

Étude expérimentale des propriétés physico-mécaniques des mortiers à base des granulats de mâchefer de charbon minéral

Edem BAITE^{1,2}, Adamah MESSAN^{1*}, Kinda HANNAWI², William PRINCE^{1,2}
et François TSOBNANG¹

¹ *Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), Laboratoire Eco-matériaux de construction (LEMC), Rue de la science, 01 BP 194 Ouagadougou 01, Burkina Faso*

² *INSA-Rennes, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM), 20 Avenue des Buttes de Coësmes, CS 70839, 35708 Rennes Cedex 7, France*

* Correspondance, courriel : adamah.messan@2ie-edu.org

Résumé

Les activités du génie civil consomment des quantités considérables de ressources minérales naturelles ou élaborées, et génèrent d'importants impacts environnementaux en termes d'émission de gaz à effet de serre et de rejets de déchets. Pour rationaliser l'utilisation de ces ressources, des efforts continus sont réalisés depuis plusieurs années pour recycler et valoriser des résidus et sous-produits industriels, dans des matériaux de construction. Notre étude s'inscrit dans cette dynamique avec pour finalité la valorisation des granulats de mâchefers, sous-produits issus du charbon minéral brûlé dans les centrales thermiques Tefereyre au Niger. Dans cette étude, la classe granulaire du granulat de mâchefers utilisée correspond à celle d'un sable (0/5 mm). Ce sable est utilisé dans la formule d'un mortier normal. Les composites sont élaborés en remplaçant des proportions volumiques définies de sable naturel (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 75 %, 100 %) par des quantités identiques de sable de mâchefer. Ils sont ensuite caractérisés par leurs propriétés physiques et mécaniques. Les résultats obtenus, montrent que la fine porosité des grains de mâchefer et sa faible masse volumique, permet d'obtenir des matériaux légers, à faible conductivité thermique et donc à propriétés isolantes. Comme on peut s'y attendre les résistances en compression des matériaux obtenus sont plus faibles que celles du mortier contenant du sable normal mais ils présentent une ductilité nettement améliorée qui peut être utile pour des applications spécifiques.

Mots-clés : *mâchefer, mortier, propriété physique, propriété mécanique.*

Abstract

Experimental study of physical and mechanical properties of mortar containing coal bottom ash aggregates

Civil engineering activities, which generate significant environmental damages in terms of emission of greenhouse gases and waste discharges, consume large quantities of natural or treated mineral resources. To rationalize the use of these resources, continuous efforts are made for many years to recycle and valorize wastes and industrial products in construction materials.

Our study falls in this dynamic with the aim to valorize the coal bottom ash aggregates, by-products of coal's mineral burned in power plant to Tefereyre (Niger). In this study, the granular category of coal bottom ash aggregates used corresponds to one of sand (0/5mm). This sand is used in the formula of a normal mortar. The composites are prepared by replacing defined natural sand volume proportions (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 75 % and 100 %) with identical quantities of coal bottom ash sand. They will then be characterized by their physical and mechanical properties. The obtained results show that the fine porosity of coal bottom ash grains and his low density provides lightweight materials with low thermal conductivity and so insulating properties. As one could expect, the compressive strengths of the materials obtained are lower than those of mortar containing normal sand, but they have a markedly improved ductility which can be useful for specific applications.

Keywords : *coal bottom ash, mortar, physical property, mechanical property.*

1. Introduction

Parmi les matériaux de construction, le béton est le plus utilisé au monde avec près d'un mètre cube coulé par an et par habitant ($1 \text{ m}^3/\text{an}/\text{habitant}$) [1]. En effet, sa production et sa mise en œuvre rapide, son faible coût, ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître ses domaines d'application. C'est ainsi qu'il est utilisé dans l'habitat individuel ou collectif, les viaducs, les infrastructures, les centrales, le mobilier urbain pour ne citer que quelques exemples. Cette utilisation intense de béton génère une forte demande en ciment, en granulats et en eau. Ce qui impacte négativement l'environnement à travers les émissions du CO_2 qui contribue à l'accroissement de l'effet de serre. L'une des conséquences de l'utilisation intense du béton est la forte pression sur les ressources naturelles (granulats) conduisant à la dénaturation des paysages. Face à ce problème environnemental, la recherche de nouvelle formule de béton moins coûteux et utilisant les sous-produits et les déchets industriels [2-4], est devenue une préoccupation majeure. Parmi les déchets industriels, les mâchefer de charbon minéral font l'objet d'intenses recherches scientifiques depuis une vingtaine d'années, en vue d'une utilisation dans les matériaux cimentaires.

