

Formulation et caractérisation thermomécanique d'un mortier renforcé par des fibres naturelles végétales de *Posidonia-Oceanica* et animales de plumes de poulet

Hassen ZEIRI¹, Ons HAMDAROU^{2*}, Atef MAZIOUD², Laurent IBOS², Abdallah MHIMID¹

¹Laboratoire LESTE, École Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Avenue Ibn El Jazzar, 5019 Monastir, Tunisie

²CERTES, Université Paris Est Créteil, 61 av. du Général de Gaulle, 94010 Créteil, France

* (auteur correspondant : ons.hamdaoui@u-pec.fr)

Résumé - Ce travail porte sur l'étude des propriétés thermomécaniques d'un nouveau matériau de construction contenant des ressources biosourcées en fonction de la formulation. Ce matériau est développé à partir d'un mortier de ciment et de différentes fractions de fibres végétales de *Posidonia-Oceanica* et animales de Plumes de poulet. Le choix d'associer ces deux types de fibres est basé sur des travaux précédents. Les fibres de plumes de poulet sont plus intéressantes d'un point de vue thermique et les fibres de *Posidonia-Oceanica* sont plus intéressantes d'un point de vue mécanique. L'objectif de ce travail est de développer un matériau de construction avec des propriétés isolantes intéressantes et des propriétés mécaniques satisfaisantes. Les propriétés thermiques et mécaniques des composites en fonction de la formulation sont comparées. Les résultats montrent une baisse significative de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique avec l'ajout de fibres. Cette baisse maximale est notée pour les mortiers contenant 4% des fibres de plumes de poulet. Les résistances mécaniques de flexion et de compression des composites restent acceptables notamment pour les mortiers renforcés avec 2% de fibres et les échantillons qui contiennent des fibres de *Posidonia-Oceanica*. L'association de ces deux ressources naturelles pourrait ainsi être intéressante pour un compromis thermique mécanique.

Nomenclature

PO Posidonia-Oceanica
PP Plume de Poulet

Symboles grecs

λ conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
 α Diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$

1. Introduction

Le développement des matériaux de construction en utilisant des ressources renouvelables et des déchets est de plus en plus étudié dans la littérature [1-7].

Dans des travaux précédents, nous avons étudié l'utilisation des fibres naturelles de *Posidonia-Oceanica* (notées *PO*) dans des matériaux de construction (isolants, composites). Nous avons étudié les propriétés thermiques et mécaniques des composites cimentaires incluant des fibres de *PO* [8-11]. Pour les formulations testées, nous avons montré que les résistances mécaniques restent satisfaisantes avec l'ajout de ces fibres et même améliorées pour certains dosages.

Nous avons également étudié dans un travail récent le renforcement d'un mortier de ciment par des fibres animales de plumes de poulet (notées *PP*) [12]. L'ajout de ce type de fibres

améliore significativement les propriétés thermiques des matériaux. Cependant, les propriétés mécaniques sont affectées.

Dans ce nouveau travail, nous avons mené une étude expérimentale en testant différentes formulations avec un mortier de ciment et des fibres mixtes de PO et de PP. Le but de ce travail est de comparer les propriétés thermiques et mécaniques des composites en fonction de la formulation et choisir les formulations optimales en fonction des applications visées.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Matériaux

Le mortier utilisé comme liant est un mélange de ciment, de sable et de l'eau. Le ciment utilisé est un ciment Portland CEMII/A-V 42.5 N. Le sable utilisé est un sable normalisé.

La *Posidonia-Oceanica* est une plante marine présente sur les côtes méditerranéennes. Les rejets de cette plante (feuilles et balles) s'accumulent sur les plages. Dans ce travail nous utilisons les balles de *Posidonia-Oceanica* (Figure 1(a)). Ces balles ont été lavées à l'eau afin d'éliminer le sable, le sel et les impuretés. Les fibres sont ensuite séparées mécaniquement. Aucun traitement chimique n'est effectué sur ces fibres [8,9].

