



Influence du rapport E/C sur les propriétés mécaniques du mortier à base du sable de mâchefer

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : Génie Civil

Présenté et soutenu publiquement le 29 Octobre 2015 par

Christian RAMADJI

Travaux dirigés par : Pr François TSOBNANG, Enseignant-chercheur à 2iE
Dr Adamah MESSAN, Enseignant-chercheur à 2iE
Yaovi Edem BAITE, Doctorant à 2iE

Laboratoire Eco-Matériaux de Construction (LEMC/2iE)

Jury d'évaluation du stage :

Président: Dr Adamah MESSAN

Membres et correcteurs :

Koffi Agbévidé KOKOLE

Yasmine Binta TRAORE

Césaire HEMA

Promotion [2014/2015]

CITATIONS

« *Les portes de l'avenir sont ouvertes à ceux qui savent les pousser* » **Coluche**

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire Eco-Matériaux de Construction (LEMC) à l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). Il a été passionnant mais également ardu, tout ceci constitue une belle expérience et je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont accordé leur soutien pour la réalisation de ce mémoire.

J'adresse mes remerciements au professeur **François TSOBNANG** pour ses conseils et orientations.

Je tiens à remercier particulièrement mon directeur de mémoire **Dr Adamah MESSAN**, Maître-Assistant à 2iE, mon maître de stage **Mr Yaovi Edem BAITE**, doctorant à 2iE pour la confiance qu'ils ont placée en moi. Leurs recommandations, remarques et orientations ont conduit à l'élaboration de ce document.

J'adresse mes remerciements à **Mr Agbévidé Koffi KOKOLE**, à **Mr Salifou KABORE** et à toute l'équipe du laboratoire LEMC/2iE pour leur accueil et leur disponibilité durant toute la période de stage.

Mes remerciements à mes collègues de stage, **COULIBALY S. Maïmouna**, **HOULJAKBE H. Dagou**, **RASOLOFONIRINA T. Johanesa** et **TUYISHIME Honoré** pour le soutien durant le stage.

Mes remerciements à tout le corps professoral de 2iE pour toutes ces années de formation de qualité

Mes remerciements à **Mr Adama OUATTARA** pour ses orientations dans la rédaction de ce document

J'exprime du fond de cœur ma reconnaissance et mon affection à mes parents pour tout l'amour et le soutien qui m'ont permis d'arriver à ce niveau.

J'adresse mes remerciements et gratitude à la famille **COULIBALY** pour tout le soutien inconditionnel.

RESUME

La pression anthropique sur les milieux naturels tant au niveau de la décharge que de l'exploitation des matériaux naturels est au cœur des préoccupations publiques et des collectivités. Les difficultés de réhabilitation, la défiguration des paysages et l'occupation des terres fertiles par les déchets industriels constituent un réel obstacle au développement durable. Il est grand temps d'intégrer la notion du développement durable dans nos actions en valorisant ces différents déchets afin de leur trouver un emploi utile. Ce travail étudie les possibilités de valorisation des mâchefers dans la conception de nouveaux matériaux de construction à caractère environnemental.

Cette étude a consisté à l'élaboration du mortier contenant le mâchefer à des substitutions volumiques de sable bien définies : 0%, 50% et 100%, afin d'étudier l'influence de la qualité de la pâte de ciment (E/C) et de l'incorporation des granulats de mâchefer sur les propriétés mécaniques du mortier. Pour ce faire, les composites élaborés ont été testés à travers les essais de compression, de flexion et de traction. Les résultats de cette étude ont montré que l'incorporation des granulats de mâchefer dans les composites induit une diminution des résistances mécaniques, une diminution de la masse volumique sèche et une augmentation de la porosité. Toutefois, on note une augmentation des résistances liée à l'amélioration de la qualité de la pâte.

L'ensemble des résultats permet de conclure que grâce à la diminution de la masse volumique des composites, l'incorporation des granulats de mâchefers peut avoir un intérêt particulier dans la réalisation des structures légères.

Mots Clés:

1 - Mâchefers

3 - Mortier

4 - Résistances mécaniques

5 - E/C

ABSTRACT

The anthropic pressure on the natural environments as well on the level of the discharge as of the exploitation of natural materials is in the core of the public concerns and the communities. The difficulties of rehabilitation, the disfiguration of the landscapes and the occupation of the fertile grounds by the industrial waste constitute a real obstacle to the durable development. It is high time to integrate the notion of the durable development in our actions by developing this various waste in order to find a useful employment to them. This work studies the possibilities of valorization of bottom ash in the design of new building materials in environmental matter.

This study consisted with the development of mortar containing bottom ash with voluminal substitutions of sand: 0%, 50% and 100%, in order to study the influence of the quality of the cement paste (W/C) and of the incorporation of bottom ash aggregates on the mechanical properties of the mortar. With this intention, the elaborate composites were tested through the tests of compression, inflection and tensile. The results of this study showed that the incorporation of bottom ash aggregates in the composites induces a reduction of the mechanical resistances, a reduction of dry density and an increase of porosity. However, one notes an increase in resistances related to the improvement of the quality of the paste.

The results conclude grace to the reduction of density, the incorporation of bottom ash aggregates can have a particular interest in the realization of the light structures.

Key words:

2 - Bottom ash

4 - Mortar

5 - Mechanical resistances

8 - W/C

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

AFNOR : Association Française de Normalisation

BTP : Bâtiments et Travaux Publics

E/C : Masse d'eau efficace/Masse de ciment

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LEMC : Laboratoire Eco-Matériaux de Construction

MIOM : Mâchefer d'Incinération d'Ordures Ménagères

RCCs : Résidus de la Combustion du Charbon

RILEM : Réunion Internationale des Laboratoires et Experts en Matériaux

SONICHAR : Société Nigérienne de Charbon d'Anou Araren

S/C : Sable/Ciment

SOMMAIRE

<i>Citations</i>	<i>i</i>
<i>Remerciements</i>	<i>ii</i>
<i>Résumé</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>v</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>viii</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>ix</i>
<i>Introduction</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre I : Synthèse bibliographique</i>	<i>3</i>
<i>I.1 Le mortier</i>	<i>3</i>
La matrice cimentaire	<i>3</i>
<i>I.2 Le mâchefer</i>	<i>4</i>
Généralités	<i>4</i>
<i>I.3 Travaux antérieurs sur l'utilisation du mâchefer dans les matériaux de construction</i>	<i>8</i>
I.3.1 Utilisation du mâchefer dans les travaux publics	<i>9</i>
I.3.2 Utilisation du mâchefer dans les matériaux cimentaires	<i>9</i>
<i>Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales</i>	<i>20</i>
<i>II.1 Les protocoles d'essais</i>	<i>20</i>
II.1.1 L'analyse granulométrique par tamisage	<i>20</i>
II.1.2 La masse volumique apparente	<i>21</i>
II.1.3 La masse volumique spécifique	<i>22</i>
II.1.4 L'équivalent de sable	<i>23</i>
<i>II.2 Caractérisation des matériaux</i>	<i>25</i>
II.2.1 Le ciment	<i>25</i>
II.2.2 Le sable	<i>25</i>
II.2.3 Le mâchefer	<i>25</i>
II.2.4 L'adjuvant	<i>26</i>
<i>II.3 Elaboration des composites</i>	<i>27</i>
<i>II.4 Dispositifs et essais de caractérisation physique</i>	<i>28</i>
II.4.1 Masse volumique	<i>28</i>

II.4.2 Porosité accessible à l'eau	28
II.5 Dispositifs et essais de caractérisation mécanique	30
II.5.1 Essai de compression	30
II.5.2 Essai de flexion trois points.....	31
II.5.3 Essai de traction par fendage (essai brésilien).....	32
II.6 Prétraitement des granulats de mâchefer	33
Cinétique d'absorption des granulats	33
Chapitre III : Résultats et discussions	35
III.1 Comportement des composites à l'état frais	35
III.1.1 Affaissement au mini-cône d'Abrams.....	35
III.1.2 Masse volumique à l'état frais	36
III.2 Comportement des composites à l'état durci.....	36
III.2.1 Propriétés physiques	36
III.2.2 Propriétés mécaniques.....	38
III.3 Influence du prétraitement sur les propriétés des composites	41
III.3.1 Cinétique et coefficient d'absorption d'eau des granulats de mâchefer	41
III.3.2 Influence sur l'affaissement	42
III.3.3 Influence sur les propriétés mécaniques.....	43
Conclusion et Perspectives	45
Bibliographie	47
Annexes	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composition chimique du mâchefer (Siddique, 2012).....	6
Tableau 2: Propriétés physiques du mâchefer (Sakshi, 2013).....	7
Tableau 3: Production et réutilisation des RCCs par les pays producteurs (Vinai, et al., 2012).....	8
Tableau 4: Composition minéralogique du mâchefer de SONICCHAR (Vinai, et al., 2012).....	25
Tableau 5: Caractéristiques physiques des granulats	26
Tableau 6: Caractéristiques du superplastifiant (Sika, 2013).....	27
Tableau 7: Composition des différents mélanges.....	27

