laser (MASTER SIZER 2000 type MALVERN) sont représentés respectivement par le tableau 1 et la Figure 1 (a & b).

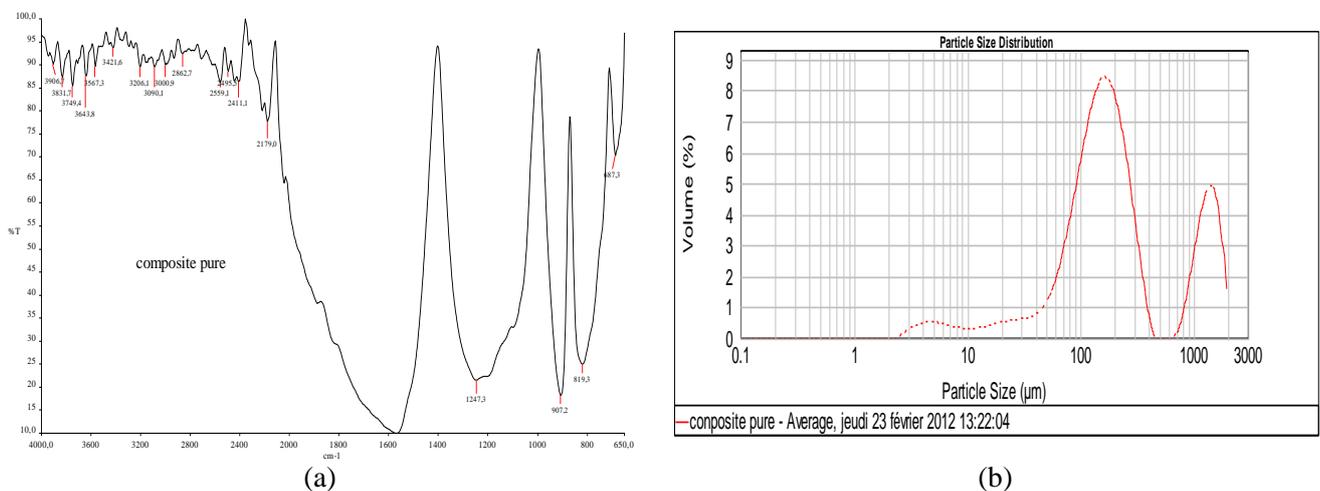


Figure 1: Spectre IRTF [8] (a) et distribution granulométrique par laser (b) de l'agrégat composite WPLA.

2.3. Le Sable

Le sable calcaire (S_C) utilisé et qui sera substitué par l'agrégat composite WPLA tout au long de cette étude est un sable silico-calcaire provenant des carrières SECH Spa du Groupe des sociétés HASNAOUI sise à Sidi Ali Benyoub Wilaya de Sidi Bel Abbés. La composition chimique du sable calcaire, son spectre IRTF et sa distribution granulométrique par laser sont montrés respectivement par le tableau 1 et la Figure 2 (a, b).