Ces efforts ont donné un certain nombre de résultats. Ainsi, [5] rapportent que le mâchefer de charbon minéral est un matériau viable pour produire le béton. Tandis que Kim et Lee ont étudié le mâchefer produit en Corée et indiquent que la résistance à la compression du béton de granulats de mâchefer n'est pas significativement affectée, mais la résistance à la flexion, le module élastique et la densité sèche diminuent avec la croissance de la teneur en mâchefer de charbon [6]. Les recherches centrées sur les propriétés pouzzolaniques de différent mâchefer de charbon montrent que le mâchefer minéral possède de faibles propriétés pouzzolaniques mais peut être utilisé comme granulat dans la production du béton [7-9]. En introduisant le mâchefer de l'Inde comme granulat dans le béton, [10] indique une diminution linéaire de la densité due à la faible densité du mâchefer avec l'augmentation du taux de mâchefer. Ainsi on note une variabilité des comportements des composites en fonction de l'origine des mâchefers utilisés. Il est donc important d'étudier le mâchefer du charbon minéral de la carrière de Tefereyre (Niger). L'objectif de cette étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de la substitution du sable naturel par le sable de mâchefer sur les propriétés physico-mécaniques du mortier pour une valorisation dans le génie civil.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

2-1-1. Ciment

Le ciment utilisé dans la réalisation du mortier est un ciment Portland CEM 42,5 de la société CIMTOGO, conforme à la norme NFP 15-301 [11]. Les valeurs de la masse volumique spécifique, la masse volumique apparente et la surface spécifique BET sont respectivement $3,15 \text{ t/m}^3$; $1,06 \text{ t/m}^3$; $2,96 \text{ m}^2/\text{g}$.

2-1-2. Sable naturel

Le sable naturel utilisé est un sable provenant de la rivière de Bongré (Burkina Faso). Sa masse volumique apparente est de 1617 kg/m^3 , sa masse volumique spécifique $2,71 \text{ t/m}^3$ et son module de finesse est de 2,5. L'analyse granulométrique présentée sur la **Figure 1** montre que le sable utilisé est de classe granulaire 0/5. L'équivalent de sable selon la norme NF 18-598 [12] nous montre que le sable utilisé est un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses, bon pour un béton de haute qualité. On obtient en effet un équivalent de sable au piston (ESP) de 74,49.

2-1-3. Sable de mâchefer du charbon minéral

Le sable de mâchefer utilisé dans ce travail est de couleur noire provenant de la société nigérienne de charbon (SONICHAR) tamisé à 5 mm, située à Tefereyre ; 75 km au nord-ouest d'Agadez au Niger (**Figure 1**). La composition minéralogique obtenue par [13] montre que le mâchefer de la centrale de Tefereyre est un matériau silico-alumineux (**Tableau 1**).



Figure 1 : Site de production du mâchefer de Tefereyre

Tableau 1 : Composition minéralogique du mâchefer [13]

Oxydes	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	FeO	CaO
Wt%	0,95	27,21	62,32	2,58	2,15	3,57	0,5

L'analyse granulométrique (**Figure 2**) montre que le sable de mâchefer contient plus d'éléments grossiers que le sable naturel puisque le diamètre correspondant au passant 50 % est à 1,25 mm alors que celui du sable est 0,63 mm. Le sable de mâchefer a une masse volumique apparente de 770 kg/m^3 , une masse volumique spécifique $2,21 \text{ t/m}^3$ et un module de finesse de 2,71.