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Affaissement en fonction de la teneur en mâchefer (Siddique, et al., 2014)	10
Figure 2: Affaissement en fonction de la teneur en mâchefer (Shii-Cong, et al., 2009)	11
Figure 3: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer et l'âge (Siddique, 2013) .	12
Figure 4: Influence du mâchefer sur la résistance en compression (Kim, 2010)	14
Figure 5: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer (Shii-Cong, et al., 2009) .	14
Figure 6: Résistance en flexion en fonction de la teneur en mâchefer (Seung Bum Park, 2008)	15
Figure 7: Résistance en traction en fonction de l'âge du béton (Aggarwal, et al., 2007).....	16
Figure 8: Module d'élasticité en fonction de la teneur en mâchefer (Kim, 2010).....	17
Figure 9: Module d'élasticité en fonction de la teneur en mâchefer (Siddique, et al., 2014)	17
Figure 10: Densité du béton en fonction de la teneur en mâchefer (Kim, et al., 2012).....	18
Figure 11: Masse et poids volumiques en fonction de la teneur en mâchefer (Özkan, et al., 2007)& (Siddique, et al., 2014)	18
Figure 12: Série de tamis emboîtés	20
Figure 13: Cône normalisé pour la masse volumique apparente.....	22
Figure 14: Pycnomètre à air	22
Figure 15: Matériels pour l'essai d'équivalent sable.....	23
Figure 16: Granulats de mâchefer	25
Figure 17: Courbes granulométriques des granulats	26
Figure 18: Illustration des matériaux poreux	29
Figure 19: Presse et dispositifs d'essais mécaniques	30
Figure 20: Dispositif pour l'essai de flexion.....	31
Figure 21: Dispositif pour l'essai de traction par fendage.....	32
Figure 22: Affaissement des composites en fonction de la teneur en mâchefer.....	35
Figure 23: Masse volumique humide en fonction de la teneur en mâchefer.....	36
Figure 24: Masse volumique sèche en fonction de la teneur en mâchefer	36
Figure 25: Porosité accessible à l'eau en fonction de la teneur en mâchefer	37
Figure 26: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer	38
Figure 27: Résistance en flexion en fonction de la teneur en mâchefer	39
Figure 28: Résistance en traction en fonction de la teneur en mâchefer	39
Figure 29: Résistance en compression en fonction de la masse volumique sèche	40
Figure 30: Cinétique d'absorption des granulats du mâchefer	41
Figure 31: Affaissements des composites traités et non traités en fonction de la teneur en mâchefer.	42
Figure 32: Résistance en compression des composites traités et non traités en fonction de la teneur en mâchefer	43

Figure 33: Résistance en flexion des composites traités et non traités en fonction de la teneur en mâchefer.....	43
Figure 34: Résistance en traction des composites traités et non traités en fonction de la teneur en mâchefer.....	44

INTRODUCTION

D'énormes quantités de ressources minérales naturelles ou élaborées sont utilisées dans le domaine du BTP et chaque jour, des milliers de tonnes de matières résiduelles sont rejetées par les industries. Au fil des années, l'accumulation des déchets présente des risques environnementaux importants : le stockage, l'émission des gaz à effet de serre, la radio activité, etc. Depuis des années, des efforts sont faits pour limiter les impacts des déchets industriels sur l'environnement; poussant des ingénieurs et des chercheurs au recyclage et à la valorisation des déchets dans les matériaux de construction afin de rationaliser l'utilisation des ressources naturelles.

L'extraction des graviers dans le lit même des cours d'eau a souvent provoqué des modifications quasi irrémédiables des écosystèmes fluviaux. Aujourd'hui, ce mode d'extraction s'est raréfié mais les carrières et les gravières des plaines alluviales se sont largement étendues selon les besoins des chantiers environnants.

L'occupation de terrains fertiles, la défiguration du paysage, les difficultés de réhabilitation des sites sont de plus en plus au cœur des préoccupations des pouvoirs publics et des collectivités. La valorisation des déchets en BTP pourrait ainsi contribuer à diminuer le nombre de carrières et de gravières, à préserver les ressources naturelles, tout en préservant les paysages et les écosystèmes, sous réserve que ces déchets soient traités de manière à limiter leur potentiel polluant.

Aujourd'hui, le béton reste le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction des bâtiments et travaux publics ; et les tendances sont orientées vers l'utilisation du béton léger. En effet, le béton léger a un avantage sur le béton standard en ce sens qu'il permet de réaliser des structures à grandes natures grâce à son poids léger qui réduit considérablement les contraintes envoyées au sol. Ainsi, l'utilisation des granulats légers, issus des sous-produits industriels, dans l'industrie des matériaux cimentaires permet d'une part la réduction de l'utilisation abusive des ressources naturelles et d'autre part la réduction de la pollution de l'environnement par les déchets industriels.

Ce travail se situe dans cette démarche et vise la valorisation des mâchefers issus de la combustion du charbon dans les centrales thermiques du Niger. La société nigérienne SONICHAR; qui produit de l'électricité par combustion du charbon minéral, rejette chaque année une quantité d'environ 150 000 tonnes de mâchefer stockés à ciel ouvert. L'intérêt du sujet réside dans l'importance du volume de mâchefer accumulé d'année en année, qui

constitue un problème environnemental important; notamment des risques de pollution des cours d'eau, des nappes phréatiques, des aquifères, etc.

Ce mémoire de fin d'études s'inscrit dans un cadre de recherche menée au Laboratoire Eco-Matériaux de Construction (LEMC) de 2iE dont l'objectif est la conception de nouveaux matériaux de construction à caractère environnemental. Il vise spécifiquement à améliorer les performances mécaniques du mortier contenant le sable de mâchefer à travers la qualité de la pâte de ciment, et les résultats attendus se présentent comme suit :

- ❖ Résistance en compression
- ❖ Résistance en flexion trois (3) points
- ❖ Résistance en traction par fendage
- ❖ Evaluation du rapport E/C sur les propriétés mécaniques des matériaux élaborés

Ce travail est présenté en trois (3) chapitres.

Le premier chapitre, consacré à la recherche bibliographique, consiste à faire une revue des littératures consacrées aux mâchefers, leur utilisation dans les matériaux cimentaires. Une présentation préalable du mortier dans sa généralité, sa composition et ses propriétés y sont décrites. Le chapitre II présente la méthodologie expérimentale adoptée pour aborder le sujet de la formulation des composites aux différents essais de caractérisation physique et mécanique. Pour les différents rapports $E/C = 0.5 ; 0.4, 0.3$ le mâchefer est utilisé comme matière première pour élaborer de nouvelles formules de mortier en remplaçant le sable par le mâchefer à des proportions volumiques de sable bien définies: 0%, 50%, 100%. Le dernier chapitre regroupe l'ensemble des résultats des différents essais et les discussions basées sur les résultats attendus de ce travail.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre synthétise l'ensemble des études antérieures sur le mâchefer, notamment son utilisation dans les matériaux cimentaires. Elle traite également le mortier dans sa structure minéralogique ainsi que ses propriétés physiques et chimiques.

I.1 LE MORTIER

Le mortier est un matériau cimentaire composé de sables, d'eau et de ciment dont le comportement dépend de sa structure physique et de l'évolution de la pâte de ciment. En se basant sur cette définition, on comprend très vite que les propriétés du mortier dépendent de la qualité de la pâte de ciment (matrice cimentaire) et de sa structure physique, il est donc nécessaire et important de rappeler quelques notions de cette matrice cimentaire.

La matrice cimentaire

Elle résulte d'un mélange d'eau et du ciment à des proportions volumiques bien définies capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées afin d'atteindre certaines performances physiques, mécaniques et chimiques. Il est à noter que le ciment utilisé dans cette étude est le ciment portland, dont une description plus détaillée est donnée dans les parties qui suivent.