Les plumes de poulet utilisées (Figure 1(b)) sont issues d'un abattoir d'une usine de production de poulet. Les déchets de plumes contiennent des résidus d'abattoir (excréments, peau, sang et chair). Ils sont préalablement lavés à l'eau à 60 °C pendant 4h puis séchés dans des conditions normales de température et d'humidité pendant trois jours. Ensuite, les PP ont été traitées chimiquement en utilisant une solution de dodécyl-sulfate de sodium (SDS) de concentration 1% à une température de 90 °C pendant 2h. Ce traitement permet d'éliminer le risque de contamination microbienne due à l'existence d'agents pathogènes transmissibles par le sang. Les plumes ont été par la suite coupées en fibres de longueur moyenne égale à 1cm. Le tableau 1 présente les propriétés thermiques et mécaniques des fibres de PP et PO.

(a)



(b)



Figure 1 : (a) balles de PO (b) Fibres de PP

	Masse volumique (Kg.m ⁻³)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)	Réf
PP	10	0.030	-	2.5	[13,14]
PO	27	0.049	12	1.5	[9,15]

Tableau 1 Propriétés thermiques et mécaniques des fibres de PP et PO

2.2. Élaboration des composites

Le mortier de référence (sans fibres) a été confectionné en mélangeant le rapport massique de 2/3 de sable avec 1/3 de ciment et un rapport eau/ciment de 0.5. Les différents composites ont été fabriqués en faisant varier la teneur en fibres de PO et de PP dans le mélange. Nous avons choisi de fixer la fraction massique du renforcement (PO + PP) à 2% ensuite à 4%. Sept formulations ont été testées pour chaque fraction en modifiant le taux de fibres de PP et celui de fibres de PO : 0% PO + 0% PP ; 0% PO + 100% PP ; 25% PO + 75% PP ; 50% PO + 50% PP ; 75% PO + 25% PP ; 100% PO + 0% PP.

Trois éprouvettes de dimensions 40×40×160 mm³ ont été fabriquées pour chaque formulation et stockées dans le laboratoire. Les mesures ont été effectuées sur des matériaux à l'état durci. Les composites sont considérés durcis après 28 jours de séchage. Les résultats considérés représentent la moyenne de 9 mesures sur 3 éprouvettes en thermique, une moyenne de 3 mesures de résistance à la flexion et 6 mesures de résistance à la compression.

2.3. Méthodes de caractérisation

Le dispositif utilisé pour la caractérisation thermique des échantillons est le Hot-Disk. Cette méthode permet de mesurer simultanément la conductivité thermique λ , la diffusivité thermique α . C'est une méthode en régime transitoire. Son principe consiste à placer une sonde, composée d'une résistance thermique souple (couche mince de Nickel déposée sur du Kapton) en sandwich entre deux blocs identiques du matériau à caractériser. Une puissance constante est imposée à la sonde qui joue à la fois le rôle d'une source de chaleur et d'un capteur de température. En effet, la mesure de la résistance électrique de la sonde permet de connaître l'évolution de sa température.

Les essais mécaniques en compression et en flexion 3 points sont effectués conformément à la norme NF EN 196-1 [16].

3. Résultats et interprétations

3.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique est parmi les propriétés les plus importantes des matériaux de construction. La figure 2 présente la variation de la conductivité thermique en fonction de la formulation. L'incertitude moyenne sur toutes les mesures est inférieure à 4%.

Comme prévu, la conductivité thermique diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres pour toutes les proportions de PP et de PO. La conductivité thermique du mortier seul est autour de 1.16 W.m⁻¹. K⁻¹ et chute jusqu'à 75% (0.29 W.m⁻¹. K⁻¹) pour les composites contenant 4% de PP. Cette diminution est de 62% pour les échantillons contenant 25% de PO. Les fibres de PP présentent une porosité plus importante que les fibres de PO.