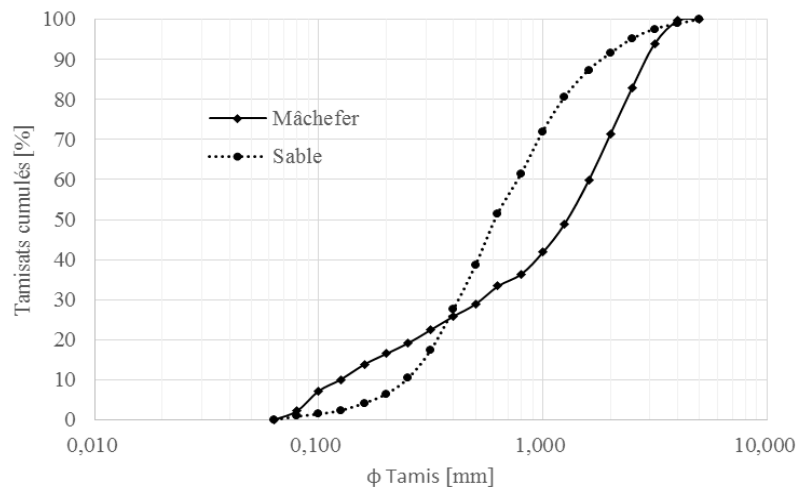


Figure 2 : Analyse granulométrique du sable naturel et du mâchefer

2-2. Méthodes

2-2-1. Préparation des éprouvettes

Cette étude a été réalisée sur huit composites contenant différentes fractions volumiques de sable de mâchefer dans le but de garder un volume constant du sable dans chaque mélange. Le **Tableau 2** présente les détails de la formulation. M0 représente le mortier de référence, M10, M20, M30, M40, M50, M75 et M100 correspondent respectivement à 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 75 % et 100 % de substitution du sable par le mâchefer du charbon minéral. Les éprouvettes cylindriques de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur sont préparées pour les essais de compression et les éprouvettes prismatiques 40 mm x 40 mm x 160 mm pour les essais de flexion. Pour la porosité, la densité sèche et la conductivité thermique ; les éprouvettes de 40 mm de diamètre et 60 mm de hauteur sont fabriquées. Les éprouvettes confectionnées sont démoulées après 24 h puis conservées dans la salle humide à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et 100 % d'humidité relative jusqu'au jour de l'essai.

Tableau 2 : Composition des différents mélanges

Mélange	M ₀	M ₁₀	M ₂₀	M ₃₀	M ₄₀	M ₅₀	M ₇₅	M ₁₀₀
Teneur volumique en mâchefer	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	75 %	100 %
Eau efficace (kg/m ³)	260	260	260	260	260	260	260	260
Ciment (kg/m ³)	520	520	520	520	520	520	520	520
Sable naturel (kg/m ³)	1560	1404	1248	1092	936	780	390	0,0
Sable de mâchefer (kg/m ³)	0	343	686	1029	1372	1716	2574	3432

2-2-2. Essais réalisés

2-2-2-1. Mesure de la masse volumique et la porosité communicante

La porosité communicante $\emptyset_{com}$ a été déterminée selon la recommandation de RILEM 49TER [14]. La masse volumique sèche M_{Sec} est évaluée en se basant sur la masse sèche et le volume apparent des éprouvettes. Les valeurs de la porosité connectée sont calculées à partir de *l'Equation (1)*.

$$\emptyset_{com} = \left(\frac{M_{sat.air} - M_{sec}}{M_{sat.air} - M_{sat.eau}} \right) * 100 \rho_{water} \quad (1)$$

Avec $M_{sat.air}$ la masse saturée dans l'air et $M_{sat.eau}$ la masse saturée dans l'eau.

2-2-2-2. Mesure de la résistance en compression

La résistance à la compression a été déterminée en appliquant une force de compression à l'aide d'une presse hydraulique INSTRONT 200KN. Les essais sont réalisés avec une vitesse de déplacement 0,25 mm/min.

2-2-2-3. Mesure de la résistance en Flexion

Le comportement à la flexion a été étudié à l'aide de la même presse hydraulique et d'un dispositif équipé de deux capteurs de déplacements LVTD. Les essais sont réalisés dans les conditions quasi statiques avec une vitesse de placement de 0,05 mm/min.

2-2-2-4. Mesure de la conductivité

La conductivité thermique a été mesurée en utilisant l'analyseur Hot disk thermal constants TPS2500S.

3. Résultats et discussion

3-1. Masse volumique apparente

La **Figure 3** présente l'évolution de la masse volumique sèche en fonction de la teneur volumique du sable de mâchefer. Les résultats montrent une diminution linéaire de la masse volumique avec l'augmentation de la teneur en mâchefer ce qui est en accord avec les résultats de la littérature [6, 10].