Composantes chimiques du ciment portland

Le ciment portland, constitué d'éléments hydrauliques, résulte d'un broyage fin de clinker et d'une petite quantité de sulfate de calcium (environ 5%) qui joue le rôle de régulateur de prise. Le clinker est un mélange de calcaire (80%) et d'argile (20%) sous une température de 1450 °C. Le calcaire est constitué de la chaux (CaO) et l'argile constituée de la silice (SiO₂), de l'alumine (Al₂O₃) et de l'oxyde de fer (Fe₂O₃). Ces éléments, en réagissant, ont conduit à une structure moléculaire du clinker constituée principalement de (Dupain, et al., 1995) :

- Le silicate tri calcique Ca₃SiO₅ (C₃S) qui représente 50 à 70% du clinker
- Le silicate bi calcique Ca₂SiO₄ (C₂S) qui représente 10 à 30% du clinker
- L'alumine tri calcique Ca₃Al₂O₆ (C₃A) qui représente 2 à 15% du clinker
- L'aluminoferrite tétra calcique Ca₄AlFeO₅(C₄AF) qui représente 5 à 15% du clinker

Dans la suite, nous adopterons les notations suivantes pour désigner ces différents éléments : C pour CaO, S pour SiO₂, A pour Al₂O₃ et H pour H₂O

a) Hydratation du ciment

L'hydratation du ciment est l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau ; elle commence avant la prise et se poursuit longtemps après la prise mais de plus en plus lentement, constituant ainsi le durcissement (Baron, et al., 1982). L'eau permet la fluidification et l'hydratation de la pâte du ciment. Lors du mélange d'eau et du ciment, il se crée à l'interface solide-liquide une réactivité et plusieurs mécanismes ont lieu et le plus souvent de manière simultanée ; il s'agit notamment de l'absorption, l'hydrolyse, la dissolution, la solvatation et la cristallisation, conduisant à l'hydratation du ciment (Regourd, 1982). A titre d'exemple, dans une pâte de ciment entièrement hydratée de rapport E/C = 0,5, on a (Yurtdas, 2003) :

- 56% de silicates de calcium hydratés (C-S-H)
- 20% de portlandite (C-H)
- 15% de sulfoaluminates
- 7% d'eau
- 7% de vide

De cet exemple, on peut déjà constater que les principaux constituants de la pâte de ciment hydraté sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H), qui représentent une forme de « colle » qui maintient l'ensemble de sables dans le mortier ou les granulats dans le béton. Il en découle de ce constat que les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires dépendent essentiellement des C-S-H.

Lors de l'évolution progressive de l'hydratation du ciment, il se crée à travers le mécanisme d'absorption, des vides qui peuvent être interconnectés entre eux. Il en résulte donc la création d'un espace poreux dans la matrice cimentaire.

I.2 LE MACHEFER

Généralités

Les mâchefers sont des produits d'incinération classés en deux catégories selon la source de la matière première brûlée. Il y a les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) issus de l'incinération des déchets domestiques ou d'ordures ménagères et les mâchefers du charbon (RCC) issus de la combustion du charbon minéral.

1. Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM)

Depuis quelques années, l'incinération des déchets ménagers constitue une nouvelle alternative de gestion des déchets dans plusieurs pays. Cette technique permet de réduire considérablement le volume des déchets avant de les enfouir. La combustion des déchets se fait en deux phases ; les déchets sont déversés dans une fosse pour une homogénéisation

avant d'être canalisés dans les fours. La combustion génère de la chaleur qui peut être récupérée pour produire de la vapeur qui peut servir de chauffage ou à produire de l'électricité. Les résidus de cette combustion se présentent sous deux formes : les cendres volantes qui constituent environ 10% à 20% du poids des résidus solides produits par l'incinérateur et le reste étant du mâchefer (Guilbault, 2013).

1.1 Caractérisation physico-chimique des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères

Généralement les MIOMS contiennent de nombreux déchets métalliques, des résidus minéraux incombustibles et des imbrulés résultants de la combustion imparfaite de certains constituants peu combustibles ou trop humides lors de leur introduction dans le four.

1.2 Composition chimique

Les principaux constituants des MIOMS sont : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_3 et SO_3 (Lam, 2010). Il y a également la présence de certains métaux lourds qui comptent environ 1%, il s'agit notamment du Chrome (Cr), du cuivre (Cu), du mercure (Hg), du cadmium (Cd), du zinc (Zn) et du plomb (Pb).

1.3 Propriétés physiques

Les MIOMS se présentent sous forme de granules grisâtres, friables, hétérogènes et de grosseurs variables. Ils ont une grande sensibilité à l'eau. Ils se distinguent des granulats naturels par le fait qu'ils sont constitués d'éléments de natures différentes très liés entre eux.

2. Mâchefers résidus de la combustion de charbon (RCC)

Le charbon minéral est un combustible fossile formé à partir de la dégradation de la matière organique des végétaux. Il est composé principalement de carbone (C), d'hydrogène (H) et d'oxygène (O) (Guilbault, 2013). Fort longtemps le charbon est utilisé comme source d'énergie dans les industries, les centrales thermiques, les locomotives, etc. La combustion du charbon produit des résidus de combustion de charbon dans lesquels se trouvent les mâchefers. Cette présente étude porte sur les mâchefers de charbon brûlés dans les centrales thermiques du Niger. Selon le mode de fonctionnement des centrales thermiques, le charbon est brûlé dans une chaudière ou fournaise et la chaleur dégagée transforme l'eau d'un circuit fermé en vapeur. Cette vapeur entraîne une turbine couplée à un alternateur, qui génère de l'électricité. La vapeur redevient de l'eau liquide en traversant le condensateur puis repart vers la chaudière pour un nouveau cycle. Ainsi, lors de la combustion du charbon, deux types de résidus sont générés : les cendres volantes qui sont majoritaires avec une proportion de 70 à 90% et les résidus solides ou mâchefers à une

proportion 10 à 30% (Siddique, 2010). Les cendres volantes sont constituées des composants inorganiques qui fusionnent entre eux lors de la combustion et deviennent une matière particulaire de très petite taille. Pendant l'évacuation, elles se solidifient et prennent une forme sphérique. Elles sont ensuite collectées par des dépoussiéreurs et/ou des filtres. La taille de ces particules varie de 5 à 74 μm (Guilbault, 2013). Les mâchefers quant à eux sont déposés, après combustion du charbon, dans une trémie, ils sont ensuite enlevés par des jets d'eau sous pression puis transportés soit dans un bassin de décantation pour y enlever l'eau afin de les mettre en piles. Soit, ils sont entreposés dans un étang à cendre aménagé.

Caractérisation physico-chimique des mâchefers de charbon

Les propriétés physiques et chimiques du mâchefer varient et dépendent du type, de la source et de la finesse du charbon brûlé et du type d'opération de combustion (Özkan, et al., 2007) Les particules du mâchefer ont une taille variant de celle du sable fin aux graviers. Le mâchefer est composé principalement de l'oxyde de silice (SiO_2), de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) avec de faibles quantités de calcium, de sulfate de magnésium, etc (Siddique, et al., 2014).

Composition chimique

Le tableau 1 présente la composition chimique du mâchefer provenant de différentes sources de charbon dont les résultats ont été recueillis par Siddique et Singh (Siddique, 2012)

Tableau 1: Composition chimique du mâchefer (Siddique, 2012)

Composition chimique (%)	Yuksel et Genc (2007)	Andrade et al. (2009)	Bai et al. (2005)	Kasemchaisiri (2007)	Sani et al. (2010)	Ghafoori and Bucholc (1997)
SiO_2	57,9	56	61,8	38,64	54,8	41,7
Al_2O_2	22,6	26,7	17,8	21,15	28,5	17,1
Fe_2O_3	6,5	5,8	6,97	11,96	8,49	6,63
CaO	2	0,8	3,19	13,8	4,2	22,5
MgO	3,2	0,6	1,34	2,75	0,35	4,91
Na_2O	0,086	0,2	0,95	0,9	0,08	1,38
K_2O	0,604	2,6	2	2,06	0,45	0,4
TiO_2		1,3	0,88	-	2,71	3,83(P_2O_3 , TiO_2 , etc)
P_2O_3			0,2	-	0,28	
SO_3		0,1	0,79	0,61	-	0,42
LOI	2,4	4,6	3,61	7,24	2,46	1,13

En observant le tableau 1, on retient que les mâchefers sont constitués principalement des dioxydes de silice (SiO_2), des dioxydes d'aluminium (Al_2O_2), des trioxydes de fer (Fe_2O_3) et des oxydes de calcium (CaO).

Propriétés physiques

Les particules du mâchefer sont généralement angulaires, irrégulières et poreuses avec des surfaces rugueuses et des caractéristiques emboîtées. Le mâchefer, comparé au sable naturel, est plus léger et fragile. Sa densité spécifique dépend de sa composition chimique et varie de 1,39 à 3,18. Cette faible densité spécifique dépend de sa teneur en oxyde de fer (Siddique, 2012) et (Kim, 2011).