Pour les deux fractions massiques des renforcements, la conductivité thermique diminue lorsque l'on augmente la proportion de fibres de PP.

3.2. Diffusivité thermique

La figure 3 présente l'évolution de la diffusivité thermique des matériaux composites en fonction des différents dosages de fibres de PO et de PP pour les deux pourcentages de fibres : 2% et 4%.

Les résultats montrent que l'incorporation des fibres de PO et de PP diminue la diffusion de chaleur dans le composite. La diffusivité thermique diminue de manière plus prononcée lorsque l'on augmente le taux de fibres de PP. En effet, l'ajout de 100% des fibres PP au mortier réduit jusqu'à 64% la diffusivité thermique du matériau.

C'est une propriété intéressante dans l'isolation thermique, car un bon matériau d'isolation ne doit pas seulement avoir une faible conductivité thermique mais doit également permettre de retarder la transmission de la chaleur [17,18].

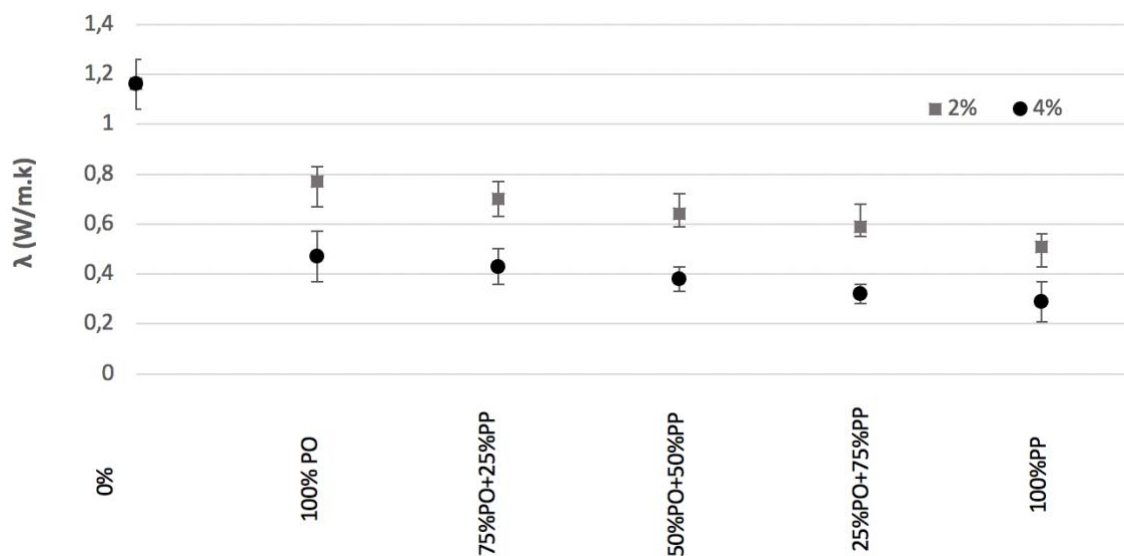


Figure 2 : Conductivité thermique en fonction des fractions massiques de PO et de PP