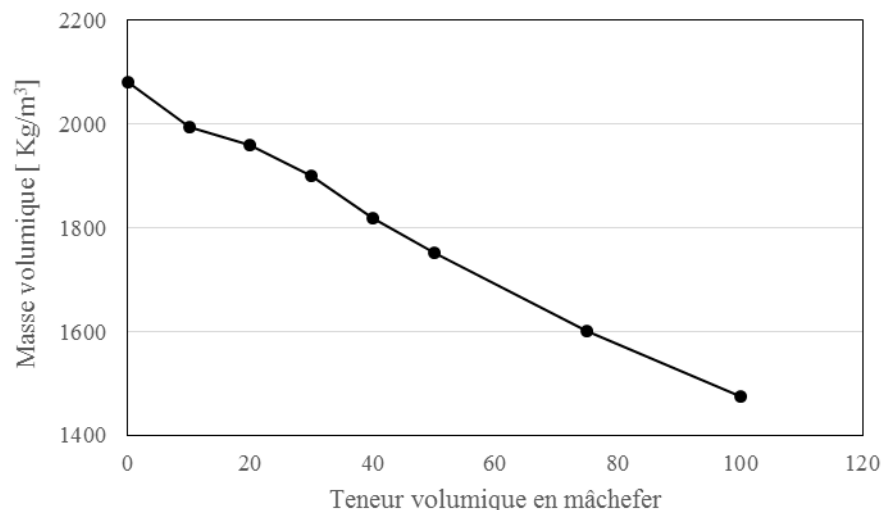


Figure 3 : Évolution de la masse volumique en fonction de la teneur en mâchefer

Les valeurs de la masse volumique diminuent de 2081 Kg/m³ pour le mortier de référence à 1475 Kg/m³ pour le mortier contenant 100 % de mâchefer. Cette diminution peut être attribuée à la faible densité de mâchefer en comparaison à celle du sable (2,2 pour le mâchefer contre 2,7 pour le sable) et à la quantité importante d'air occlus contenu dans les composites de mâchefer qui est sans doute liée à la morphologie du sable de mâchefer en emprisonnant les bulles d'air dans la matrice cimentaire lors du malaxage (**Tableau 3**).

Tableau 3 : Évolution du volume d'air occlus en fonction de la teneur en mâchefer

Mélanges	M ₀	M ₁₀	M ₂₀	M ₃₀	M ₄₀	M ₅₀	M ₇₅	M ₁₀₀
Air occlus (%)	6,8 (± 0,2)	7,45 (± 0,15)	8,0 (± 0,2)	8,3 (± 0,2)	8,5 (± 0,1)	8,8 (± 0,2)	9,2 (± 0,1)	9,9 (± 0,1)

3-2. Porosité communicante

A partir des résultats de mesure de la porosité des composites (**Figure 4**), on constate que la substitution du sable naturel par le mâchefer augmente la porosité des mortiers avec l'augmentation de la teneur en mâchefer. Cette augmentation est expliquée par la microporosité du mâchefer et la quantité importante d'air occlus dans les composites à mâchefer. Cependant on remarque aussi une diminution de la porosité à 90 jours d'âge de durcissement. Cette diminution de la porosité peut être attribuée à l'activité pouzzolanique qui se manifeste après 28 jours, et consiste à fixer la portlandite libérée par l'hydratation du ciment par la silice réactive du mâchefer pour produire de nouveaux silicates de calcium hydratés C-S-H de deuxième génération occupant un espace important de la matrice cimentaire et contribuant ainsi à l'amélioration de la résistance et de la durabilité du matériau [7].

