

Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Durabilité d'un ciment composé à base de mâchefer de Tefereyre (Niger): absorption capillaire, porosité accessible à l'eau et attaque acide

Durability of composite cement with Tefereyre (NIGER) coal bottom ash: Capillary absorption, porosity to water and acid attack

Nafissatou Savadogo^{a,}, Adamah Messan^a, Kinda Hannawi^b, François Tsobnang^a, William Prince Agbodjan^b*

^a *Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), Laboratoire Eco-matériaux de construction (LEMC), Rue de la Science, Ouagadougou, Burkina Faso.*

^b *Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Laboratoire Génie Civil et Génie Mécanique, Rennes, France.*

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Recu : 3 septembre 2015

Accepté : 24 décembre 2015

Mots clés:

Mâchefer de charbon

Ciment composé

Durabilité

Absorption capillaire

Keywords :

Coal bottom ash

Composite cement

Durability

Water absorption by capillarity

RESUME

Dans la présente étude, nous évaluons les caractéristiques vis-à-vis de la durabilité d'un ciment composé à base de mâchefer de charbon produit par la SONICHAR (Société Nigérienne de production d'énergie à base de charbon minéral). L'étude consiste d'abord en la détermination de l'indice d'activité pouzzolanique du mâchefer et du taux optimal à utiliser pour mettre en place un ciment composé. Par la suite une évaluation du taux d'absorption capillaire, de la porosité accessible à l'eau et à la résistance à l'attaque acide sulfurique et nitrique de mortier confectionné à base du ciment composé élaboré est effectuée. Les résultats montrent que la poudre de ce mâchefer obtenu par broyage peut substituer partiellement le ciment Portland à un taux de 15% permettant d'élaborer un ciment composé de type CEM II A selon la norme EN 197-1.

ABSTRACT

In this study, we evaluate the durability characteristics of composite cement with coal bottom ash produced by SONICHAR (Société Nigérienne de Charbon). The study firstly consists in the determination of the pozzolanic activity index of the coal bottom ash and the optimum rate to use in the composite cement. Thereafter an evaluation of capillary absorption, porosity accessible to water and resistance to sulfuric and nitric acid attack of mortar prepared made with the composite cement is performed. The results showed that the coal bottom ash powder obtained by grinding can partially substitute Portland cement at a rate of 15% enable to develop a CEM II A composite cement according to EN 197-1 Standard.

* *Corresponding author. Tel.: + +226 78504155.*

E-mail address: nafissatou.savadogo@2ie-edu.org

1 Introduction

Le béton hydraulique est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde grâce à ses performances mécaniques, sa tenue au feu et son coût compétitif dont la mise en œuvre repose principalement sur l'utilisation de ciment Portland. Cependant, la fabrication du ciment dégage une quantité importante de dioxyde de carbone (CO_2) bien connu pour son incidence sur l'effet de serre. Ce CO_2 provient de deux sources complémentaires : la dépense d'énergie liée à la nécessité de produire de très hautes températures pour réaliser le processus physico-chimique ; et le phénomène de transformation du calcaire (CaCO_3) sous l'effet de la température en chaux (CaO) et en gaz carbonique (CO_2). Plus de 60 % des émissions de CO_2 lors de la fabrication de ciment provient de ce dernier phénomène. Les émissions de CO_2 provenant de l'industrie du ciment ont été estimées à près de 5-7% des émissions mondiales de CO_2 avec 0,9 tonne de CO_2 émise dans l'atmosphère pour produire une tonne de ciment [1]. L'industrie du béton classique impacte donc notablement l'environnement.

Une des solutions alternatives à ce problème est de substituer partiellement le clinker dans le ciment Portland par des matériaux pouzzolaniques tels que la pouzzolane naturelle [2], le métakaolin [3], les déchets industriels comme la fumée de silice, les cendres volantes [4, 5], le laitier de haut fourneau [6] et la poudre de mâchefer de charbon [7, 8]. Ces additions minérales composées principalement soit de silice ou de silice et d'alumine, présentent une certaine activité chimique dite "pouzzolanique" qui leur permet de réagir avec la chaux pour former des composés semblables aux hydrates du ciment. En plus de la réduction de l'émission de CO_2 , l'utilisation des matériaux pouzzolaniques dans le ciment offre plusieurs autres avantages. D'abord, un avantage économique dû à la substitution d'une partie du ciment Portland qui est coûteux par de la pouzzolane naturelle ou des déchets industriels moins coûteux. En effet D. Bajarea et al. [9] montrent que l'utilisation du mâchefer broyé en substitution partielle au ciment permet de baisser de 9.3% le coût du ciment et donc du béton. Ensuite, ces matériaux pouzzolaniques contribuent à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des bétons grâce au développement de l'activité pouzzolanique [7, 8]. Ils permettent enfin d'améliorer certains paramètres de durabilité. Ces avantages ouvrent donc la possibilité de conversion de large quantité de déchets industriels en matériaux de construction durable et à coût compétitif [5, 10].