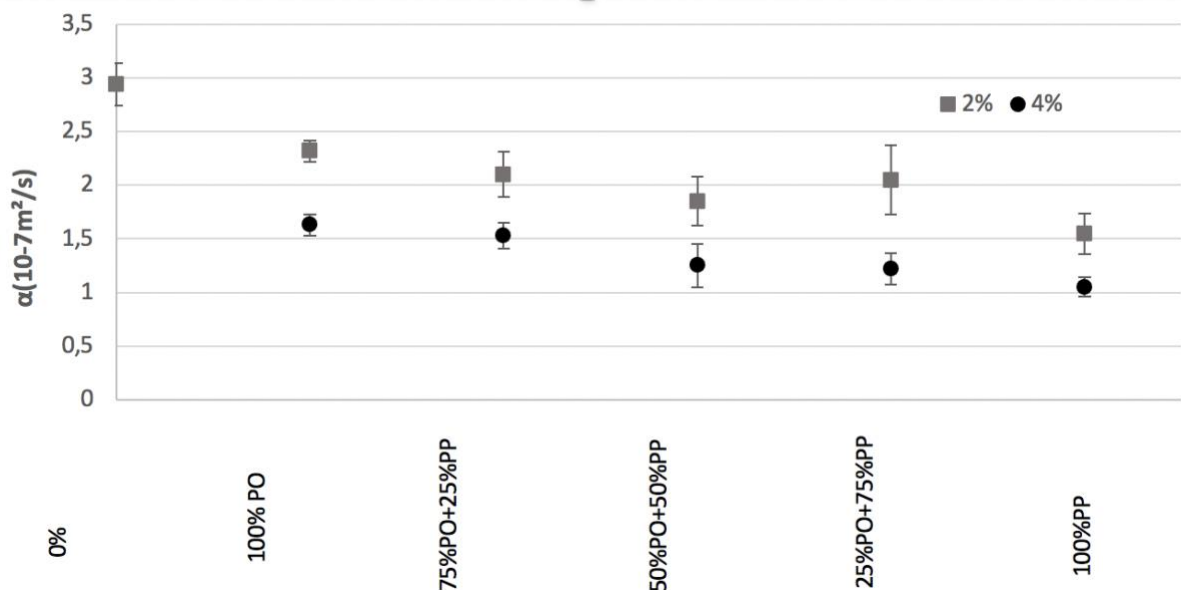


Figure 3 : Diffusivité thermique en fonction des différentes formulations

3.3. Résistances mécaniques

Les figures 4 et 5 présentent respectivement la variation de la résistance à la flexion et de la résistance à la compression. Ces résultats montrent que quelle que soit la proportion de fibres de PP et de PO, les résistances mécaniques des mortiers contenant 2% de fibres sont supérieures à celles des mortiers avec 4% de fibres. Ce résultat est prévisible car l'ajout de fibres naturelles de structure poreuse augmente la porosité du matériau.