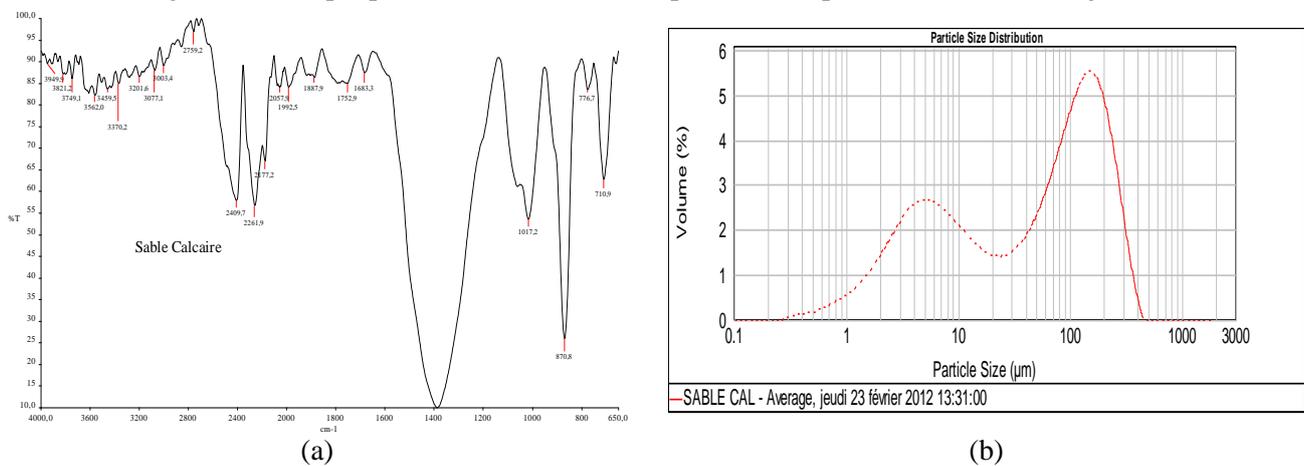


Figure 2: Spectre IRTF (a) et distribution granulométrique par laser (b) du sable calcaire.

3. Méthodes d'essais

Cette étude consiste à voir l'effet direct de l'agrégat composite PET-sable siliceux (par conséquent celui du PET dont la conductivité thermique est de $0.15 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) sur les conductivités thermiques des mortiers composites conçus en substituant 25, 50, 75 et 100 % l'agrégat calcaire conventionnel (S_C) par le WPLA.

Ces mortiers ont été élaborés en se référant à la norme ASTM C/109 [11] pour la confection des moules $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ qui seront soumis aux mesures de conductivité thermique à sec ; les proportions de ciment et d'agrégats sont respectivement de 33% et 67%, l'agrégat calcaire (S_C) sera substitué par le WPLA à 25, 50, 75 et 100%. Quand à la quantité d'eau pour chaque mortier elle a été ajustée pour les valeurs d'ouvrabilité comprises entre 85 et 105 mm (flow test).

L'appareil dédié à ces tests thermiques est l'ISOMET 2104 (Figure 3) qui est un instrument de mesure servant à mesurer directement les propriétés thermo-physique d'un large panel de matériaux y compris pour le génie civil suivant la norme ISO 8302 [12]. Il est équipé de diverses sondes selon la nature du matériau, leurs diamètre est de 60mm et elles sont destinées aux matériaux durs et solides.



Figure 3: Appareil de mesure de la conductivité thermique (LABMAT_ENPO d'Oran).

La détermination des masses volumiques des mortiers WPLAX s'est effectuée conformément à la norme NF EN 12390-7 [13]. Ainsi, les résultats obtenus concernaient la conductivité thermique (λ), la diffusivité thermique, la capacité calorifique, l'effusivité, la résistance thermique (R), les coefficients de transmission surfacique (U) et les masses volumiques des mortiers composites WPLAX conçus.

3. Résultats et discussion

3.1 Détermination des masses volumiques et mesure des propriétés thermiques des mortiers chapes

La détermination des masses volumiques des mortiers WPLAX s'est effectuée conformément à la norme NF EN 12390-7 [13] qui consiste à déterminer avec exactitude les valeurs des volumes réels des éprouvettes. Cette méthode permet de mesurer le déplacement de l'eau (méthode de référence), de la masse réelle de l'éprouvette et le calcul de la masse volumique exacte exprimée en Kg/m^3 . On constate d'après la Figure 4 que les densités absolues des mortiers ont tendance à diminuer avec la teneur de l'agrégat composite. En revanche, plus celle-ci est importante, plus le mortier résultant est léger.

La baisse des masses volumiques des mortiers composites et par conséquent leurs poids, sont dus à la légèreté de l'agrégat composite WPLA. Plus ses proportions sont importantes, plus le mortier composite obtenu est léger [14-15].

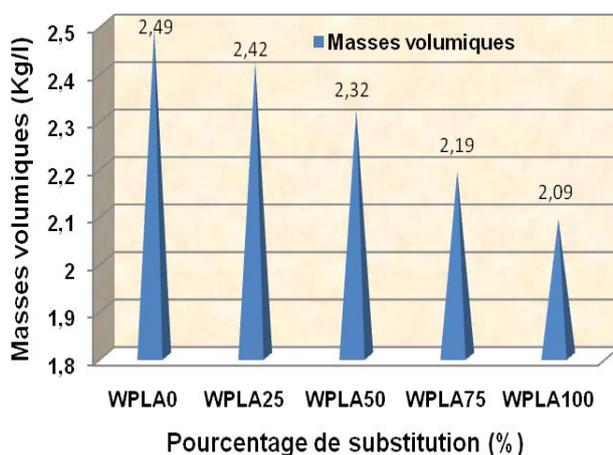


Figure 4: Masses volumiques en fonction du type des mortiers chape WPLAX.