Des études antérieures [7, 8, 9] montrent que le mâchefer peut être utilisé comme addition dans le ciment. Cependant, son taux de réactivité varie d'un mâchefer à l'autre. Il ressort également de la littérature [3, 5] que l'utilisation des additions pouzzolaniques tels que la fumée de silice, le métakaolin etc. contribue à améliorer les caractéristiques de durabilité des ciments. Ce travail vise à étudier l'effet du mâchefer de Tefereyre produit par de la Société Nigérienne de Charbon (SONICHAR), utilisé en tant qu'addition pouzzolanique en substitution massive au ciment, sur les paramètres de durabilité. Plus spécifiquement, l'étude porte sur l'absorption capillaire, la porosité accessible à l'eau et la résistance aux attaques acides des mortiers.

2 Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux

2.1.1 Le mâchefer de charbon de Tefereyre

Le mâchefer de charbon de Tefereyre est broyé pour obtenir le passant au tamis de 80 micron car la finesse joue un rôle important dans la réactivité du mâchefer [7]. Une analyse granulométrique au laser donne la distribution granulaire de la poudre de mâchefer et du ciment utilisés sur la figure 1. On remarque que la poudre de mâchefer a une granulométrie moins fine que le ciment Portland. Les caractéristiques physiques du mâchefer sont récapitulées dans le tableau 1. Il a une masse volumique spécifique de $2,31 \text{ t/m}^3$ et une masse volumique apparente de $0,77 \text{ t/m}^3$. Ces valeurs concordent avec celles obtenues dans la littérature [11, 12]. La surface spécifique BET obtenue est de $13,89 \text{ m}^2/\text{g}$ et l'indice Los Angeles du mâchefer de charbon de Tefereyre est de 62,78%.

Des analyses chimiques (tableau 2) et minéralogiques (tableau 3) de ce mâchefer de charbon effectuées par Vinai et al [13] montrent que le taux d'éléments dangereux est dans les limites acceptables par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Des essais de lixiviation montrent aussi que les quantités des éléments détectés sont inférieures aux valeurs proposés dans la littérature [10] et la concentration des métaux lourds détectés dans le lixiviat est inférieure aux seuils proposés par les normes allemandes [14].

Des essais au DRX montrent que 61,3 % du mâchefer est en forme amorphe dû aux températures de combustion [13]. De plus l’analyse MEB comme l’analyse DRX montrent que les silices, les aluminiums et les oxydes de fer constituent environ 99% de la masse totale du mâchefer [13].

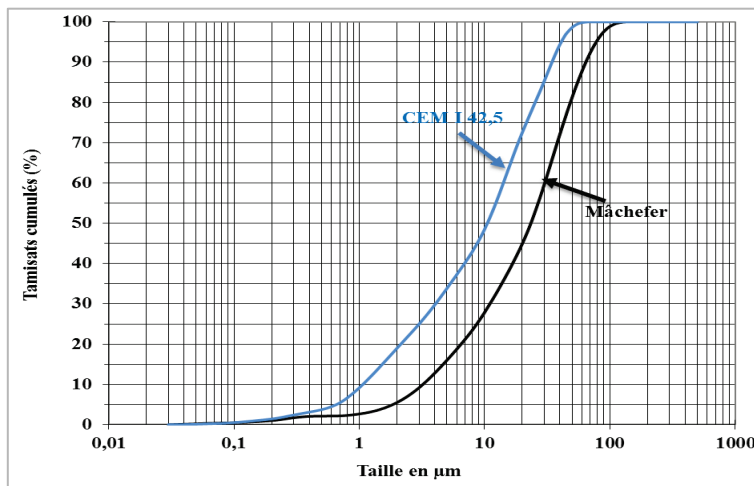


Fig. 1 - Distribution granulométrique de la cendre de mâchefer de Tefereyre et du ciment Portland CEM I

Tableau 1 - Propriétés physiques des mâchefers de Tefereyre

Essais	Normes utilisées	Résultats obtenus	Références bibliographiques
Masse volumique spécifique (t/m ³)	EN 1097-7	2,31	2,2 à 2,8 [11]
Masse volumique apparente (t/m ³)	P 94-050	0,77	0,7 à 0,9 [12]
Surface spécifique BET (m ² /g)	-	6,67	-
Indice Los Angeles (%)	NF P 18-573	62,78	-

Tableau 2 - Analyse chimique du mâchefer de Tefereyre [13]

Eléments	Mg	Al	Si	K	Ti	Fe
Wt%	1,04	27,90	59,59	5,33	2,68	3,90
At %	1,23	30,01	61,53	3,97	1,63	2,05

Tableau 3 - Composition minéralogique du mâchefer de Tefereyre [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

2.1.2 Le ciment

Le ciment utilisé pour cette étude est un CPA/CEMI 42,5 de la société CIMTOGO conforme à la norme NF P 15 – 301 dont la distribution granululaire est à la figure 1. Il a une masse volumique spécifique de $3,10 \text{ t/m}^3$, une masse volumique apparente de $1,06 \text{ t/m}^3$ et une surface spécifique BET de $1,47 \text{ m}^2/\text{g}$. Son début de prise est de 180 min.

