



**HAL**  
open science

## Evaluation de la réactivité pouzzolanique des cendres de mâchefer en vue de l'élaboration d'un ciment composé : cas du mâchefer de tefereyre au Niger

N Savadogo, A Messan, F Tsobnang, William Prince-Agbodjan

### ► To cite this version:

N Savadogo, A Messan, F Tsobnang, William Prince-Agbodjan. Evaluation de la réactivité pouzzolanique des cendres de mâchefer en vue de l'élaboration d'un ciment composé : cas du mâchefer de tefereyre au Niger. Conférence Matériaux 2014 - Colloque Ecomatériau, Nov 2014, Montpellier, France. hal-01144429

**HAL Id: hal-01144429**

**<https://enpc.hal.science/hal-01144429>**

Submitted on 21 Apr 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Evaluation de la réactivité pouzzolanique des cendres de mâchefer en vue de l'élaboration d'un ciment composé : cas du mâchefer de tefereyre au Niger

N. SAVADOGO<sup>1,\*</sup>, A. MESSAN<sup>1</sup>, F. TSOBNANG<sup>1,2</sup> and W. P. AGBODJAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LEMC-2iE, Laboratoire Eco-Matériaux de Construction, Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 01 BP 594 Ouagadougou 01, Burkina Faso.

<sup>2</sup> LMSMC-ISMANS, Laboratoire de Mécanique des Structures et des Matériaux Composites, Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, Le Mans, France.

<sup>3</sup> Laboratoire de génie civil à l'INSA de Rennes, France.

\*email: [nafissatou.sawadogo@2ie-edu.org](mailto:nafissatou.sawadogo@2ie-edu.org)

### RESUME :

*Le mâchefer de charbon minéral est un résidu industriel généré par la combustion du charbon minéral dans les centrales thermiques et les chaudières industrielles. Dans cette étude, nous travaillons sur l'utilisation comme addition dans le ciment composé du mâchefer de charbon résultant de la combustion du charbon, extrait à Tefereyre, dans une centrale thermique au Niger. Pour cela, des essais mécaniques de compression sur des éprouvettes de mortier de 40x40x160 mm<sup>3</sup> et des essais chimiques d'ATG et de DRX sur des pâtes de mâchefer et de chaux sont réalisées. Les essais de compression ont permis d'évaluer l'indice d'activité pouzzolanique selon la norme ASTM C618 qui est d'environ 71% à 28 jours. L'essai d'ATG permet de constater qu'il y'a une réaction entre le mâchefer et la chaux qui conduit à la création de nouveaux composés. L'analyse DRX confirme les résultats de l'essai d'ATG et le nouveau composé formé serait du CSH.*

### ABSTRACT:

*The coal bottom ash is an industrial waste generated by the combustion of coal in power plants and industrial boilers. In this study, we work on the use as an addition in composite cement of coal bottom ash resulting from the combustion of coal extracted at Tefereyre in a thermal power plant in Niger. For this, mechanical compressive test on 40x40x160 mm<sup>3</sup> of mortar specimens and chemical test of TGA and XRD on pastes of lime and bottom ash are performed. Compressive tests were used to evaluate the pozzolanic activity index according to ASTM C618 which is about 71% at 28 days. The TGA test reveals that there's a reaction between the bottom ash and the lime given new compounds. The XRD analysis confirms the results of ATG test and the new compound formed would be CSH.*

**MOTS-CLÉS :** *déchet industriel, mâchefer de charbon minéral, résistance mécanique, activité pouzzolanique, ciment composé.*