Le tableau 2 récapitule quelques caractéristiques physiques des mâchefers qui ont fait l'objet de plusieurs études dont les résultats sont présentés par Sakshi (Sakshi, 2013)

Tableau 2: Propriétés physiques du mâchefer (Sakshi, 2013)

Propriétés	Résultats	Chercheurs
Densité spécifique (t/m^3)	1,87	Kim et Lee, 2010
	1,98	Siddique et Singh, 2013
	2,8	Vinai, Lawane et Minane, 2012
	1,39	Topcu et Bilir, 2010
	2,39	Kurama et Kaya, 2007
	1,39	Yuksel et Bilir, 2007
	1,39	Yuksel et al. , 2007
Densité apparente (t/m^3)	1,79	Yazici, 2007
	0,660	Yuksel et Bilir, 2007
	0,700	Vinai, Lawane et Minane, 2012
Coefficient d'absorption d'eau (%)	5,45	Kim et Lee, 2010
	31,58	Siddique et Singh, 2013
	12,1	Topcu et Bilir, 2010

On constate à partir du tableau 2 que de façon générale, les mâchefers sont des matériaux naturellement légers comparés à d'autres tels que le sable ou le gravier. Leur caractère poreux justifie la forte absorption d'eau des granulats de mâchefer.

I.3 TRAVAUX ANTERIEURS SUR L'UTILISATION DU MACHEFER DANS LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

La valorisation des sous-produits dans la construction est déjà effective depuis quelques années et représente d'importants volumes en progression pour certains déchets, permettant de réaliser d'importantes économies de matières premières et de limiter ainsi la pression anthropique sur les milieux naturels tant au niveau de la mise en décharge que de l'exploitation des matériaux naturels. Depuis quelques années, le mâchefer fait l'objet de nombreuses études en ce qui concerne son utilisation comme matière première dans l'élaboration des matériaux de construction, notamment dans la stabilisation des couches de chaussées, les matériaux cimentaires, etc.

De récentes études ont montré que la production mondiale des résidus de combustion de charbon (RCCs) est estimée à plus de 600 millions de tonnes. Le tableau 3 donne une estimation des quantités des déchets et leurs réutilisations par la majeure partie des pays producteurs.

Tableau 3: Production et réutilisation des RCCs par les pays producteurs (Vinai, et al., 2012)

Pays	Production des RCCs (Mt)	Réutilisation (Mt)	Taux de réutilisation(%)	Année
Chine	350	203	58	2010
USA	118,1	50,2	42,5	2010
Inde	105	28,3	27	2005
EU15^a	51,8	47,7	90,7	2009
Australie	14,1	5,8	41	2010
Japon	11	10,6	97,2	2006
Canada	6,4	1,9	30	2006
Total	656,4	347,5	55,2	-

On constate à partir de ce tableau que la réutilisation des mâchefers par certains pays producteurs est assez importante, par contre pour d'autres, le taux de réutilisation n'atteint même pas 50%. Il va de ce constat qu'environ la moitié de la production reste inutilisée et ceci peut poser des problèmes environnementaux au niveau du stockage et de la pollution des sols, des cours d'eau et des aquifères. Il est alors important d'envisager de nouvelles voies de valorisations de ces déchets, de perpétuer et d'améliorer celles existantes afin de limiter les impacts négatifs de ces déchets sur l'environnement.

^a Les 15 pays d'Europe qui formaient l'union européenne entre 1995 et 2004. Ils sont cités aujourd'hui comme les pays les mieux développés en Europe sur le plan économique.

I.3.1 Utilisation du mâchefer dans les travaux publics

De nombreuses études ont montré que les mâchefers, sous forme granulaire ou cendre volante, peuvent être utilisés dans la stabilisation des sous-couches de chaussées. Churchill et Amirghanian (Churchill, et al., 1999) ont montré que le mâchefer peut être utilisé dans la structure routière comme couche de base.

Des études menées par Naik (Naik, et al., 2003) ont révélé qu'en substituant le ciment par la cendre volante à des proportions massiques variant de 25 à 30% dans la fabrication des briques et pavées, la résistance en compression est nettement supérieure aux briques et pavées de références ; tandis qu'on observe une chute de la résistance lorsque le mâchefer a été utilisé comme substituant du sable. L'auteur attribue cette chute de résistance à la structure poreuse des particules du mâchefer comparé au sable naturel.

En 2004, Naik et al. (Naik, et al., 2004) ont étudié la résistance en compression des briques et pavées à base de mâchefer à des substitutions de 0, 50 et 70% du sable naturel. Les résultats de ces études ont indiqué que les briques de résistance minimale 24 MPa peuvent être produites avec le mâchefer.

I.3.2 Utilisation du mâchefer dans les matériaux cimentaires

Ces dernières années, l'utilisation des différents types de déchets industriels comme addition dans la production des matériaux cimentaires a attiré l'attention de beaucoup de chercheurs ; l'incorporation des déchets tels que les cendres volantes de mâchefer, le mâchefer granulaire, le sable de fonderie, etc dans les matériaux cimentaires, pourrait être bénéfique notamment au niveau du coût des constructions, de la durabilité et de la préservation de l'environnement. Ceci étant, l'incorporation du mâchefer dans l'industrie cimentaire a fait l'objet de nombreuses études dont les résultats sont prometteurs. Certains auteurs ont abordé les propriétés des matériaux à l'état frais, mais la majeure partie des travaux est orientée sur les propriétés des composites à l'état durci.

I.3.2.1 Travaux sur les propriétés des composites à l'état frais

De nombreux auteurs ont travaillé sur l'influence de l'incorporation du mâchefer dans les composites sur les propriétés à l'état frais précisément à travers les essais d'affaissement et de compactage qui apprécie la consistance des composites par le rapport entre un volume donné du matériau avant et après compactage. Ce rapport est d'autant plus faible que le composite est plus fluide.

Siddique et Singh (Siddique, et al., 2014) ont observé une diminution de l'affaissement et du degré de compactibilité lorsque le sable est substitué à un taux de 100% par le mâchefer

dans la fabrication du béton. Les résultats de leur étude indiquent que l'affaissement passe de 70 mm à 10 mm lorsque le mâchefer est utilisé à 100%. Le même constat a été fait sur la compactibilité qui est passée de 0.87 à 0.72. La figure 1 indique l'évolution de l'affaissement avec le taux d'incorporation du mâchefer dans les composites.

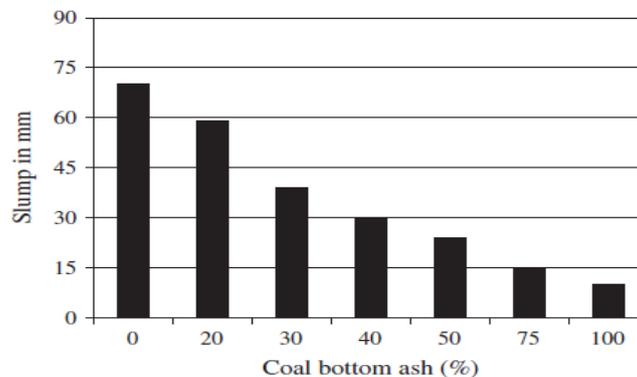


Figure 1: Affaissement en fonction de la teneur en mâchefer (Siddique, et al., 2014)

D'après les auteurs, lors du malaxage des composites, le mâchefer^b absorbe une partie de l'eau de gâchage qui permet la lubrification des particules dans les composites et ceci se traduit par une réduction systématique de la fluidité et par conséquent une réduction de l'affaissement.

Cette même tendance a été observée par Chun et al. (Chun, et al.) et Aggarwal et al. (Aggarwal, et al., 2007) qui ont étudié l'influence du mâchefer sur les propriétés du béton. Ghafoori et Bucholc (Ghafoori, et al., 1997), ayant étudié l'influence de la substitution du sable par le mâchefer sur les propriétés du béton, ont proposé l'utilisation du superplastifiant pour remédier au problème de diminution d'affaissement liée à l'incorporation du mâchefer dans les composites.

Cependant, sur cette question, certains auteurs ont trouvé des résultats qui tendent à infirmer ceux trouvés par les auteurs cités ci-haut.

Shii-Cong et Chi-Sun (Shii-Cong, et al., 2009) ont montré que l'incorporation du mâchefer comme substituant du sable dans le béton se traduit par une augmentation croissante de l'affaissement suivant le taux d'incorporation (figure 2)

^b Généralement, les particules du mâchefer ont une très forte capacité d'absorption d'eau, qui est proportionnelle à leur masse. Le mâchefer étudié présente un coefficient d'absorption de 31.58% qui dépasse largement celui du sable qui est 2.46%.

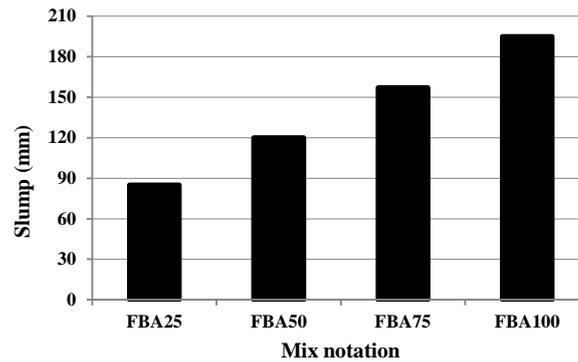


Figure 2: Affaissement en fonction de la teneur en mâchefer (Shii-Cong, et al., 2009)

Kim, Joen et Lee (Kim, et al., 2012) ont montré qu'en substituant le sable naturel par le mâchefer dans le mortier, on observe une augmentation de l'écoulement du composite ; qui, selon les auteurs, est due à la présence de l'eau absorbée ajoutée au matériau.