2.1.3 Le sable

Le sable utilisé est un sable naturel disponible localement. Une analyse granulométrique effectuée sur le sable montre qu'il a une granulométrie étalée car son coefficient d'uniformité $C_u=3 > 2$ mais qu'il s'agit d'un sable mal gradué avec un coefficient de courbure $C_c=0,9$.

L'équivalent de sable [15] montre que le sable utilisé est un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses, bon pour béton de haute qualité. On obtient en effet un équivalent de sable à vue (ESV) de 81,12 et un équivalent de sable au piston (ESP) de 74,49. Sa masse volumique apparente est de $1,53 \text{ t/m}^3$, sa masse volumique spécifique est de $2,67 \text{ t/m}^3$ et son module de finesse est de 2,90.

2.2 Méthodes

Dans ce travail, tous les essais sur mortier ont été effectués sur des éprouvettes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. Le mortier est un mortier normal confectionné selon la norme EN 196-1. L'étude a consisté d'abord à la détermination de l'indice d'activité pouzzolanique du mâchefer qui a permis de trouver le taux optimal de mâchefer à incorporer dans le ciment composé. Ensuite, un essai d'analyse thermogravimétrique (ATG) est effectué sur des pâtes de ciment Portland et du ciment composé élaboré afin d'évaluer le taux de portlandite résiduel. Enfin, des essais de durabilité tels que l'absorption capillaire, la porosité accessible à l'eau et la résistance à l'attaque acide sont effectués sur le ciment composé élaboré comparativement au ciment Portland.

2.2.1 Indice d'activité

L'indice d'activité est un paramètre qui décrit quantitativement le degré de réaction dans le temps ou le taux de réaction entre un matériau pouzzolanique et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en présence d'eau [16]. Il est donné par le rapport entre la résistance à la compression d'un mortier avec p% d'ajout de mâchefer et la résistance à la compression d'un mortier témoin avec 100% de ciment.

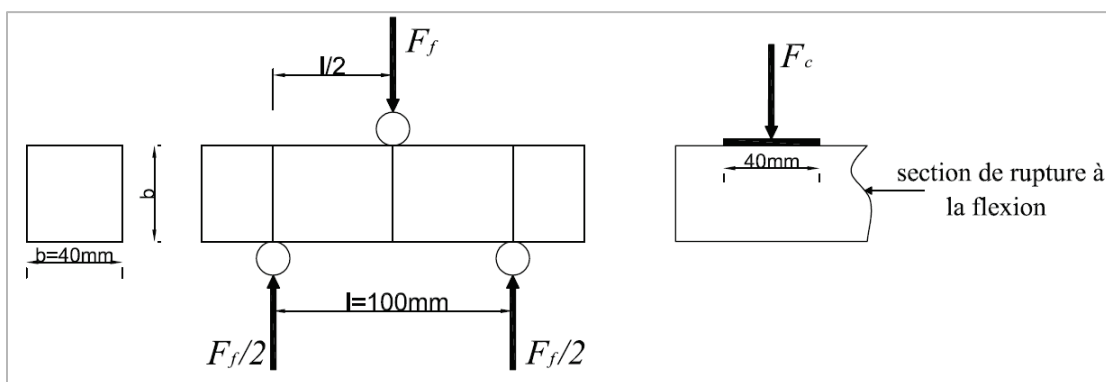


Fig 2 - Dispositif de flexion compression des éprouvettes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$

2.2.2 Taux de portlandite résiduelle

L'essai d'ATG est effectué à 28 et 90 jours d'hydratation des pâtes et le taux de portlandite est évalué en utilisant la perte de masse entre 410°C et 510°C de la courbe ATG. L'échantillon a été séché jusqu'à masse constante avant l'essai afin de s'affranchir de la variabilité qui pourrait provenir de l'état hydrique initial de l'échantillon.

La déshydratation de la portlandite se produit selon la réaction suivante :



On a donc:

$$m_{\text{Ca(OH)}_2} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} * 74}{18}$$

Or :

$$\% \text{H}_2\text{O} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{initiale}}}$$

On en déduit :

$$\% \text{Ca(OH)}_2 = \frac{m_{\text{Ca(OH)}_2}}{m_{\text{initiale}}} = \frac{1}{m_{\text{initiale}}} \cdot \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} * 74}{18} = \frac{\% \text{H}_2\text{O} * 74}{18}$$

En supposant que la portlandite est apportée essentiellement par l'hydratation du ciment et que la poudre de mâchefer de charbon est inerte, la quantité de portlandite présente dans la pâte serait proportionnelle à la quantité de ciment dans le mélange. L'évaluation du taux de portlandite dans la pâte de ciment Portland à 28 et 90 jours d'âge d'hydratation nous permet de calculer le taux théorique devant être obtenu avec le ciment composé à base de 15% de mâchefer si celui-ci était inerte. Ce taux théorique calculé est comparé au taux réel obtenu par ATG sur les pâtes pour ressortir la consommation de la portlandite dans le ciment composé.