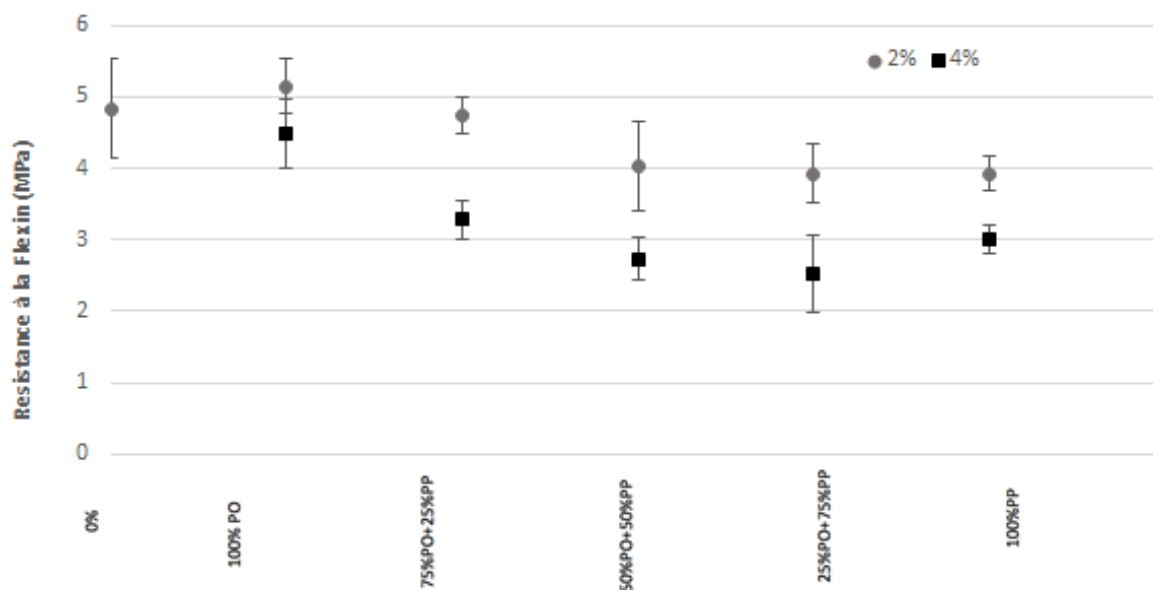


Figure 4 : Résistance à la flexion en fonction de la formulation

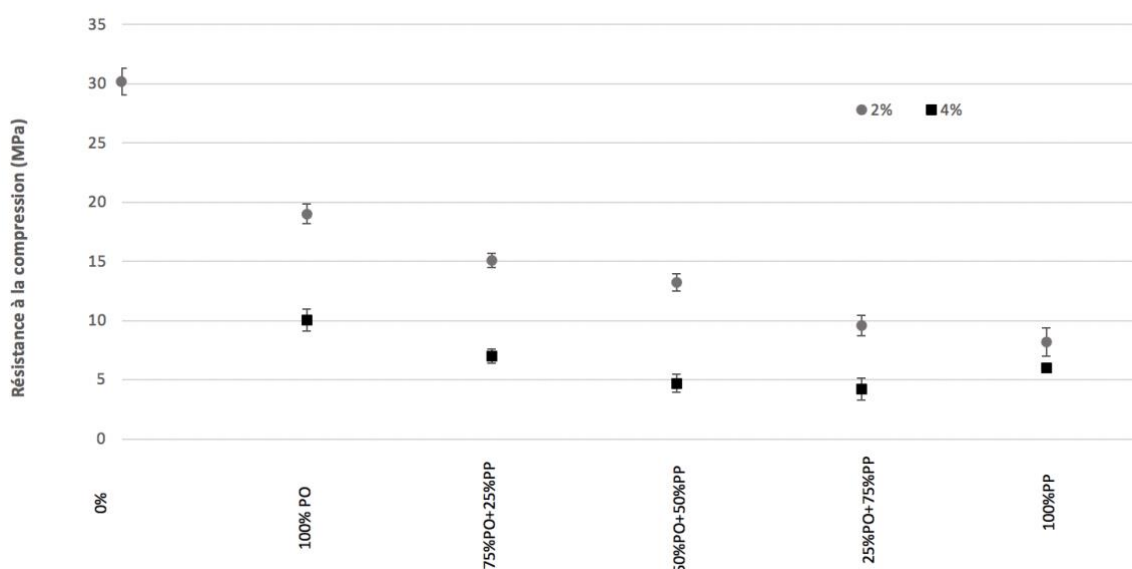


Figure 5 : Résistance à la compression en fonction de la formulation

Les résultats de la figure 4 montrent que la résistance à la flexion du matériau avec 2% de fibres augmente de 6% pour les échantillons contenant 100% de fibres de PO. Pour ce type de fibres la résistance à la flexion augmente pour une faible quantité de fibres jusqu'à une résistance maximale puis diminue. Compte tenu des incertitudes, cette tendance est moins nette que pour les autres propriétés.

Les résultats montrent également que pour un taux de fibres constant, la résistance à la flexion augmente avec la proportion de fibres de PO et diminue avec l'augmentation du taux de fibres de PP. Ceci peut être dû à une meilleure adhésion entre la matrice cimentaire et les fibres de PO qu'avec les fibres de PP. Des observations complémentaires par microscopie seront effectuées afin de confirmer cette hypothèse.

L'examen de la figure 5 montre que la résistance à la compression, pour les deux fractions massiques de fibres considérées, diminue quand la proportion de fibres de PP augmente. La substitution d'une partie des fibres de PO par des fibres de PP permet donc d'augmenter légèrement la résistance à la compression.