Bien que les différents auteurs aient des avis partagés sur la question, il faut noter que ces résultats sur l'affaissement se justifient par le mode de formulation des composites.

La première catégorie d'auteurs^c n'a pas pris en compte le coefficient d'absorption du mâchefer ; donc lors du malaxage, une partie de l'eau de gâchage a été absorbée par les particules poreuses du mâchefer, qui se traduit par une réduction de l'eau libre qui assure la fluidification du matériau. Par conséquent, on observe une réduction de l'affaissement.

Par contre, la seconde catégorie^d a tenu compte de l'eau absorbée, toute fois, il est important d'établir la cinétique d'absorption^e du mâchefer afin de déterminer le temps d'absorption avant le malaxage. Donc lorsque ce temps n'est pas respecté, le matériau n'absorbe pas la totalité de l'eau absorbée ; une partie s'ajoute à l'eau de gâchage calculée et ainsi, on observe une augmentation de la fluidité du composite, qui à son tour, se traduit par une augmentation de l'affaissement.

^c Les auteurs ayant observé une chute d'affaissement lors de l'incorporation du mâchefer dans les composites.

^d Les auteurs ayant observé une augmentation de l'affaissement lors de l'incorporation du mâchefer dans les composites.

^e Une notion très importante des matériaux présentant une structure poreuse ; elle sera détaillée au chapitre II

I.3.2.2 Travaux sur les propriétés des composites à l'état durci

Dans cette partie, nous nous intéressons aux résistances mécaniques des composites. Généralement, les matériaux cimentaires sont caractérisés par leurs résistances à la compression, néanmoins nous aborderons également les résistances en flexion, en traction, le module d'élasticité et la masse volumique.

a) Résistance en compression

La plupart des études sur l'influence de l'incorporation du mâchefer dans les matériaux cimentaires a montré une légère diminution de la résistance en compression des composites.

Rafat Siddique (Siddique, 2013) a montré que la résistance en compression du béton diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation du mâchefer ; comme illustré sur la figure 3, où le sable naturel est substitué par le mâchefer à des proportions volumiques variant de 0 à 30%. Cependant il constate que pour chaque proportion de mâchefer, la résistance augmente avec l'âge de la cure du béton.

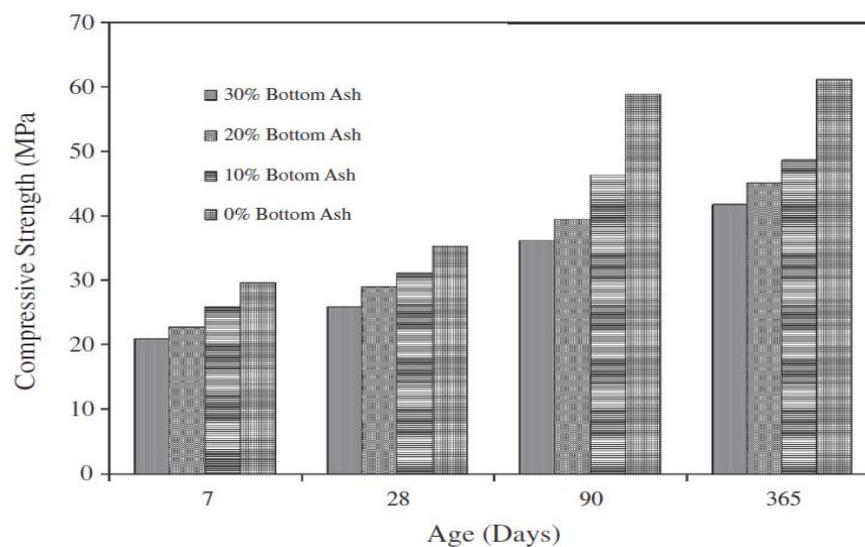


Figure 3: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer et l'âge (Siddique, 2013)

Sur cette figure, on peut constater que pour un béton à 20% d'incorporation, les résistances du béton sont 22.7 MPa, 28.9 MPa, 39.5 MPa et 45.3 MPa respectivement à 7, 28, 90 et 365 jours d'âge, alors que celles du béton témoin (0% de mâchefer) au même âge sont respectivement 29.6 MPa, 35.2 MPa, 59 MPa et 61.2 MPa.

Une étude menée par Targan et al. (Targan, et al., 2003) a montré qu'à deux (2) jours de cure, les composites contenant 10% de la cendre volante de mâchefer et le sable de mâchefer ont une résistance inférieure au composite de référence. Cependant, à long terme les résistances observées se rapprochent, et parfois dépassent celles de la référence.

L'auteur attribue cette augmentation de résistances à l'activité pouzzolanique liée à la particules fine du mâchefer, qui généralement démarre à partir du 14^{ème} jour de cure (Siddique, et al., 2014)

Bai et Basheer (Bai, et al., 2003) ont étudié les effets du mâchefer sur les différentes propriétés du béton en substituant le sable naturel à 0, 30, 50, 70 et 100%. Le rapport E/C est fixé à 0.45 et 0.55, le ciment est dosé à 382 Kg/m³. Les résultats des essais mécaniques indiquent que, pour les deux valeurs du rapport E/C, la plupart des éprouvettes confectionnées présente, à 28 jours d'âge, une résistance en compression inférieure à celle du béton de référence, mais à 365 jours d'âge, les résistances sont comparables à celle du béton de référence.

Topcu et Bilir (Topcu, et al., 2010) ont examiné l'influence du mâchefer sur la résistance en compression du mortier à une substitution variant de 10 à 100% à l'âge de 7 et 28 jours. Ils concluent que la résistance diminue avec l'augmentation du mâchefer dans le mortier, et que le taux de diminution à 7 jours est égal à celui de diminution à 28 jours. Ces résultats ont été confirmés par les travaux d'Aramraks (Aramraks, 2006) et de Yuksel et Genc (Yuksel, et al., 2007) sur l'utilisation du mâchefer comme substituant du sable dans le béton.

Toutefois, certains auteurs, lors de leurs différentes études, sont parvenus à des résultats différents. Les travaux cités ci-dessous tendent à confirmer ces résultats.

Kim et Lee (Kim, 2011), comme illustré sur la figure 4, ont montré qu'à 7 et 28 jours d'âge, l'utilisation du mâchefer affecte faiblement la résistance en compression du béton.

Bai et al. (Bai, et al., 2005) ont montré qu'en fixant l'affaissement du béton entre 30 et 60 mm, les résistances s'améliorent et dépassent celle du béton de référence à tous les âges.

Kurama et Kaya (Kurama, et al., 2008) ont étudié l'influence du mâchefer comme substituant du ciment dans le béton. Ils sont parvenus à conclure qu'à 56 jours de durcissement, les résistances en compression dépassent celle du béton de témoin sauf pour une substitution de 25%. Par contre, à 7 et 28 jours, les résistances sont inférieures à celle du béton de référence lorsque le mâchefer est utilisé à un taux supérieur à 10%.

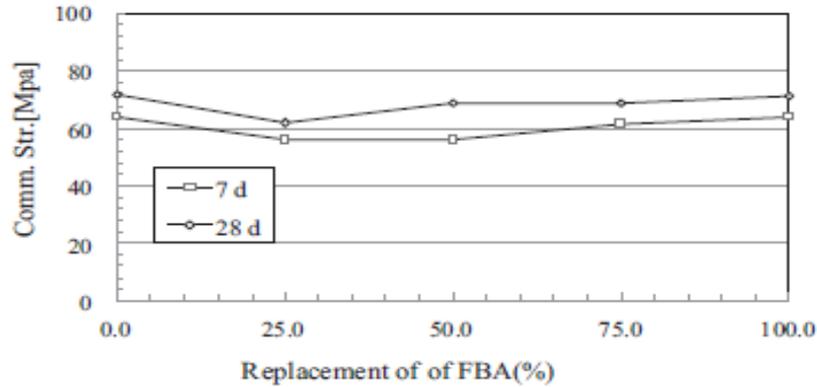


Figure 4: Influence du mâchefer sur la résistance en compression (Kim, 2011)

Kou Shii-Cong et Poon Chi-Shun (Shii-Cong, et al., 2009) indiquent qu'en fixant l'affaissement, la résistance en compression dépasse celle de la référence. Comme on peut le constater sur la figure 5, les résistances augmentent à tous les taux de substitution et dépassent celle du béton de référence.