2.2.3 Absorption capillaire

L'absorption capillaire mesure le taux d'absorption de l'eau par suctions capillaires des éprouvettes de mortier, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. Dans cette étude, l'essai est effectué selon la procédure AFPC- AFREM.

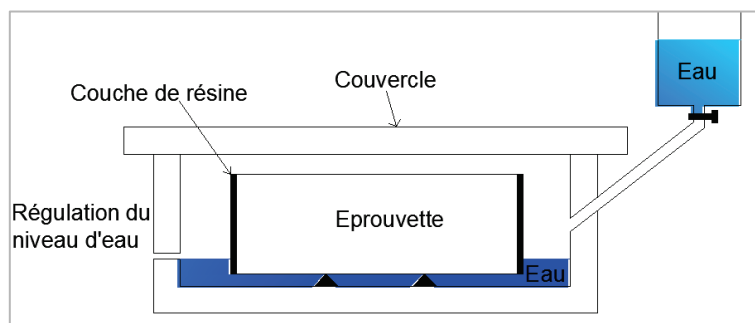


Fig. 3 - Montage expérimental pour l'essai d'absorption capillaire

L'essai d'absorption capillaire est effectué après 28 et 90 jours de cure des éprouvettes afin de voir l'effet de la réaction pouzzolanique qui est une réaction lente.

2.2.4 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau mesure le pourcentage des vides connectés avec la surface, à l'intérieur de la masse du mortier. L'essai est réalisé suivant la norme NF EN 18-459 [17] également à 28 et 90 jours de cure des mortiers.

2.2.5 Attaque acide

L'essai de la résistance à l'attaque acide a consisté à la mesure de la perte de masse d'éprouvettes de mortier immergées dans différentes solutions d'acide sulfurique (H_2SO_4) et nitrique (HNO_3). Le choix s'est porté sur ces deux acides car il s'agit des acides majoritaires trouvés dans les pluies acides [18]. Dans le but d'étudier l'influence de la concentration de l'acide sur la résistance chimique, nous avons étudié pour chaque acide deux concentrations différentes soit 3% et 5%. Les éprouvettes de mortiers sont conservées dans de l'eau saturée en chaux pendant 28 jours après leur

confection puis elles sont immergées dans les différentes solutions. La perte de masse est mesurée à 1-7- 14 -21- 28- 35- 42- 49 et 56 jours après l’immersion dans les solutions.

3 Résultats et discussions

3.1 Indice d’activité et taux optimal de substitution

Selon la norme ASTM C618 [16], le mâchefer de charbon de Tefereyre serait un matériau pouzzolanique s’il a un minimum de 67% comme indice d’activité à 28 jours avec un pourcentage de substitution de $p=25\%$. De plus le ciment composé élaboré avec ce mâchefer doit avoir un minimum de 75% comme indice d’activité.

La figure 4 montre l’évolution de l’indice d’activité à 28 jours avec le taux de substitution en masse de ciment par la poudre de mâchefer. Nous obtenons avec le taux de substitution de 25%, un indice d’activité d’environ $i=76\%$. Cette valeur étant supérieure à la limite normative (67%) [16], nous pouvons conclure que le mâchefer de Tefereyre présente une réactivité pouzzolanique.

On constate également que tous les taux de substitution vérifient la condition ($i \geq 75\%$) pour être utilisé pour la mise en place du ciment composé. Cependant le taux de 15% de substitution donne le plus fort indice d’activité à savoir environ 88%. Ce taux de 15% permet donc d’avoir la meilleure réactivité du mâchefer de Tefereyre.

Ainsi, dans la suite de l’étude, nous étudierons la durabilité d’un ciment composé à base de 15% de mâchefer soit un ciment de type de CEM II/A conformément à la norme européenne EN 197-1.

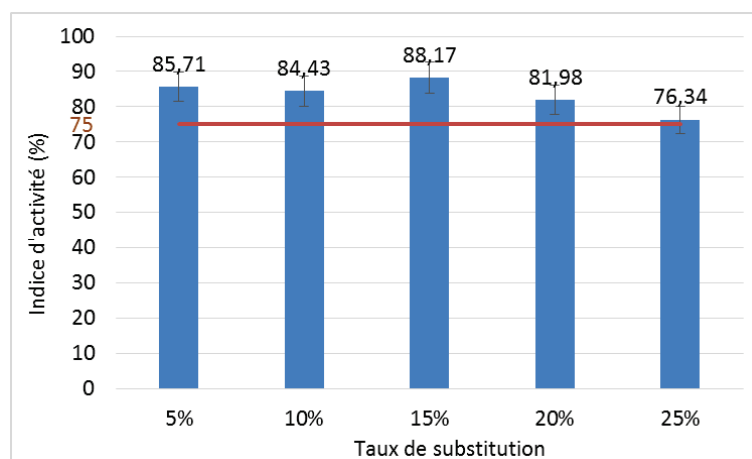
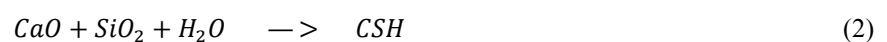


Fig. 4 - Évolution de l’indice d’activité pouzzolanique avec le taux de substitution

3.2 Taux de portlandite résiduelle

La fig. 5 montre l’évolution dans le temps du taux théorique de portlandite comparé au taux réel obtenu par ATG effectué sur la pâte du ciment composé.