**KEYWORDS:** *industrial waste, coal bottom ash, mechanic resistance, pozzolanic activity, composite cement*

## 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 ( $\text{CO}_2$ ) bien connu pour son incidence sur l'effet de serre. Ce  $\text{CO}_2$  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 ( $\text{CaCO}_3$ ) sous l'effet de la température en chaux ( $\text{CaO}$ ) et en gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ). Plus de 60 % des émissions de  $\text{CO}_2$  lors de la fabrication de ciment provient de ce dernier phénomène. L'émission mondiale de  $\text{CO}_2$  de l'industrie cimentière est estimée à 375 millions de tonnes en 2007 soit 7% des émissions mondiales de  $\text{CO}_2$  [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 tels que la fumée de silice et les cendres volantes [4,5], le laitier de haut fourneau [6] et les cendres 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 semblable aux hydrates du ciment. En plus de la réduction de l'émission de  $\text{CO}_2$ , l'utilisation des matériaux pouzzolaniques dans le ciment offre plusieurs autres avantages. D'abord nous avons un avantage économique dû à la substitution d'une partie du ciment Portland qui est coûteux par de la pouzzolane naturelle et 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 de béton classique avec le ciment Portland. Ensuite, ces matériaux pouzzolaniques contribuent à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des bétons grâce au développement de l'activité pouzzolanique [7,8]. 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].

Dans le cas du mâchefer de charbon, le premier travail a été réalisé en 1999 par Cheriaf et al [7] sur du mâchefer produit au Brésil. Ces auteurs ont étudié la possibilité d'utiliser la fraction fine (passant au tamis de 75  $\mu\text{m}$ ) du mâchefer en tant qu'addition minérale dans le ciment. Ils ont obtenu un indice d'activité pouzzolanique  $i = 88\%$  qui augmente de 27% avec un broyage adéquat afin d'augmenter la finesse du mâchefer. En 2007, Haldun Kurama et al [8] montrent que le mâchefer produit en Turquie utilisé en substitution partielle au ciment avec un taux de substitution de 10% permet d'augmenter la résistance à la compression d'environ 6% par rapport au ciment ordinaire. En 2013, Bajare et al [9] montrent que le mâchefer broyé peut effectivement substituer jusqu'à 20% d'un ciment, sans réduire la classe de résistance de ce ciment.

Ces études antérieures montrent donc que le mâchefer peut être utilisé comme addition dans le ciment. Cependant, son taux de réactivité varie d'un mâchefer à l'autre. Dans cette étude, nous abordons l'utilisation du mâchefer de charbon qui provient de la Société Nigérienne de Charbon (SONICHAR). De par son activité de production d'énergie à base de charbon minéral extrait à TEFEREYRE, la SONICHAR rejette dans la nature plus de 150 000 tonnes de mâchefer de charbon chaque année qui constitue de nos jours un problème environnemental sérieux. Compte tenu de la grande quantité de stock de ce déchet industriel de nos jours (3 millions de tonnes), le but ultime de cette étude est d'aider à trouver une solution durable à la fois pour les problèmes de

l'environnement générés par la SONICHAR et la nécessité cruciale de maisons confortables et abordables au Niger et dans la sous-région tout en contribuant à réduire la pollution due à la production du ciment.

## 2. MATERIAUX ET METHODES

### 2.1. MATERIAUX

#### 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]. Le tableau1 donne les caractéristiques physiques du mâchefer utilisé. Il a une masse volumique spécifique de 2,31 t/m<sup>3</sup> et une masse volumique apparente de 0,77 t/m<sup>3</sup>. Ces valeurs concordent avec celles obtenues dans la littérature [11,12]. La surface spécifique BET obtenue est de 13,89 m<sup>2</sup>/g et l'indice Los Angeles du mâchefer de charbon de Tefereyre est de 62,78%.

Des analyses chimiques et minéralogiques du 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 exemples 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]. Ainsi, le danger dû aux métaux lourds est principalement la possibilité d'accumulation dans l'organisme humain.

Des essais au DRX montrent que 61,3 % du mâchefer est en forme amorphe dû aux températures de combustion. 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.