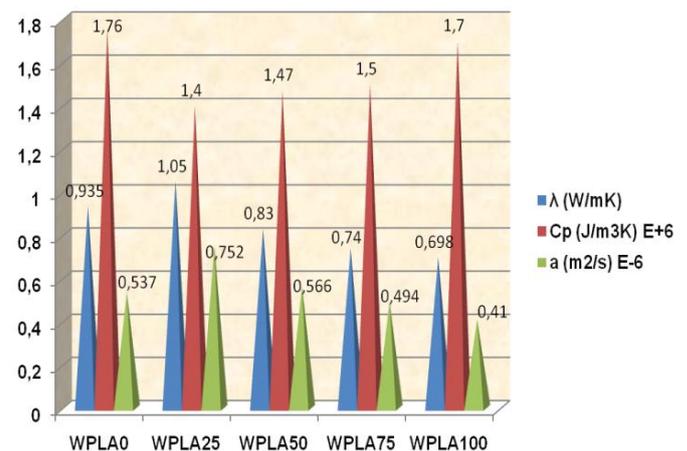


Figure 5: La variation de la conductivité thermique (λ), la capacité calorifique (ρC_p), la diffusivité thermique (a) des différents mortiers chapes WPLAX.

D'après la Figure 5, on constate qu'excepter la valeur du mortier composite WPLA25 tous les autres mortiers chape ont connus une baisse de la conductivité thermique par rapport au WPLA0 où ce mortier ne contient aucune proportion de l'agrégat composite PET-sable siliceux, pour le WPLA50 11.20% de baisse a été enregistrée, 20.85% pour le WPLA75 et finalement 25.34% pour le WPLA100, par contre on constate une hausse de 12.29% pour le WPLA25.

En effet, l'augmentation des proportions de l'agrégat composite WPLA ($\lambda=0.589$ W/m.K), dont il est conçu à partir du PET ($\lambda=0.15$ W/m.K), par rapport au (S_c) ($\lambda_{\text{silice}}=3.59$ W/m.K [16] et $\lambda_{\text{calcaire}}>\lambda_{\text{WPLA}}$) contribue à la diminution de la conductivité des mortiers composites WPLAX. Ce résultat a été confirmé par Boudenne [17] qui estime que les composites qui possèdent des charges de petites tailles conduisent mieux la chaleur par rapports au composites possédant des charges de tailles plus importantes.

La capacité calorifique est la quantité de chaleur que peut emmagasiner un matériau par rapport à son volume est définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 m³ du matériau [18]. La capacité calorifique du WPLA0 atteint une valeur moyenne de $1.76 \times 10^{+6}$ J/m³.K qui est nettement supérieurs à celle des autres mortiers composites. Les mortiers chapes WPLA25, WPLA50 WPLA75 et WPLA100 ont une capacité calorifique moindre par rapport au mortier WPLA0 avec un écart de 20.5 %, 16.5%, 14.8 % et 3.5% (Figure 5), respectivement.

La diffusivité thermique "a" caractérise l'aptitude d'un matériau à transmettre de la chaleur (en terme de vitesse). Elle exprime la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur du matériau. Elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique λ et inversement à la chaleur spécifique C et la masse volumique ρ selon la relation $a = \lambda / \rho C$ [18]. Cependant, le mortier chape WPLA100 a une diffusivité de 0.41×10^{-6} m²/s en moyenne (Figure 5), ceci s'explique par la teneur plus élevée en composite WPLA ($a=0.398 \times 10^{-6}$ m²/s) qui réduit la vitesse de propagation de la chaleur dans ce mortier. Plus la valeur de la diffusivité est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. Pour préciser et à titre d'exemple le moment où la chaleur arrive sur une face d'un mur et le moment où elle se propagera pour atteindre l'autre face du mur mettra beaucoup plus de temps.