On constate que le taux réel de portlandite obtenu par ATG est inférieur au taux théorique calculé autant à 28 jours qu’à 90 jours d’hydratation des pâtes. Une partie de la portlandite est donc consommée lors de l’hydratation du ciment composé à base de mâchefer. Cette consommation de portlandite est due à la réaction pouzzolanique dont l’équation chimique peut s’écrire globalement comme suit :



Comme l’on peut le voir sur la fig. 5, cette réaction s’intensifie avec le temps et se traduit par une consommation plus importante de portlandite dans la pâte. Ce résultat vient confirmer celui de l’indice d’activité et montre que le mâchefer de charbon de Tefereyre présente une réactivité pouzzolanique qui se traduit par la consommation d’une partie de la portlandite issue de l’hydratation du ciment.

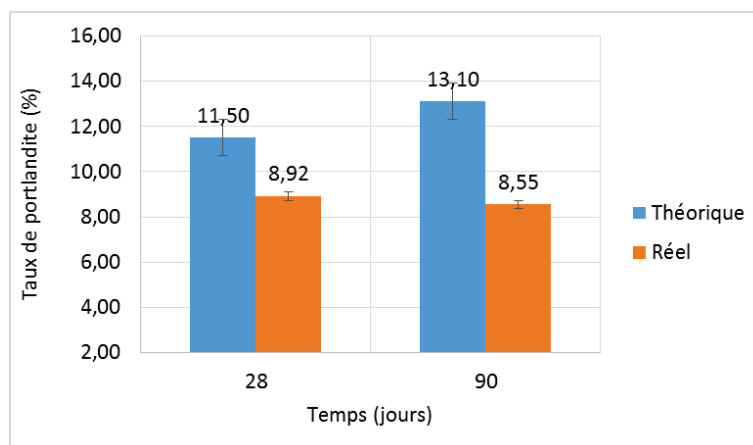


Fig. 5 - Taux théorique et réel de portlandite dans le ciment composé

3.3 Porosité accessible à l'eau

L'évaluation de l'effet de la poudre de mâchefer de charbon sur la porosité accessible à l'eau (tableau 4) montre à 28 jours de cure que le mortier témoin est moins poreux que les mortiers contenant le mâchefer de charbon. En effet, il présente une porosité de l'ordre de 10,6% contre 11,3% pour le mortier avec 15% de mâchefer.

Après 90 jours de cure, on constate que la porosité du mortier témoin n'a pas évolué par rapport à 28 jours. Par contre celle du mortier contenant 15% de mortier a baissé jusqu'à une valeur plus faible que celle du mortier témoin. En effet, nous avons 9,9% pour le mortier avec 15% de mâchefer contre 10,7% pour le mortier témoin. Cette baisse de la porosité dans le mortier contenant le mâchefer peut s'expliquer par le fait du développement de la réaction pouzzolanique qui crée des hydrates secondaires avec le temps et qui contribuent à réduire la porosité du mortier.

Tableau 4. Evolution de la porosité accessible à l'eau avec le temps et le taux de substitution

Temps de cure	Taux de substitution	
	0% mâchefer	15% mâchefer
28 jours	10,57% ± 0,17%	11,30% ± 0,09%
90 jours	10,65% ± 0,7%	9,85% ± 0,2%

3.4 Absorption capillaire

L'évaluation de l'effet du mâchefer sur l'absorption capillaire des mortiers effectuée après 28 jours de cure est représentée à la figure 6. Nous constatons que le mortier contenant 15% de poudre de mâchefer absorbe plus que le mortier témoin pendant une première phase (de 0 à 8 h) après laquelle il présente un même taux d'absorption que le mortier témoin.

L'essai d'absorption capillaire effectué à 90 jours de cure (figure 7) montre cependant que le mortier contenant 15% de poudre de mâchefer en substitution massive au ciment portland présente un taux d'absorption plus faible que le mortier témoin et cela durant tout le temps de l'essai.