Tableau 1: Propriétés physiques des mâchefers de Tefereyre

Essais	Normes utilisées	Résultats obtenus	Références bibliographiques	
Masse volumique spécifique (t/m <sup>3</sup> )	EN 1097-7	2,31	2,2 à 2,8	[11]
Masse volumique apparent (t/m <sup>3</sup> )	P 94-050	0,77	0,7 à 0,9	[12]
Surface spécifique BET (m <sup>2</sup> /g)	-	13,89	-	-
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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	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 CPA45 de la société CIMTOGO conforme à la norme NF P 15 - 301. Il a une masse volumique spécifique de 3,56 t/m<sup>3</sup>, une masse volumique apparente de 1,06 t/m<sup>3</sup> et une surface spécifique BET de 2,96 m<sup>2</sup>/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  $C_u=3 > 2$  mais qu'il s'agit d'un sable mal gradué car  $C_c=0,9$ .

L'équivalent de sable [15] nous 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 t/m<sup>3</sup>, sa masse volumique spécifique de 2,67 t/m<sup>3</sup> et son module de finesse est de 2,90.

## 2.2. METHODES

Selon la norme ASTM C618 [16], un matériau est considéré comme pouzzolanique si :

- Sa composition chimique vérifiée :  $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$
- Son indice d'activité  $i$  est :  $0,67 < i < 1$

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  $Ca(OH)_2$  en présence d'eau [16]. L'indice d'activité est déterminé à travers des essais mécaniques de compression sur des éprouvettes de mortier 40x40x160 mm<sup>3</sup>. 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.

$$i = \frac{R_p}{R_0} \quad (1)$$

Avec

$i$  = indice d'activité pouzzolanique

$R_p$  = résistance à la compression du mortier avec p% de mâchefer en masse de ciment

$R_0$  = résistance à la compression du mortier témoin avec 100% de ciment.

Ainsi, après la caractérisation minéralogique du mâchefer tableau 3, l'étude a consisté à l'évaluation de son indice d'activité pouzzolanique.

Par la suite, un suivi de l'hydratation de pâtes de mâchefer et de chaux par Analyse Thermogravimétrique (ATG) et par Diffractométrie aux Rayons X (DRX) nous permettra de mettre en évidence qu'il y'a effectivement une réaction entre le mâchefer et la chaux en présence d'eau à température ambiante.

Les essais d'ATG et de DRX sont effectués sur des pâtes plastiques de mélange chaux – mâchefer à 28 et 90 jours de cure des pâtes.

### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 3.1. EVALUATION DE L'INDICE D'ACTIVITE

A partir de la caractérisation minéralogique du mâchefer tableau 3, on constate que le mâchefer de Tefereyre est composé à environ 93% d'alumine  $Al_2O_3$ , d'oxyde de silice  $SiO_2$  et d'oxyde de fer  $Fe_2O_3$ .

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  $p=25\%$ . La figure 1 montre l'évolution dans le temps de l'indice d'activité obtenue avec un taux de substitution de 25% en masse de ciment par le mâchefer.

Nous obtenons à 28 jours d'âge un indice d'activité d'environ  $i=70,91\%$ . Cette valeur étant supérieure à la limite normative (67%) [16], nous pouvons conclure que le mâchefer de Tefereyre présente une réactivité pouzzolanique.

Nous observons également une augmentation de cet indice d'activité dans le temps. Il passe d'environ 71% à 28 jours à environ 76% à 45 jours et à approximativement 85% à 56 jours. Cette évolution attendue est attribuée au développement de la réaction pouzzolanique.

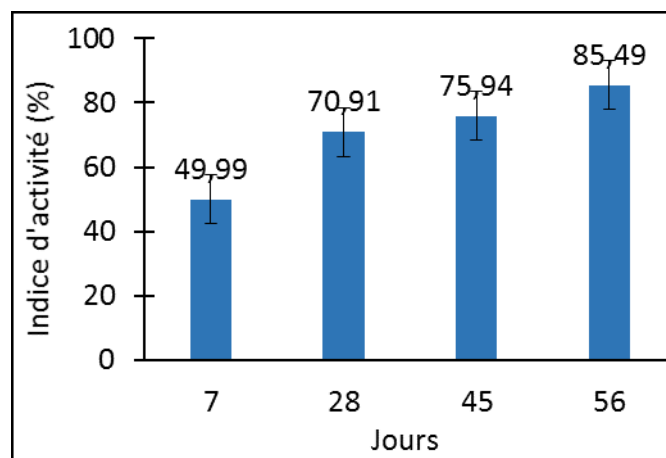


Figure 1 : Evolution de l'indice d'activité dans le temps avec un taux de substitution de 25%