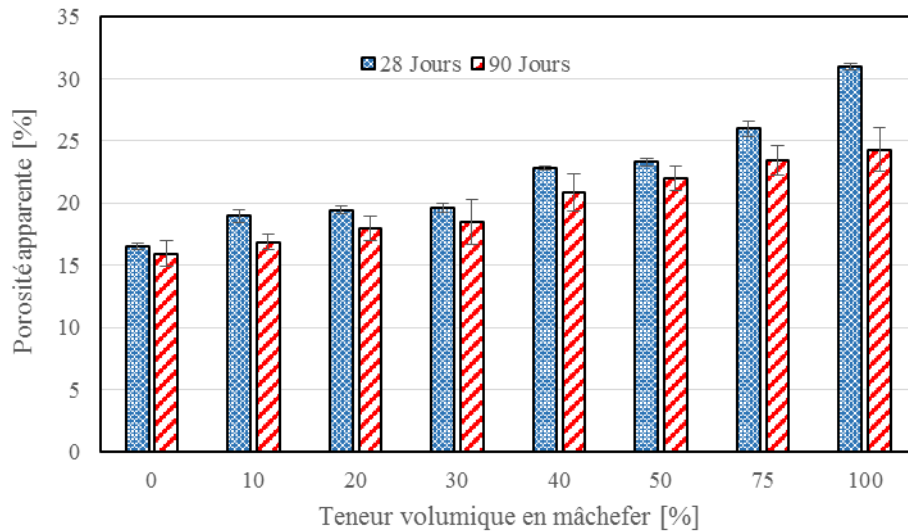


Figure 4 : Porosité communicante des différents composites

3-3. Conductivité thermique

La synthèse des résultats reportée sur la **Figure 5** présente l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en sable de mâchefer. On constate une diminution de la conductivité thermique avec l'accroissement du taux en sable de mâchefer. Pour les composites contenant 50 % et 100 % de sable de mâchefer, cette diminution atteint 43 % et 64 % respectivement et améliore les performances d'isolation thermique. Cette tendance peut être attribuée à l'augmentation de la quantité d'air occlus qui a son tour diminue la conductivité globale des composites en raison de la très faible conductivité thermique de l'air (0,024 W/mK).

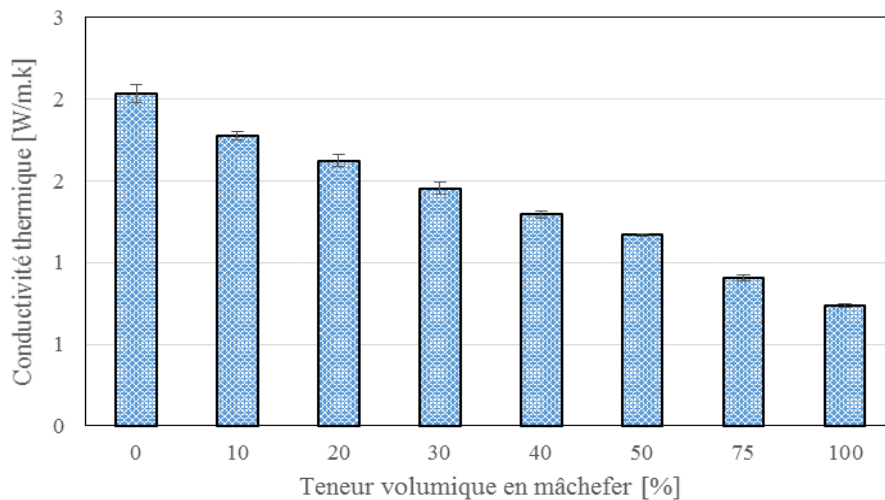


Figure 5 : Évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en mâchefer

Sur la **Figure 6**, nous avons porté la courbe relative aux conductivités thermiques pour l'ensemble des composites des différents taux de substitution en fonction de leurs masses volumiques sèches. Pour cette étude une bonne corrélation entre ces deux paramètres a été observée comparativement à celle obtenue par Kinda dans le cas des mortiers en granulats plastique [2].