Des études antérieures ont montré que les ajouts cimentaires tels les cendres volantes (FA), la fumée de silice (SF), le métakaolin (MK) peuvent soit contribuer à la réduction de l'absorption capillaire du béton [19] soit maintenir le réseau poreux au même niveau que le ciment qu'ils ont substitué [20] à travers le développement de la réaction pouzzolanique. En effet, G. Malquori [21], par une synthèse des résultats de nombreuses études menées sur les produits de la réaction pouzzolanique recense : le silicate de calcium hydraté (CSH), l'aluminate tétracalcique hydraté (C_4AH_{13}) et sous certaines

conditions : le gehlenite hydratée (C_2ASH_8), l'étringite ($3CaO.Al_2O_3.3SO_4Ca, 32H_2O$) ainsi que le monosulfo-aluminat de calcium hydraté ($3CaO.Al_2O_3.CaSO_4, 32H_2O$). Il s'agit donc de la formation des uns ou des autres de ces produits qui contribue à la réorganisation et parfois à la diminution des pores dans les mortiers avec ajout pouzzolanique.

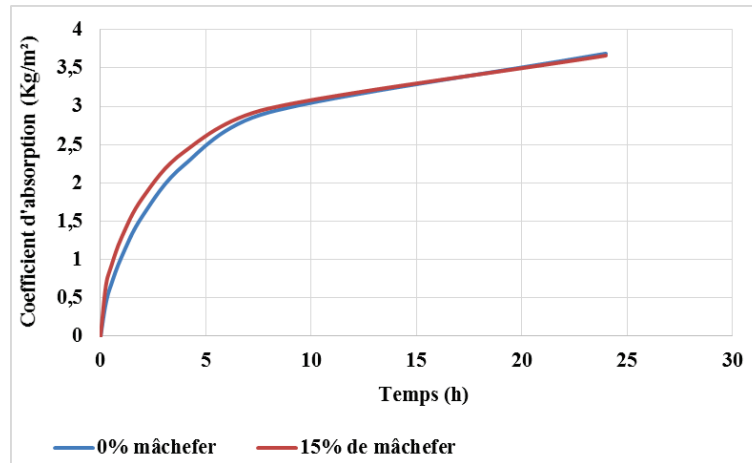


Fig. 6 - Taux d'absorption capillaire dans le temps après 28 jours de cure

Notre étude montre que l'incorporation de 15% de poudre de mâchefer de charbon de Tefereyre en substitution massique au ciment portland contribue à la réduction de l'absorption capillaire des mortiers à partir de 90 jours de cure. Cela peut s'expliquer par le fait de la réaction pouzzolanique qui en créant de nouveaux produits rend le réseau capillaire plus complexe et donc la pénétration d'eau plus lente et difficile. K. Nihat et al [22] montrent dans leur étude que la poudre de pierre ponce de Turquie et les cendres volantes contribuent à baisser l'absorption capillaire et le taux des vides dans le béton.

Cet essai vient confirmer les résultats de la porosité accessible à l'eau et montre qu'il y'a une réaction dans les mortiers au cours du temps qui permet d'améliorer le réseau poreux de ceux-ci.

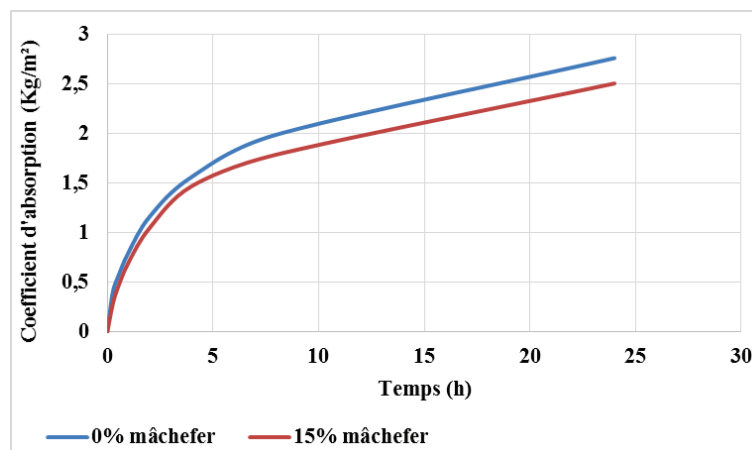


Fig. 7 - Taux d'absorption capillaire dans le temps après 90 jours de cure

3.5 Attaque acide

Les figures 8, 9, 10 et 11 montrent l'évolution de la perte de masse des mortiers immergés dans 5% et 3% d'acide sulfurique (H_2SO_4) et nitrique (HNO_3) pendant 56 jours. On constate une perte de masse permanente des mortiers au cours du temps dans les différentes solutions d'acide dont la sévérité augmente avec le taux d'acide et le temps.

D’après I. Mouallif et al. [23] cette perte de masse est due à un phénomène de lixiviation qui s’accroît avec le temps. En effet on constate que la perte de masse est faible aux jeunes âges d’immersion par rapport aux âges plus avancés. Nous obtenons par exemple pour le mortier témoin après 28 jours dans la solution de 3% d’acide sulfurique, une perte de masse d’environ 8% qui passe à environ 25% à 45 jours d’immersion.