### 3.2. SUIVI DE L'HYDRATATION DE PATES DE MACHEFER ET DE CHAUX PAR ATG

L'analyse combinée des courbes dTG de la chaux, du mâchefer et du mélange à 50% des deux figure 2 nous montre qu'il y'a une réaction entre la chaux et le mâchefer de Tefereyre. Cette réaction qui est faible à 28 jours prend de l'ampleur avec le temps à 90 jours.

On constate une baisse de plus de moitié du pic de la chaux dans le mélange à environ 450°C qui ne pas peut donc être expliquée que par le fait de la dilution. En effet, la perte de masse à cette température est passée d'environ 11,99% dans la chaux simple à environ 4,55% dans le mélange à 28 jours d'âge. A 90 jours d'âge cette perte de masse est d'environ 3,26% dans le mélange.

Nous observons aussi l'apparition d'un dôme à environ 170°C qui peut s'expliquer par la formation d'un nouveau composé tel que les CSH, ou les AFm. Ainsi, Il y'aurait donc une réaction entre une partie de la chaux et le mâchefer. L'augmentation du dôme du nouveau composé et la baisse de la quantité de chaux dans le mélange à 90 jours montrent que cette réaction se poursuit dans le temps.

Le pic observé à environ 600 à 700°C serait de la calcite  $\text{CaCO}_3$  résultant de la carbonatation de la chaux. Cette carbonatation se poursuit également avec le temps

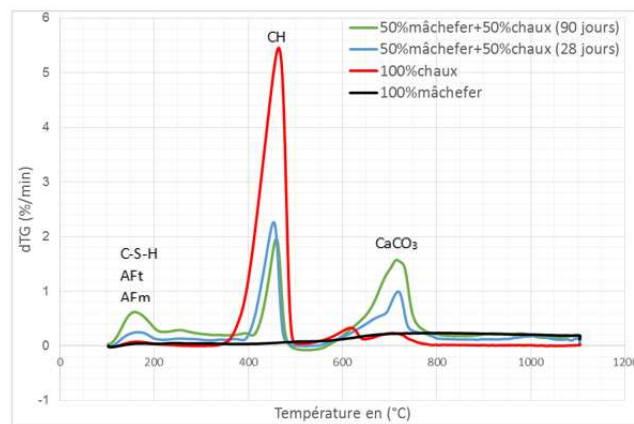


Figure 2: Suivi d'hydratation de pâte chaux-mâchefer par ATG

### 3.3. SUIVI DE L'HYDRATATION DE PATES DE MACHEFER ET DE CHAUX PAR DRX

L'analyse combinée des diffractogrammes de la chaux, du mâchefer et du mélange à 50% des deux, figure 3, confirme les résultats obtenues par l'essai d'ATG.

En effet, la disparition du fond amorphe ( $2\theta$  entre 16 et 32) présent dans le mâchefer au niveau du mélange montre que le mâchefer a réagi avec la chaux.

Nous observons également que cette réaction a conduit à la formation d'un composé peu cristallin par l'apparition d'un fond amorphe à  $2\theta=12$ . Ce fond amorphe peut être attribué aux CSH car ceux-ci possèdent un faible degré de cristallisation.