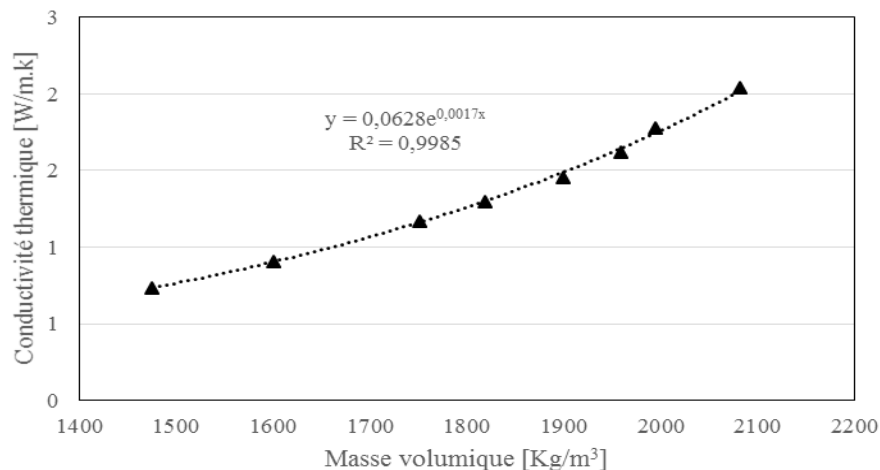


Figure 6 : Évolution de la conductivité en fonction de la masse volumique sèche

3-4. Résistance à la compression

La **Figure 7** présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur en mâchefer et de l'âge de durcissement des éprouvettes. On constate que la substitution du sable naturel par le sable de mâchefer entraîne une diminution de la résistance à la compression du mortier. Pour un taux de substitution de 50 % et 100 % à 28 jours d'âge, la résistance diminue de 21 % et 41 % respectivement en accord avec les résultats d'Aramraks [15]. Cette diminution peut être liée à l'augmentation de la quantité d'air occlus (**Tableau 3**) et de la porosité (**Figure 4**) lorsque le dosage en granulat de mâchefer augmente. Les résistances obtenues pour tous les taux de substitutions étant supérieurs 15 MPa ; ces mortiers peuvent être utilisés pour la production du béton selon la classification fonctionnelle de RILEM [16]. Cependant à 90 jours d'âge de durcissement on observe une augmentation par rapport aux éprouvettes de 28 jours d'âge. Pour des composites contenant le sable de mâchefer, on note une variation considérable par rapport au mortier témoin (**Figure 8**), 43 % pour M100 contre 17 % pour M0. Cette amélioration des composites contenant le sable de mâchefer peut être attribuée à l'activité pouzzolanique comme montré dans le paragraphe précédent.

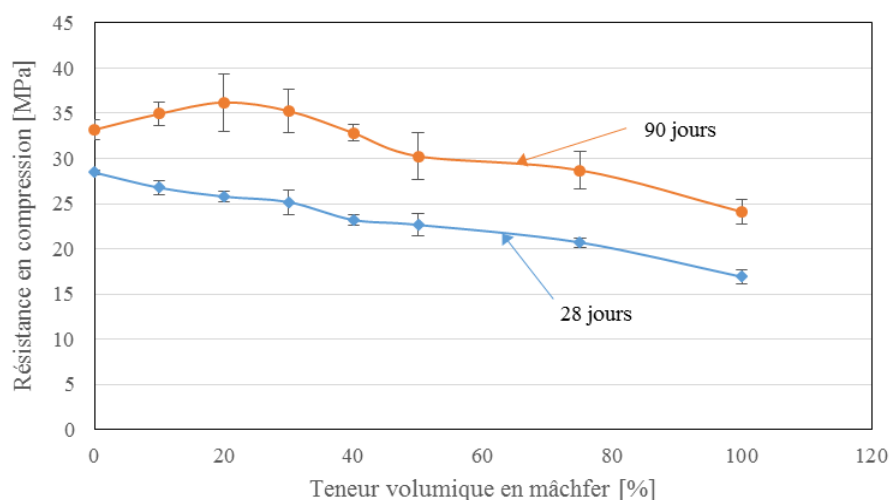


Figure 7 : Évolution de la résistance à la compression en fonction de teneur en mâchefer

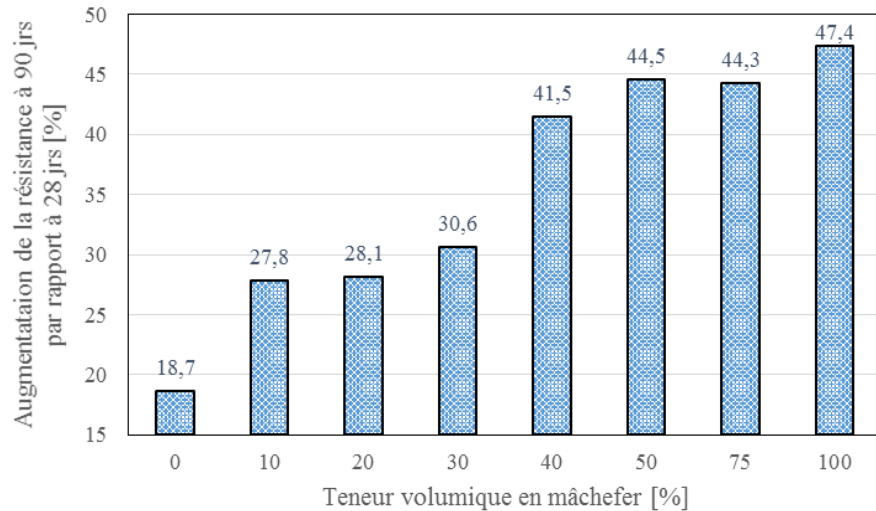


Figure 8 : *Augmentation de la résistance des composites à 90 jours par rapport à 28 jours*