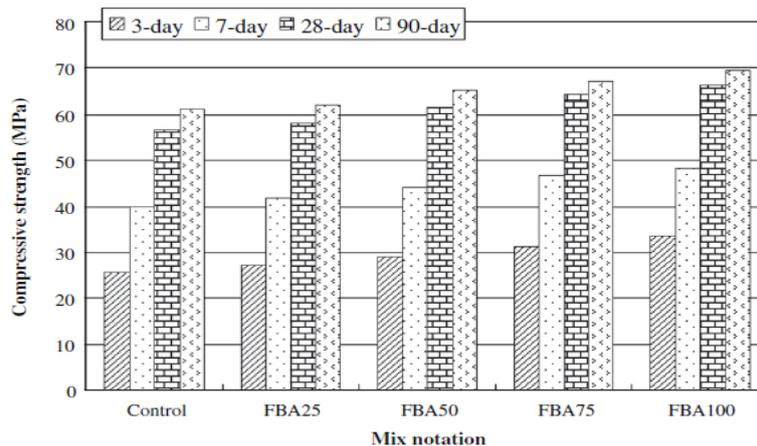


Figure 5: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer (Shii-Cong, et al., 2009)

b) Résistance en flexion

La plupart des auteurs ayant étudié le mâchefer ont montré que l'incorporation du mâchefer dans les matériaux cimentaires induit une baisse de résistance en flexion à tous les âges de durcissement.

Seung (Seung, et al., 2008) dans ses études a montré que la résistance en flexion à 28 jours de durcissement diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation du mâchefer dans le béton. Une substitution jusqu'à 20 % n'affecte pas grandement la résistance, mais au-delà, on observe une diminution de la résistance ; qui atteint environ 25% lorsque le mâchefer est utilisé à 100% dans le béton (Figure 6).

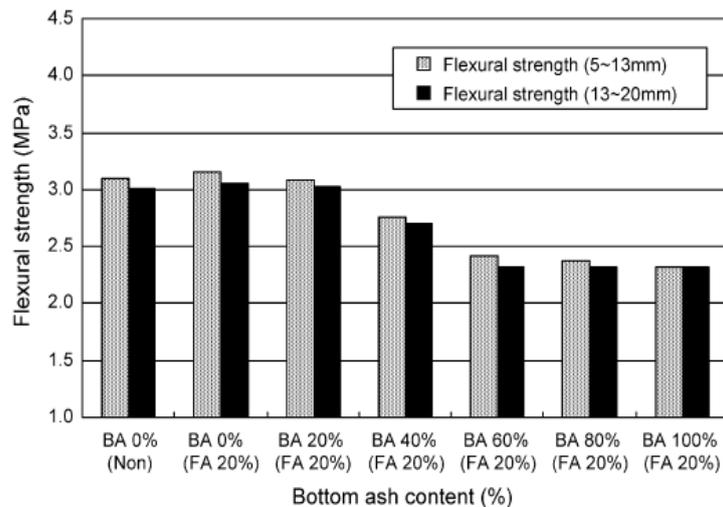


Figure 6: Résistance en flexion en fonction de la teneur en mâchefer (Seung, et al., 2008)

Ghafoori et Bucholc (Ghafoori, et al., 1996) ont montré que l'incorporation du mâchefer diminue la résistance en flexion à tous les âges de durcissement; toutefois, ils proposent l'utilisation d'un superplastifiant pour l'améliorer. Cette tendance a été confirmée par Topcu et Bilir (Topcu, et al., 2010). Cependant Kurama et Kaya (Kurama, et al., 2008) ont montré qu'en substituant le ciment par le mâchefer, la résistance en flexion à 28 jours est presque égale à celle de la référence. A 56 jours, elle dépasse la référence sauf pour une substitution de 25%.

Yuksel et Genc (Yuksel, et al., 2007) ont démontré que pour une substitution de 10% du sable par le mâchefer dans le béton, la résistance en flexion est inférieure à celle du béton de référence, cependant pour ce même taux de substitution, la résistance en traction n'a pas été affectée.

c) Résistance en traction

La résistance en traction du béton à base de mâchefer progresse de façon similaire à celle du béton normal. Le mâchefer a une grande influence sur le développement de la résistance en traction que la résistance en compression.

Yuksel et Genc (Yuksel, et al., 2007) ont montré qu'une substitution du sable dans le béton jusqu'à 10% ne modifie pas la résistance en traction. Ils observent une diminution considérable lorsque le taux de substitution augmente ; à 50% de substitution, la résistance en traction a diminué de 58%. Ghafoori et Cai (Ghafoor, et al., 1998a; Ghafoori, et al., 1998b) ont démontré que la résistance en traction diminue avec l'accroissement du taux de substitution, mais elle évolue avec l'âge de maturation du béton. Entre 28 et 180 jours de cure, les rapports traction/compression varient de 0.101 à 0.153.

Aggarwal et al. (Aggarwal, et al., 2007) ont montré que, tout comme la résistance en flexion, les résistances en traction des bétons contenant le mâchefer sont inférieures à celle du béton de référence, et ceci à tous les âges de cure. Comme on peut le remarquer sur la figure 7 ci-dessous, à 90 jours d'âge, les bétons de mâchefer ont des résistances à la traction variant de 121% à 126% de la résistance de béton de référence à 28 jours.

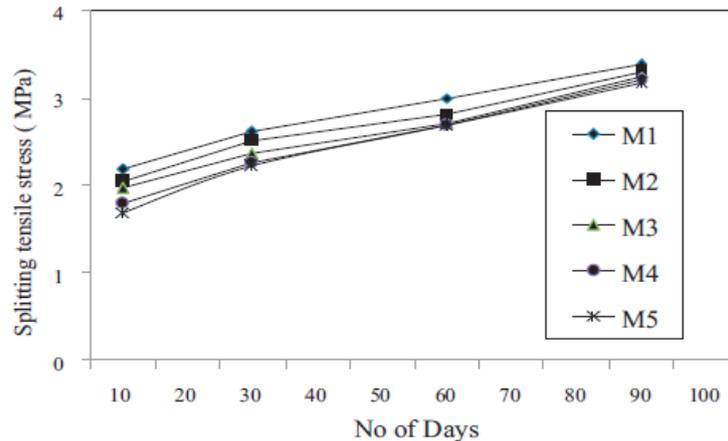


Figure 7: Résistance en traction en fonction de l'âge du béton (Aggarwal, et al., 2007)

Cependant, Arumugam et al. (Arumugam, et al., 2011) ont observé que pour des échantillons de béton contenant 20% de mâchefer comme substituant volumique du sable, les résistances en traction sont supérieures à celle de la référence ; mais au-delà de 20% de substitution, ils observent une diminution de la résistance à la traction du béton.

d) Module d'élasticité

Selon la littérature, l'incorporation du mâchefer dans les matériaux cimentaires se traduit évidemment par la réduction du module d'élasticité des composites.

Andrade et al. (Andrade, et al., 2007) ont démontré qu'en utilisant le mâchefer à 100% dans le béton, le module d'élasticité décroît de 25.8 GPa à 8.9 GPa. Topcu et Bilir (Topcu, et al., 2010) ont observé une forte réduction du module d'élasticité lorsque le mâchefer est utilisé dans le béton ; en effet, pour une substitution de 0 à 60%, le module est passé de 60 GPa à 17 GPa.

Kim et Lee (Kim, 2011) trouvent que le module d'élasticité diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation du mâchefer dans le béton. On peut apercevoir sur la figure 8 que lorsque le sable est remplacé à 100% par le mâchefer, le module d'élasticité passe de 41.1 GPa à 34.9 GPa ; soit une diminution de 15.1%.

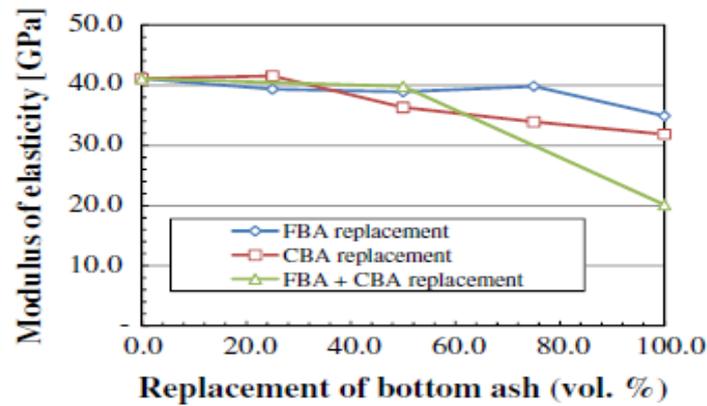


Figure 8: Module d'élasticité en fonction de la teneur en mâchefer (Kim, 2011)

Singh et Siddique (Siddique, et al., 2014) ont montré que le module d'élasticité du béton décroît linéairement avec l'augmentation du taux d'incorporation du mâchefer (figure 9).