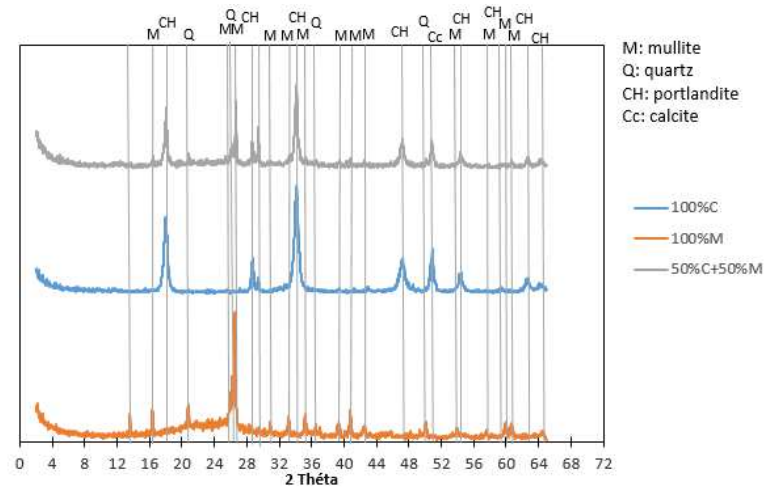


Figure 3: Suivi d'hydratation de pâte chaux-mâchefer par DRX

#### 4. CONCLUSION

Ce travail a consisté à la mise en évidence de la réactivité pouzzolanique du mâchefer de charbon de Tefereyre à travers la détermination de son indice d'activité pouzzolanique, le suivi de l'hydratation de pâte de mâchefer et de chaux par ATG et DRX.

La caractérisation minéralogique du mâchefer de Tefereyre montre que la somme  $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 = 93\% > 70\%$ .

L'évaluation de l'indice d'activité pouzzolanique du mâchefer nous permet de conclure que le mâchefer de charbon de Tefereyre serait un matériau pouzzolanique. Nous obtenons en effet un indice d'activité pouzzolanique à 28 jours de  $71\% > 67\%$ .

Le suivi des pâtes par ATG montre que le mâchefer de charbon réagit avec la chaux à température ambiante et cette réaction donne de nouveaux composés.

L'analyse des résultats de la DRX confirme ceux obtenus par l'ATG et montre que les produits formés lors de la réaction entre le mâchefer et la chaux serait des silicates de calcium hydraté (CSH).



## REFERENCE

- [1] W. Ernst, P. Lynn, H. C et O. L., «Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry,» *Annual Review of Energy and Environment*, vol. 26, pp. 303-329, 2001.
- [2] B. Mokhtaria, K. A. Fatiha et S. Abdelaziz, «Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle,» *Revue Nature et Technologie*, vol. 01, p. 63 à 73, Juin 2009.
- [3] T. Rikioui, A. Tafraoui et 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] 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 and Concrete Research*, vol. 42, n° %11, p. 173–185, January 2012 .
- [6] M. H. Mahsa, S. Yixin et J. K. Whalen, «Biocement production from silicon-rich plant residues : Perspectives and future potential in Canada,» *Biosystems Engineering*, 2011.
- [7] M.Cherif, J.Cavalcante et R. J.Pera, «Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash,» *Cem. Concr. Res.* 29, p. 1387–1391, 1999.
- [8] K. Haldun et K. Mine, «Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture,» *Construction and Building MATERIALS*, pp. 1922-1928, 2007.
- [9] B. Diana, B. Girts et U. Liga, «Coal Combustion Bottom Ash as Microfiller with Pozzolanic Properties for Traditional Concrete,» *Procedia Engineering*, n° %157, pp. 149-158, 2013.
- [10] P. Asokan, S. Mohini et R. A. Shyam, «Coal combustion residues – environmental implications and recycling potentials,» *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 43, 239–262, 2005.
- [11] R. Siddique, «Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials,» *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 54, 1060–1066, 2010.
- [12] J.Rogbeck, Knutz et e. Al., «Coal bottom ash as light fill material in construction,» *agement*, Vol. 16, Nos 1 3, pp. 125-128, 1996.
- [13] R. Vinai, A. Lawne, J. R. Minane et A. Amadou, «Coal combustion residues valorisation: Research and development on compressed brick production,» *Construction and Building Materials* 40 1088 - 1096, 2013.
- [14] R. Meij, K. E et 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 : Granulats - Équivalent 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.