3.4. Classification des formulations réalisées

Les tableaux 2 et 3 regroupent les résultats de la masse volumique, la conductivité thermique et la résistance mécanique en fonction de la fraction de fibres PO et de PP pour les deux fractions massiques 2% et 4%. Ces résultats sont comparés avec la classification de RILEM pour les bétons légers (tableau 3).

L'analyse des résultats ci-dessous montre que les composites développés peuvent être classés comme suit :

- Les mortiers contenant 2% de fibres (100 % PO et 75% PO +25% PP) possèdent une masse volumique comprise entre 1600 et 2000 kg.m⁻³ et une résistance à la compression supérieure à 15 MPa. Ces matériaux sont ainsi classés en classe I : bétons légers pour éléments de structures ;
- Les mortiers contenant 2% de fibres de PP (100% PP) ont une masse volumique inférieure à 1450 kg.m⁻³, une conductivité thermique inférieure à 0.3 W.m⁻¹.K⁻¹ et une résistance à la compression supérieure à 0.5 MPa. Ils sont ainsi classés en classes III : bétons légers pour l'isolation ;
- Toutes les autres formulations ont une masse volumique inférieure à 1600 kg.m⁻³, une conductivité thermique inférieure à 0.75 W.m⁻¹.K⁻¹ et une résistance à la compression supérieure à 3.5 MPa. Elles peuvent être classées en classe II : éléments de structure légers et isolants.

Fraction massique de fibres (PO + PP) 2%			
Formulation	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Résistance à la compression (MPa)
0%	2029	01.16	30.17
100%PO	1848	0.77	19.00
75%PO+25%PP	1820	0.70	15.08
50%PO+50%PP	1796	0.64	13.23
25%PO+75%PP	1725	0.59	09.60
100%PP	1679	0.51	08.19

Tableau 2 : Synthèse des propriétés thermophysiques et mécaniques des composites contenant 2% de fibres (PO+PP)

Fraction massique de fibres (PO + PP) 4%			
Formulation	Masse volumique (kg.m⁻³)	Conductivité thermique (W.m⁻¹.K⁻¹)	Résistance à la compression (MPa)
0%	2029	01.16	30.17
100%PO	1613	0.47	10.02
75%PO+25%PP	1534	0.43	06.99
50%PO+50%PP	1495	0.38	04.71
25%PO+75%PP	1457	0.32	04.23
100%PP	1418	0.29	06.03

Tableau 3 : Synthèse des propriétés thermophysiques et mécaniques des composites contenant 4% de fibres (PO+PP)

Propriétés	Class and type		
	Classe I Structural	Classe II Structural/ Insulating	Classe III Insulating
Compressive strength (MPa)	>15	>3.5	>0.5
Thermal conductivity (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	-	<0.75	<0.30
Approximate density (kg.m ³)	1600 - 2000	<1600	<1450

Tableau 4 : Classification des bétons légers (RILEM, 1987) [19]

4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié la possibilité de mélanger des fibres végétales de *Posidonia-Oceanica* et des fibres animales de plumes de poulet pour le renforcement d'un mortier de ciment. Les fibres de *Posidonia-Oceanica* présentent des meilleures propriétés mécaniques et les fibres de plumes de poulet possèdent des meilleures propriétés isolantes. La combinaison des deux mélangées avec un mortier de ciment permet de développer un matériau de construction léger avec un bon compromis thermique-mécanique. Ces matériaux peuvent être utilisés pour des applications structurales ou non structurale en fonction de la combinaison choisie.

La valorisation de ces déchets dans des matériaux pour la construction permet à la fois de développer des matériaux avec des propriétés thermiques et/ou mécaniques améliorées et de réduire l'impact environnemental de ces matériaux.

Ces travaux seront poursuivis par des caractérisations additionnelles (observation par microscopie des faciès de rupture, mesures d'absorption acoustique, étude de la cinétique de diffusion d'eau...) pour les formulations les plus intéressantes.