Toutefois, nous remarquons que le mortier contenant le mâchefer présente une meilleure résistance aux acides que le mortier témoin. Cela peut s’expliquer par le faible taux de portlandite dans ces mortiers par rapport au mortier témoin comme nous l’avons vu avec l’essai d’ATG. En effet, la portlandite est le constituant le plus soluble dans le mortier donc le premier à se lixivier lors de l’attaque acide. La réduction de la perte de masse du mortier avec l’ajout de la poudre de mâchefer peut aussi s’expliquer par le fait de la baisse de la perméabilité de celui-ci qui ralentit la pénétration de la solution agressive.

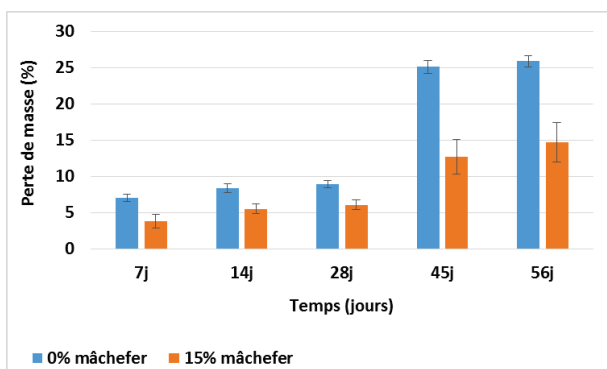


Fig. 8 - Attaque de 3% d'acide sulfurique

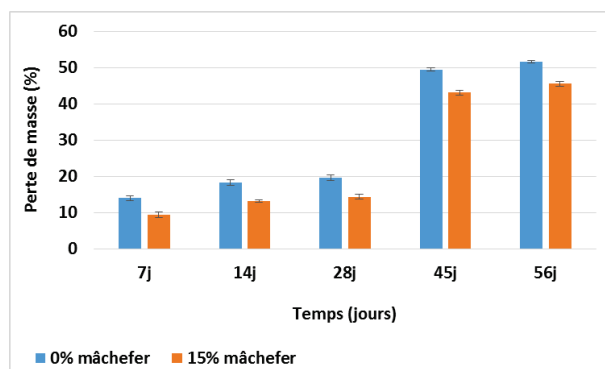


Fig. 9 - Attaque de 5% d'acide sulfurique

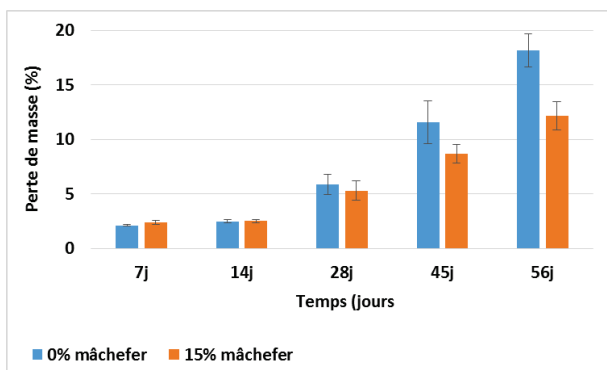


Fig. 10 - Attaque de 3% d'acide nitrique

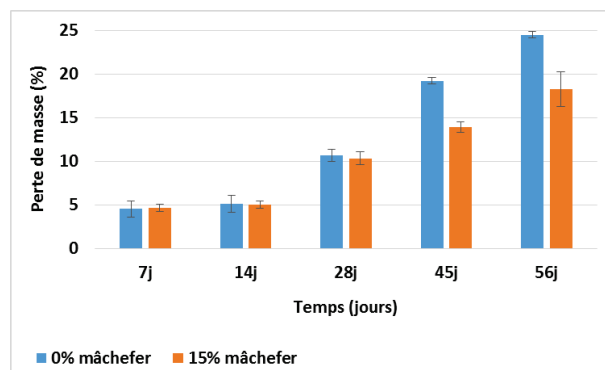


Fig. 11 - Attaque de 5% d'acide nitrique

Les résultats montrent également que la sévérité de l’attaque de l’acide sulfurique est plus élevée que celle de l’acide nitrique. Cela s’expliquerait par le fait que lors de l’attaque de l’acide sulfurique, en plus du phénomène de lixiviation, il y aurait formation d’ettringite expansive dans les pores du mortier entraînant l’apparition de fissures [18, 23]. La figure 9 montre l’expansion du mortier après 45 jours dans l’acide sulfurique.

Le mécanisme d’attaque serait comme suit : l’acide réagit avec l’hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ (portlandite) pour donner naissance au sulfate de calcium (équation 3), par la suite le sulfate de calcium hydraté qui est le gypse réagit avec les aluminates tricalcique (C₃A) non hydraté pour former l’ettringite (équation 4) [23].

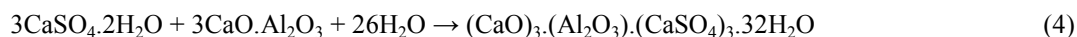




Fig. 12 - Fissurations du mortier dans l'acide sulfurique dues à la formation de produits expansifs

4 Conclusion

L'un des défis les plus importants pour le développement en Afrique est lié à un déficit de l'habitat et des infrastructures durables. Ce déficit est principalement dû au coût élevé des matériaux de construction et à la pauvreté. La valorisation des sous-produits industriels disponibles localement dans le secteur de la construction de l'habitat est une façon durable de résoudre le problème de déficit de l'habitat et de réduire le coût des matériaux de construction en Afrique.