La relation entre la conductivité thermique et la masse volumique est représentée par la Figure 6. Plus ρ du mortier diminue (par conséquent son poids à sec), plus sa conductivité thermique diminue. La relation de corrélation résultante est de type $\lambda = 0.143 \rho^{2.129}$ et son coefficient de corrélation est $R^2 = 0.832$; ce qui permet de déduire que c'est une corrélation raisonnable. Ces diminutions de λ sont dues essentiellement aux:

- Baisse des masses volumique des mortiers composite par conséquent leurs poids, cela est dû à légèreté de l'agrégat composite WPLA. Plus sa proportion est importantes plus le mortier composite résultant est léger [14, 15].
- L'effet du PET qui a une conductivité thermique très basse (0.15 W/m.K) d'où sa teneur dans les mortiers composite fait que leurs conductivités respectives baissent.
- Teneurs en air des mortiers composite puisque la conductivité thermique est également liée aux teneurs en air occlus. Plus ces derniers sont importants moins les mortiers sont conducteurs. Dans le cas de cette étude, on peut prétendre que l'air occlus augmente par l'incorporation de l'agrégat composite d'une part et par sa granulométrie (Figure 1.b) qui est moins continue que sable calcaire du départ (Figure 2.b), d'autre part l'effet du PET contenu dans le WPLA qui est apolaire (hydrophobe) quia tendance à piéger l'air dans ses surfaces rugueuses et à entrainer l'air dans la matrice lors de la confection des mortiers composites par sa tendance à repousser l'eau.

Nos résultats concordent avec ceux trouvés par Benazzouk et al. [14], Aattache et al. [18], Munanga et al. [19], Dweik et al. [20] et Benosman et al. [21].

L'effusivité affiche une variation inverse à celle de la diffusivité pour le WPLA0 et WPLA100 et une progression décroissante pour les autres mortiers chapes (Figure 7). Plus la valeur de "a" est faible, plus la chaleur met de temps à traverser le matériau. L'effusivité mesure la capacité de conservation de chaleur d'un matériau en contact avec un autre. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement. Au contraire, plus elle est faible, plus vite le matériau se réchauffe.

La Figure 8 montre d'une part la relation entre la résistance thermique ($R = 1/U = (\text{épaisseur } 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}) / \lambda$) et la conductivité thermique et d'autre part la relation entre le coefficient de transmission surfacique ($U = 1/R = \lambda / \text{épaisseur}$) et la résistance thermique (EN ISO10456 [22]), ces relations ont été faites par rapport aux proportions des agrégats composites. On observe que l'addition du WPLA dans la matrice cimentaire réduit la valeur du coefficient de transmission surfacique et augmente la valeur de la résistance thermique des différents mortiers chape conçus.

Or pour une même épaisseur, plus la valeur de λ est moindre, moins les mortiers composites perdent de la chaleur. Il faut connaître aussi que pour un élément plus la valeur U est petite meilleure est l'isolation thermique et moins il laisse perdre de la chaleur et plus la résistance R est élevée (Figure 8.b). Ces résultats correspondent avec ceux observés par Benosman et al. [21].

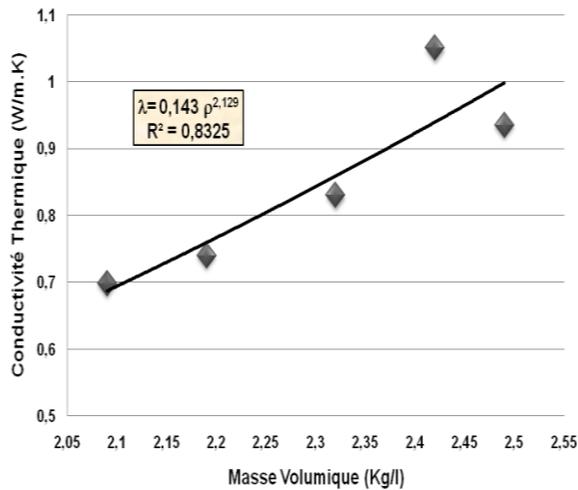


Figure 6: Correlation entre la conductivité thermique et la masse volumique des mortiers chapes.