Références

- [1] A. Limam, A. Zerizer, D. Quenard, H. Sallee, Experimental thermal characterization of bio-based materials (Aleppo Pine wood, cork and their composites) for building insulation, *Energy. Build.* 116 (2016) 89-95.
- [2] V. Nozahic, S. Amaziane, G. Torrent, K. Saidi, H. De Baynast, Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 612-231-241.
- [3] D.K. Pensar, B. Shindman, the mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 982-992.
- [4] M. Chikhi, B. Agoudjil, A. Boudenne, A. Gherabli, Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation, *Energy. Build.* 66 (2013) 267-273.
- [5] M. Boumhaout, L. Boukhattem, H. Hamdi, B. Benhamou, Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh, *Constr. Build. Mater.* 135 (2017) 241-250.
- [6] I. Amara, A. Mazioud, I. Boulaoued, A. Mhimid, Experimental study on thermal properties of bio-composite (gypsum plaster reinforced with palm tree fibers) for building insulation, *international journal of heat and technology*, (2017) 576-584.
- [7] Z. Saghrouni, D. Baillis, A. Jemni, Composites based on *Juncus maritimus* fibers for building insulation, *Cem. Concr. Compos.* (2019).
- [8] O. Hamdaoui, O. Limam, L. Ibos, A. Mazioud, Thermal and mechanical properties of hardened cement paste reinforced with *Posidonia-Oceanica* natural fibers. *Constr. Build. Mater.* 269 (2021), 121-339
- [9] O. Hamdaoui, L. Ibos, A. Mazioud, M. Safi, O. Limam. Thermophysical characterization of *Posidonia Oceanica* marine fibers intended to be used as an insulation material in Mediterranean buildings. *Constr. Build. Mater.* 180, (2018) 68-76.
- [10] O. Hamdaoui, L. Ibos, A. Mazioud, O. Limam, Fibres de *Posidonia-Oceanica* : un matériau d'isolation thermique de parois de bâtiments. *Congrès français de thermique* (2019), Nantes, France.
- [11] O. Hamdaoui, A. Mazioud, L. Ibos, M. Safi, O. Limam. Caractérisation thermophysique d'un ciment renforcé par des fibres naturelles d'origine marine *Posidonia Oceanica*. *Congrès français de thermique* (2017), Marseille, France.
- [12] H. Zeiri, S. Alimi, O. Hamdaoui, A. Mazioud, A. Mhimid, Étude thermo-mécanique d'un mortier de ciment renforcé par des fibres animales, *JSFM-CMC* (2021), Paris, France.
- [13] M. Zhan, RP. Wool, Mechanical properties of Chicken Feathers. *Polymer composites.* 32.6 (2011), 937-944.
- [14] O. Mrajji, M.E. Wazna, Y. Boussoualem, A.E. Bouari & O. Cherkaoui (2021). Feather waste as a thermal insulation solution: Treatment, elaboration and characterization. *Journal of Industrial Textiles.* 50 (2021) 1674-1697.
- [15] E. Fortunati, F. Luzi, D. Puglia, R. Petrucci, JM. Kenny, L.Torre. Processing of PLA nanocomposites with cellulose nanocrystals extracted from *Posidonia Oceanica* waste: Innovative reuse of coastal plant. *Ind Crop Prod.* 67 (2015), 439-447.
- [16] NF EN 196-1 NF EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques [Methods of testing cements–part 1: determination of mechanical strengths]. 2006.
- [17] A. Djoudi, M.M. Khenfer, A. Bali, T. Bouziani, Effect of the addition of date palm fibers on thermal properties of plaster concrete: experimental study and modeling, *J. Adhes. Sci. Technol.* 28 (20) (2014) 2100–2111.
- [18] B. Belhadj, M. Bederina, Z. Makhloufi, A. Goullieux, M. Quéneudec, Study of the thermal performances of an exterior wall of barley straw sand concrete in an arid environment, *Energy Build.* 87 (2015) 166–175.
- [19] R. Aisswarya, Experimental analysis of light weight concrete, *Int. J. Adv. Sci. Res. Eng.* 4 (2018).