3-5. Résistance à la flexion

La **Figure 9** présente les variations de la résistance en flexion des différents composites en fonction du pourcentage de sable naturel remplacé par le sable de mâchefer à 28 jours et 90 jours d'âge de durcissement. On constate que les résistances à la flexion à 28 jours et 90 jours d'âge sont presque similaires, cependant elles diminuent dès que le taux de substitution dépasse 40 %.

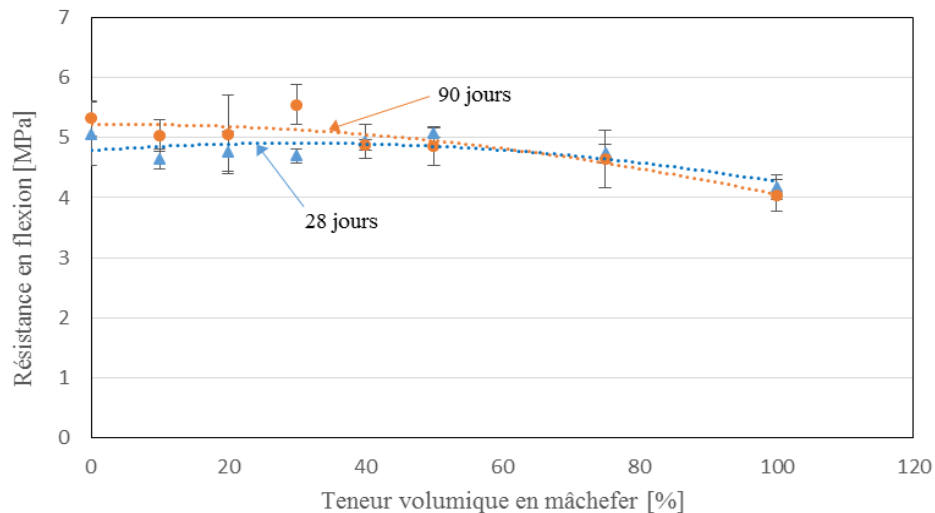


Figure 9 : *Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en mâchefer*

3-6. Comportement ductile sous chargement de compression

Sous charge de compression, les composites contenant le sable de mâchefer montrent une rupture ductile et une capacité d'absorption d'énergie de déformation plastique. Ils supportent la charge pendant quelques minutes après la rupture sans la désintégration complète comme l'illustre la **Figure 10**.