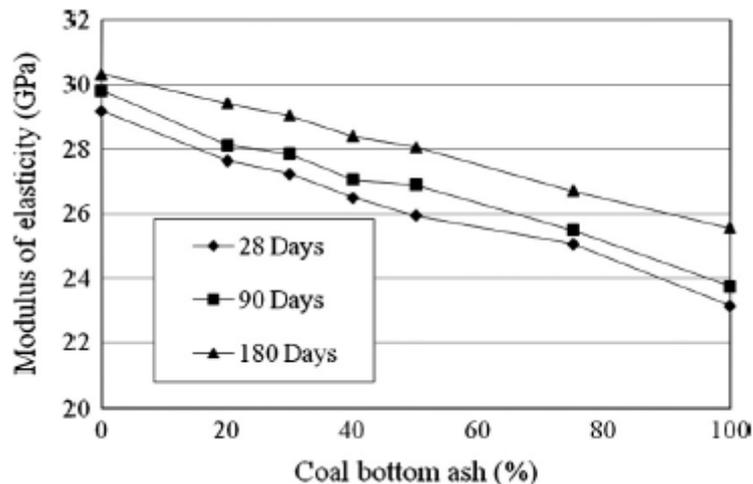


Figure 9: Module d'élasticité en fonction de la teneur en mâchefer (Siddique, et al., 2014)

e) Masse volumique des composites durcis

Les masses volumiques des composites varient en fonction de la densité des granulats utilisés. Par ailleurs, lorsqu'on substitue des matériaux tels que le sable ou le gravier par le mâchefer de densité plus faible, on doit s'attendre logiquement à une diminution de la masse volumique des composites.

Kim et Lee (Kim, et al., 2012) ont étudié l'influence du mâchefer comme substituant du sable et des granulats sur la masse volumique du béton. L'étude a montré que la masse volumique du béton durci décroît linéairement avec l'augmentation du taux de substitution des granulats (figure 10)

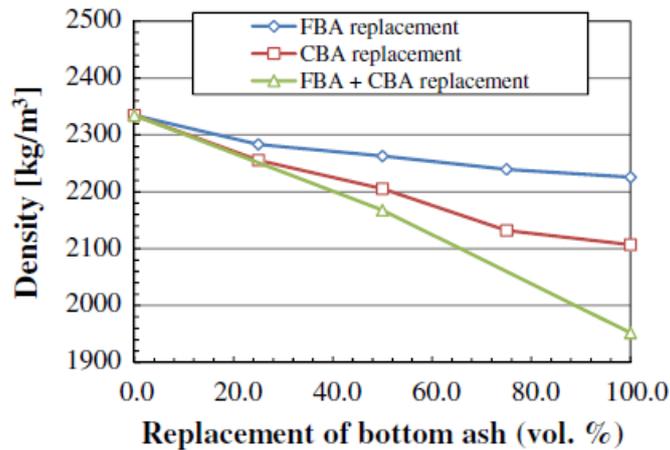


Figure 10: Densité du béton en fonction de la teneur en mâchefer (Kim, et al., 2012)

Ö. Özkan et al. (Özkan, et al., 2007), en étudiant l'influence du mâchefer sur les propriétés mécaniques du béton ont également observé une diminution du poids volumique du béton (figure 11a). Ces résultats ont été confirmés par R. Siddique (Siddique, et al., 2014) qui a étudié les propriétés mécaniques et microstructurales du béton contenant le mâchefer comme substituant du sable (figure 11b).

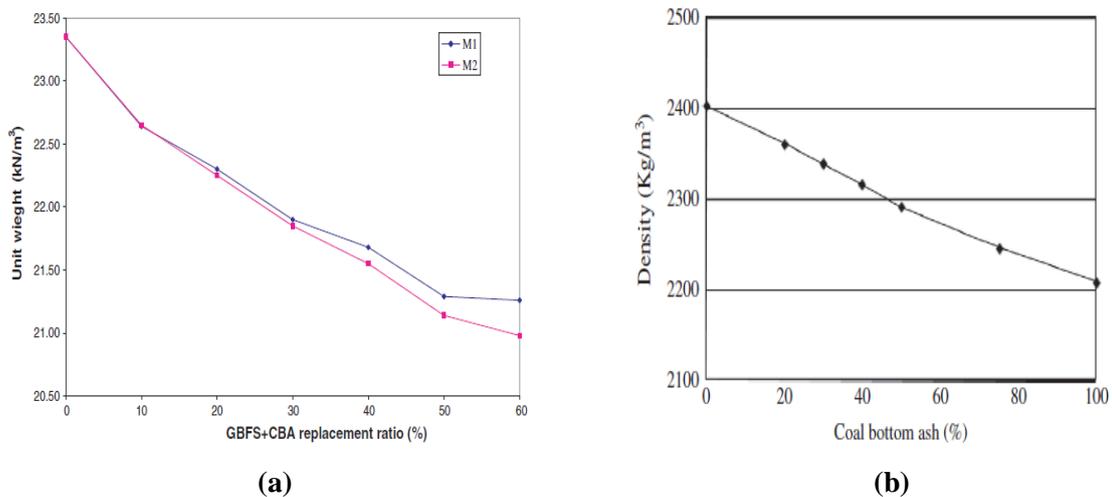


Figure 11: Masse et poids volumiques en fonction de la teneur en mâchefer (Özkan, et al., 2007) & (Siddique, et al., 2014)

Comme on peut le constater suite aux résultats des travaux des différents auteurs présentés ci-haut, la valorisation du mâchefer dans les matériaux cimentaires a fait l'objet de nombreuses études.

Ce chapitre a permis de faire une revue des littératures consacrées aux mâchefers afin d'examiner leur influence sur les propriétés mécaniques des composites. Il en découle que, selon leurs propriétés physico-mécaniques, les mâchefers influencent de façon assez importante les propriétés des composites tant à l'état frais qu'à l'état durci. Beaucoup d'auteurs ont axé leurs travaux sur l'influence du mâchefer sur les propriétés du béton et quelques rares ont abordé le mortier ; ce qui vient appuyer l'intérêt de notre étude en ouvrant de nouvelles voies de valorisation et de nouvelles possibilités à explorer.

Nous rappelons que ce travail vise à améliorer, à travers la qualité de la pâte de ciment, les performances mécaniques du mortier à base du sable de mâchefer. Pour ce faire, les composites élaborés ont été caractérisés mécaniquement, notamment par leurs résistances en compression, en flexion et en traction, et leurs masses volumiques à l'état durci. Nous avons également effectué un prétraitement sur le mâchefer afin d'évaluer l'influence du traitement sur les composites à l'état frais et à l'état durci. Le prétraitement a été effectué sur les composites de type M50 et M100 et pour tous les rapports E/C. Il consiste à saturer les granulats de mâchefer avant de procéder au malaxage, ceci leur laisse le temps nécessaire pour absorber l'eau absorbée ajoutée.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Ce chapitre présente les différents matériaux utilisés dans ce travail et leurs caractérisations. Il décrit également l'approche expérimentale et les dispositifs utilisés pour les différents essais réalisés. Conformément aux différentes normes, nous avons procédé à certains essais pour caractériser les matériaux. Il s'agit notamment des essais de l'analyse granulométrique, la masse volumique apparente, la masse volumique spécifique et l'équivalent de sable.

L'essai de l'analyse granulométrique conduit à la détermination de certains indicateurs tels que le module de finesse qui permet d'optimiser le dosage en eau afin d'avoir une ouvrabilité satisfaisante des composites et de limiter le risque de ségrégation, le coefficient de courbure et le coefficient d'uniformité permettant d'avoir la graduation et l'uniformité des grains constituant le matériau. Les essais des masses volumiques (apparente et spécifique) permettent de déterminer les densités des différents matériaux qui justifieront le type de substitution (massique ou volumique). Enfin, l'essai d'équivalent de sable permettra de classer le sable suivant sa propreté. A une classe de propreté du sable, correspond une qualité du béton. Ainsi, pour des bétons exceptionnels à haute résistance, il est recommandé d'utiliser un sable très propre.

II.1 LES PROTOCOLES D'ESSAIS

II.1.1 L'analyse granulométrique par tamisage

Elle permet de déterminer la granularité des grains des matériaux, qui constitue la distribution dimensionnelle des grains. L'essai s'effectue conformément à la norme NF P 18-560. Il consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas (figure 12).