La présente étude montre que le résidu des activités de la SONICHAR, le mâchefer de charbon minéral peut être utilisé comme addition cimentaire en substitution massive au ciment Portland à un taux optimal de 15%. Le ciment composé ainsi mis en place obtient à 28 jours environ 88% de la résistance du ciment Portland. Ce ciment présente également un taux en portlandite plus faible par rapport au ciment Portland dû à la baisse du taux de ciment dans le mélange et à la réaction pouzzolanique entre le mâchefer et la portlandite.

Nous voyons dans cette étude que le ciment composé mis en place présente de meilleures caractéristiques vis-à-vis de la durabilité que le ciment Portland. En effet, nous constatons que le caractère pouzzolanique du mâchefer de Tefereyre confère au ciment élaboré une meilleure distribution porale lui permettant d'être moins perméable à l'eau surtout aux âges plus avancés (90 jours). Aussi, le ciment élaboré présente une meilleure résistance aux attaques d'acide sulfurique et nitrique. Les matériaux cimentaires à base de ce ciment composé élaboré présenteront une meilleure durabilité vis-à-vis des pluies acides que ceux réalisés avec le CEM I.

REFERENCES

- [1]- B. Emad, Z. Gholamreza, S. Ezzatollah, B. Alireza, Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *J. Cleaner Prod.* 51(2013) 142-161.
- [2]- B. Mokhtaria, K.A. Fatiha, S. Abdelaziz, Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle. *Revue Nature et Technologie* 1(2009) 63-73.
- [3]- T. Rikioui, A. Taфраoui, S.L.E.A. Mekkaoui, Emploi du métakaolin de la région sud-ouest d'Algérie dans la formulation du béton économique. 2011.
- [4]- F. Ayrinhac, Valorisation des cendres volantes de chaudière à lit fluidisé circulant dans la filière du génie civil. 2005.
- [5]- M.M. Hosseini, Y. Shao, J.K. Whalen, Biocement production from silicon-rich plant residues : Perspectives and future potential in Canada. *Biosystems Eng.* 2011.
- [6]- G. Elke, Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests. *Cement Concrete Res.* 42(11) (2012) 173–185.
- [7]- M. Cheriaf, J. Cavalcante, R.J. Pera, Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. *Cement Concrete Res.* 29(1999) 1387–1391.
- [8]- K. Haldun, K. Mine, Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture. *Constr. Build. Mater.* (2007) 1922-1928.
- [9]- B. Diana, B. Girts, U. Liga, Coal Combustion Bottom Ash as Microfiller with Pozzolanic Properties for Traditional Concrete. *Procedia Eng.* 157(2013) 149-158.
- [10]- P. Asokan, S. Mohini, S.R. Asolekar, Coal combustion residues – environmental implications and recycling potentials. *Resources, Conservation and Recycling* 43(2005) 239–262.
- [11]- R. Siddique, Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials. *Resources,*

- Conservation and Recycling, 54(2010) 1060–1066.
- [12]- J. Rogbeck, Knutz, Coal bottom ash as light fill material in construction. *Agement*, 16(13) 125-128, 1996.
- [13]- R. Vinai, A. Lawne, J.R. Minane, A. Amadou, Coal combustion residues valorisation: Research and development on compressed brick production. *Constr. Build. Mater.* 40(2013) 1088 - 1096.
- [14]- R. Meij, W.H. Tamboer, Field leaching of bricks and concrete containing coal fly ash. In: International ash utilisation symposium, Center for Applied Energy research, n° 197, 22–24 October 2001.
- [15]- Norme, NF 18-598 : Granulat - Equivalent de sable, 1991.
- [16]- Norme, ASTM Standard, C618-08a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, West Conshohocken, PA: Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, 2008.
- [17]- Norme, NF EN 18-459 : Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique, 2010.
- [18]- C. Meng-Cheng, W. Kai, X. Li, Deterioration mechanism of cementitious materials under acid rain attack. *Eng. Failure Analysis* 27(2012) 272-285.
- [19]- S.N. Rackel, Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash, Toulouse: Université de Toulouse, 2011.
- [20]- Bessa, Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers, 2004.
- [21]- G. Malquori, Portland-Pozzolan Cement, *International Symposium on the Chemistry of Cement*, 2(1) (1960) 983-1006.
- [22]- K. Nihat, T.M. Mansur, B.K. Ahmet, O. Didem, Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials. *Constr. Build. Mater.* 85(2015) 1–8.
- [23]- I. Mouallif, S. Asfar, A. Latrach, M. Chergui, N. Barbe, Influence du vieillissement sulfatique sur la résistance mécanique et la microstructure du béton, 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, 2013.