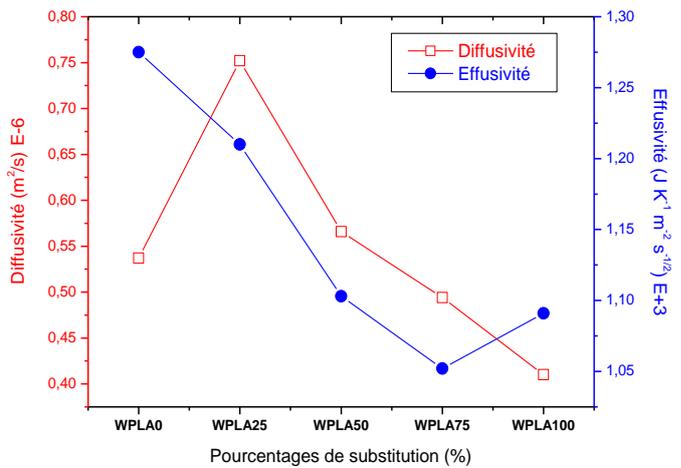


Figure 7: Evolution des propriétés thermiques dynamiques en fonction des pourcentages de substitution.

Ainsi, on pourra conclure que les chapes composites contenant du WPLA ont des propriétés d'isolation thermique meilleures que celles du mortier témoin. En conséquence, ils pourront fournir de multiples applications, en particulier celle qui empêchent le transfert de chaleur et par conséquent économiser de l'énergie au sein d'un bâtiment conçu pour un développement durable.

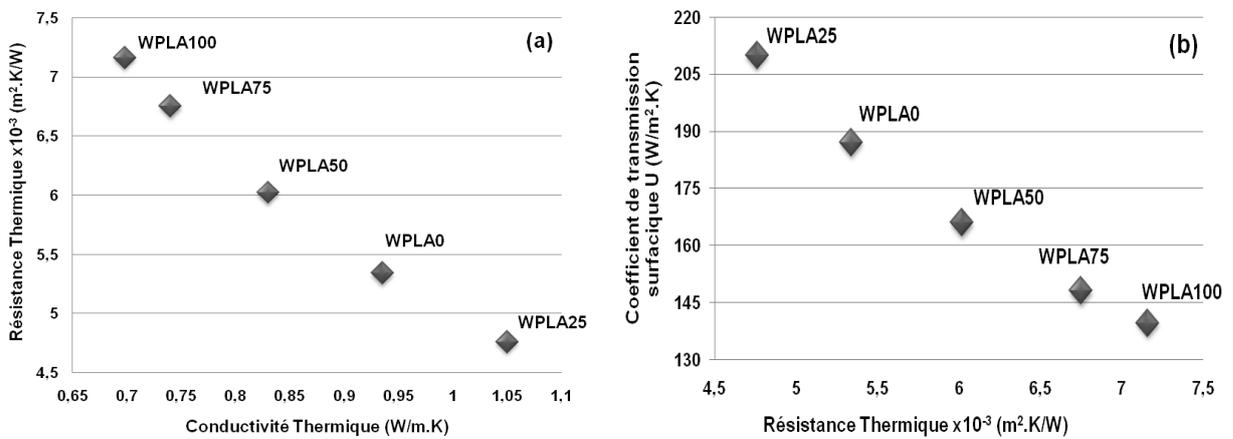


Figure 8 : a- Relation entre la résistance thermique et la conductivité thermique.
 b- Relation entre le coefficient de transmission thermique et la résistance thermique.

Conclusion

A la faveur de ce qui précède, on a pu tirer les conclusions suivantes :

L'agrégat composite WPLA contribue à :

- i. L'allégement des poids des mortiers composites qui le contiennent. Cette diminution de la densité à sec des mortiers composite par rapport au mortier non modifié est attribuée principalement à la densité du PET relativement basse par rapport au sable calcaire et siliceux ce qui acquiert à l'agrégat composite WPLA sa légèreté par rapport aux agrégats naturels.
- ii. L'abaissement des conductivités thermique des mortiers composites par rapport au mortier WPLA0 est dû au PET que contient le WPLA. Sa très basse conductivité thermique contribue à l'isolation des mortiers composites et aux gains énergétiques.