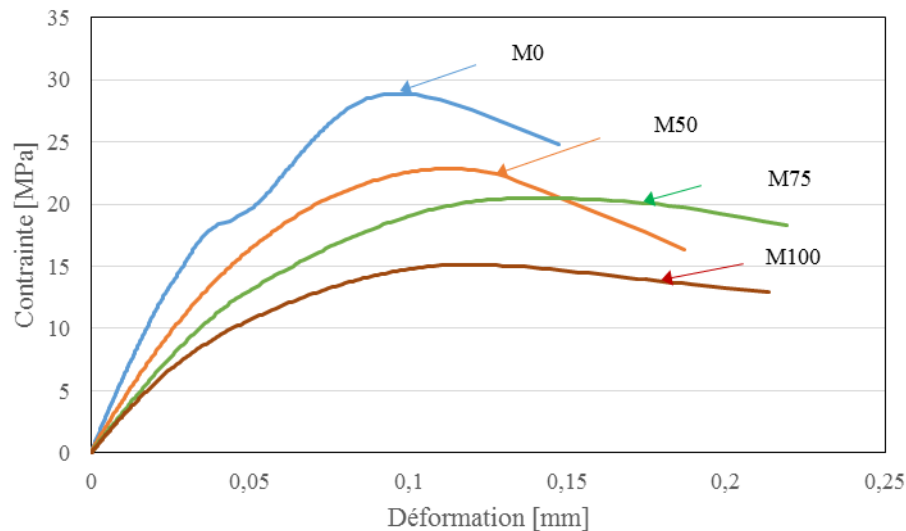


Figure 10 : *Courbes contrainte déformation obtenues après essai de compression*

4. Conclusion

Notre étude se situe dans le contexte du développement durable et porte principalement sur les potentialités de valorisations des granulats de mâcher dans les matériaux cimentaires à travers la maîtrise du comportement physico-mécanique des mortiers à base du sable de mâchefer. D'après les résultats obtenus, l'ajout du mâchefer de Tefereyre dans le matériau cimentaire comme du sable contribue à diminuer la masse volumique ouvrant ainsi un champ d'application pour la réalisation de matériaux de construction légère et la rénovation des bâtiments existants. La diminution de la masse volumique s'accompagne d'une augmentation de la porosité et de la quantité d'air occlus qui pourrait améliorer le pouvoir d'isolant thermique des différents composites. L'augmentation de la porosité entraîne à son tour une diminution de la résistance à la compression et à la flexion. Par contre à 90 jours d'âge de durcissement, on observe une diminution de la porosité en fonction de la teneur en mâchefer et une amélioration de la résistance à la compression. Toutefois, ces valeurs de la résistance en compression restent supérieures à 15 MPa et selon les recommandations de la RILEM [16], ces mortiers peuvent être utilisés pour la fabrication des bétons de structure. Les résultats du comportement ductile sous chargement de compression révèlent également une atténuation significative du risque de rupture catastrophique par propagation brutale des fissures. Néanmoins, il conviendrait de compléter cette étude par une évaluation de la perméabilité à gaz, vitesse ultrasonore, conductivité thermique et la résistance à la traction des différents composites élaborés.

Remerciements

Les auteures présentent leurs sincères remerciements au Service de Coopération et d'Action Culturelle - Togo (SCAC-Togo) et à l'office Allemand d'échanges universitaires « Deutscher Akademischer Austausch Dienst » (DAAD) pour leur soutien financier.

Références

- [1] - NICOLAS BUR, "Étude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable." Thèse de doctorat, Université de Strasbourg (2012).
- [2] - K. HANNAWI, S. KAMALI-BERNARD, and W. PRINCE, "Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates," *Waste Manag.*, Vol. 30, N° 11 (2010) 2312-2320.
- [3] - J. SIM and C. PARK, "Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate," *Waste Manag.*, Vol. 31, N° 11 (2011) 2352-2360.
- [4] - M. SINGH and R. SIDDIQUE, "Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 50 (2014) 246-256.
- [5] - M. SINGH and R. SIDDIQUE, "Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete," *Resour. Conserv. Recycl.*, Vol. 72 (2013) 20-32.
- [6] - H. K. KIM and H. K. LEE, "Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 25, N° 02 (2011) 1115-1122.
- [7] - M. CHERIAF, JC. ROCKA, and J. PERA, "Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash," *Cem. Concr. Res.*, Vol. 29 N° 09 (1999) 1387-1391.
- [8] - C. JATURAPITAKKUL and R. CHEERAROT, "Development of bottom ash as pozzolanic material," *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 15 N° 01 (2003) 48-53.
- [9] - H. KURAMA and M. KAYA, "Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 22 N° 09 (2008) 1922-1928.
- [10] - K. ARUMUGAM, R. ILANGO VAN, and D. J. MANOHAR, "A study on characterization and use of Pond Ash as fine aggregate in Concrete," *Int. J. Civ. Struct. Eng.*, Vol. 02 N° 02 (2011) 466-474.
- [11] - Norme, "NF P 15-301 Liantes hydrauliques. - Ciments courants. - Composition, spécifications et critères de conformité." (1991).
- [12] - Norme, "NF 18-598 : Granulats - Équivalent de sable." (1991).
- [13] - R. VINAI, A. LAWANE, J. R. MINANE, and A. AMADOU, "Coal combustion residues valorisation: Research and development on compressed brick production," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 40 (2013) 1088-1096.
- [14] - RILEM TC116-PCD, "Permeability of concrete as a criterion of its durability, C: Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete," *Mater. Struct.*, Vol. 32 (1999) 178-179.
- [15] - T. ARAMRAKS, "Experimental study of concrete mix with bottom ash as fine aggregate in Thailand," *Symp. Infrastruct. Dev. Environ.*, (2006) 1-5.
- [16] - RILEM LC2, "Functional classification of lightweight concrete. Recommendation LC2, second ed." (1978).