L'agrégat composite WPLA a une conductivité thermique, un coefficient de transmission surfacique et des propriétés thermiques dynamiques (diffusivité et effusivité thermique) largement plus faible que l'agrégat naturel. Ainsi, les mortiers

chapes conçus à partir de l'agrégat composite WPLA ont des propriétés d'isolation thermiques meilleures que celles du mortier témoin. Ils pourront fournir de multiples applications, telles que l'empêchement du transfert de chaleur et par conséquent économiser de l'énergie.

Remerciements-Nous tenons à remercier l'apport financier du projet Algérien CNEPRU E01820120116, El Hadj Brahim HASNAOUI et Mr Omar HASNAOUI Président et Directeur général du Groupe des Sociétés HASNAOUI, La TEKNACHEM Algérie représentée par Mr Mokhtar MAHDJOUB et le feu Ahmed TALEB. Nous adressons aussi nos remerciements au Pr Mohamed Mouli chef d'équipe au laboratoire LABMAT de l'ENPO d'Oran.

Références

1. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie ADEME, *Le savoir-faire français dans le domaine de la GESTION DES DÉCHETS*, Impression par I.M.E, Février (2013), <http://www.ademe.fr>.
2. Saikia N., de Brito J., *Constr. Build. Mater.* 34 (2012) 385.
3. Choi YW., Moon DJ., Kim YJ., Lachemi M., *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2829.
4. Fiches Techniques, G11, *Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre*, Collection technique CIMbéton, T.2, Chap.1 (2013) 22-25.
5. Choi YW., Moon DJ., Chung JS., Cho SK., *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 776.
6. Ge Z., Sun R., Zhang K., Gao Z., Li P., *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 81.
7. Ge Z., Huang D., Sun R., Gao Z., *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 682.
8. Gouasmi M.T., Benosman A.S., Taibi H., Belbachir M., Senhadji Y., *J.Chem. Mater. Res.* 3 (2015) 26.
9. Benosman A.S., Taibi H., Mouli M., Senhadji Y., Belbachir M., Bahlouli I., Houivet, D., *J. Mater. Environ. Sci. (JMES)*, 6 (2) (2015) 559.
10. Pai Avinash R., Jagtap Ramanand N., *J. Mater. Environ. Sci. (JMES)*, 6 (4) (2015) 902.
11. ASTM C 109/C109M, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars(Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, Annual book of ASTM standards(2011).
12. ISO8302, *Thermal Insulation--Determination of Steady-State Areal Thermal Resistance and Related Properties--Guarded-Hot-Plate Apparatus* (1991).
13. NF EN12390-7, *Essai pour béton durci - Partie 7 : masse volumique du béton*, European Committee for Standardization, CEN, (2001).
14. Benazzouk A., Douzane O., Mezreb K., Laidoudi B., Quéneudec M., *Constr.Build. Mater.* 22 (2008) 573.
15. Benazzouk A., Douzane O., Langlet T., Mezreb K., Roucoult J.M., Quéneudec M., *Cem.Concr. Compos.* 29 (2007) 732.
16. Ahrens J.T., *Rock Physics & Phase Relation: A Handbook of Physical Constant. American Geophysical Union, Washington, USA*, (1995), pp.240.
17. Boudenne A., *Étude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère*. Thèse de Doctorat, Université de Paris-XII Val de Marne, France (2003) pp. 191.
18. Aattache A., Mahi A., Soltani R., Mouli M., Benosman A.S., *Mater. Design.* 52(2013) 459.
19. Mounanga P., Gbongbon W., Poullain P., Turcry P., *Cem.Concr. Compos.* 30 (2008) 806.
20. Dweik H.S., Ziara M.M., Hadidoun M.S., *Int. J. Polym.Mater.* 57 (2008) 635.
21. Benosman A.S., Mouli M., Taibi H., Belbachir M., Senhadji Y., Bahlouli I., Houivet D., *Chem. Mater. Res.* 5(2013) 21.
22. NF EN ISO10456, *Matériaux et produits pour le bâtiment - Propriétés hygrothermiques -Valeurs utiles tabulées et procédures pour la détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles*, Norme AFNOR, France (2008).

(2016) ; <http://www.jmaterenvironsci.com>