Figure 12: Série de tamis emboîtés

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. A l'issu de l'essai, on trace la courbe granulométrique qui donne les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant le matériau. A partir de la courbe granulométrique, on détermine certains indicateurs permettant de caractériser le matériau. Il s'agit notamment des coefficients d'uniformité (Cu) et de courbure (Cc) définis respectivement par les équations 1 et 2. Enfin, on calcule le module de finesse (Mdf).

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Eq.1}$$

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad \text{Eq.2}$$

D_{10} , D_{30} , D_{60} représentent les diamètres des éléments correspondant respectivement à 10%, 30% et 60% de tamisât cumulé. Lorsqu'on a :

$Cu < 2$, la granulométrie est dite uniforme

$Cu > 2$, la granulométrie est dite étalée

Un sable est bien gradué lorsqu'on a : $1 \leq Cc \leq 3$ (LCPC, 1998)

Mdf

$$= \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis de diamètre(mm)}\{0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5\}$$

Pour une bonne ouvrabilité et une bonne résistance, il est recommandé un module de finesse compris entre 2,2 et 2,8.

II.1.2 La masse volumique apparente

La masse volumique apparente, souvent appelée densité apparente par abus de langage, est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume y compris le volume d'air interstitiel. Cette masse peut varier en fonction du degré de tassement du matériau. La norme NFP 18-555 définit un cône normalisé (figure 13) permettant de fixer la hauteur de chute des grains afin d'avoir un tassement constant à tous les essais réalisés sur l'échantillon. La masse volumique notée ρ est obtenue en faisant le rapport de la masse par le volume du récipient. Le volume du récipient est déterminé en le pesant rempli d'eau. Connaissant la masse volumique de l'eau, le volume du récipient est obtenu en faisant le rapport de la masse pesée par la masse volumique de l'eau.



Figure 13: Cône normalisé pour la masse volumique apparente

II.1.3 La masse volumique spécifique

La masse volumique spécifique notée ρ_s est définie comme étant la masse du matériau par unité de volume sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains. Pour plus de précision, l'essai a été effectué au pycnomètre à air (figure 14). Le principe de fonctionnement de l'appareil est basé sur la loi de Boyle-Mariotte appliquée à l'air contenu dans les enceintes du pycnomètre. L'essai est effectué conformément à la norme EN 1097-7. Pour une pression de 23 mWs, l'étalonnage donne une valeur du volume lu V_{lu} du matériau dans la cuve du pycnomètre définie par l'équation 3.



Figure 14: Pycnomètre à air

$$V_{lu} = \left(\frac{\bar{P}' - 4,4174}{\bar{P}' - 1} \right) * 1214,7465 \quad \text{Eq.3}$$

A partir du volume lu, le poids volumique spécifique est déterminé par l'équation 4.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_{lu} - V_{eau}} [kN/m^3] \quad \text{Eq.4}$$

Avec :

\bar{P} : Pression moyenne lue, exprimée en mWs

V_{lu} : Volume de matériau dans la cuve en cm^3

1214,7465 : Volume total des deux enceintes en cm^3

4,4174 : La pression en mWs obtenu en partant de 23 mWs dans le cas d'une cuve sans matériau

V_{eau} : Volume d'eau ajoutée au matériau ($V_{eau} = 0$ s'il n'y a pas d'ajout d'eau)

1 : La pression atmosphérique en mWs.

A partir du poids spécifique et de l'intensité de la pesanteur g , on détermine la masse volumique spécifique par l'équation 5.

$$\rho_s = \frac{\gamma_s}{g} \quad \text{Eq.5}$$

II.1.4 L'équivalent de sable

L'essai permet d'évaluer la propreté des sables. La procédure et les équipements sont conformes à la description de la norme NF P 18-598. Il consiste à séparer les particules fines contenues dans le sable des éléments sableux plus grossiers. La procédure normalisée permet de déterminer ainsi un coefficient d'équivalent de sable qui permet de quantifier sa propreté.



Figure 15: Matériels pour l'essai d'équivalent sable

L'échantillon est lavé et laissé reposer pendant 20 minutes et on mesure les hauteurs :

- h_1 : hauteur sable propre + éléments fins
- h_2 : hauteur sable propre seulement

Par convention, l'équivalent de sable est défini par :

$$ES = 100 * \frac{h_2}{h_1} \quad \text{Eq.6}$$

Selon le moyen utilisé (visuel ou piston) pour déterminer la hauteur h_2 , on détermine ES_V (équivalent de sable visuel) ou ES_p (équivalent de sable au piston).

II.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX

II.2.1 Le ciment

Le liant hydraulique utilisé dans cette étude est un ciment Portland artificiel (CEM I 42.5) de la société CIMTOGO. Les mesures effectuées en laboratoires donnent des masses volumiques spécifique et apparente respectivement de $3,15 \text{ t/m}^3$ et $1,08 \text{ t/m}^3$ avec une surface spécifique de $2,96 \text{ m}^2/\text{g}$.

II.2.2 Le sable

Le sable utilisé provient de la rivière de Bongré au Burkina Faso. Sa classe granulaire est de 0/5 mm. L'essai d'équivalent sable, après lavage ($ESp = 98 > 80$) indique qu'il est très propre, donc classé bon pour des bétons exceptionnels de très haute résistance.

II.2.3 Le mâchefer

Le mâchefer utilisé dans ce travail comme substituant volumique du sable provient des centrales électriques d'Anou Araren au Niger. Il se présente sous forme granulaire avec des diamètres variant de 2 à 16 mm (figure 16.b), il a été broyé à l'appareil Los Angeles afin d'avoir une granulométrie se rapprochant de celle du sable (figure 16.a). Les analyses chimique et minéralogique effectuées par Vinai et al (Vinai, et al., 2012) donnent une composition minéralogique du mâchefer présentée dans le tableau 4.

Tableau 4: Composition minéralogique du mâchefer de SONICHAR (Vinai, et al., 2012)

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

Ces résultats montrent que le mâchefer de SONICHAR est constitué principalement de SiO₂, de Al₂O₃ et de FeO ; ce qui est conforme aux informations de la littérature (tableau 1)



(a)

(b)

Figure 16: Granulats de mâchefer

Les résultats de l'analyse granulométrique par voie sèche du mâchefer et du sable sont présentés sur la figure 17. Les essais de caractérisation sont présentés en Annexes (I, II, III, IV et V).

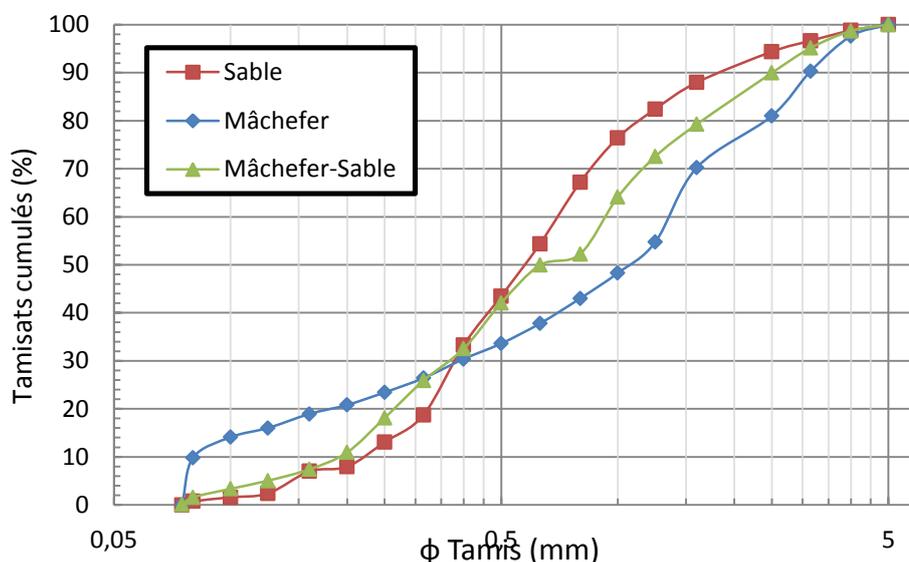


Figure 17: Courbes granulométriques des granulats

Quelques caractéristiques physiques des granulats sont présentées au tableau 5

Tableau 5: Caractéristiques physiques des granulats

Matériaux	Caractéristiques physiques							
	Mdf	Ab (%)	Cu	Cc	ρ (t/m ³)	ρ_s (t/m ³)	ES	
							ES _v	ES _p
Sable	2,4	-	5,8	1,8	1,54	2,63	99	98
Mâchefer	2,8	19	16,3	1,54	0,98	2,28	-	-

Les résultats du tableau 5 indiquent que les modules de finesse des matériaux se situent dans le fuseau de préférence (2,2 et 2,8) pour une bonne ouvrabilité et une bonne résistance. Les coefficients d'uniformité et de courbure montrent que les matériaux sont bien gradués ($1 \leq Cc \leq 3$) avec des granulométries étalées ($Cu > 2$). On constate à partir des masses volumiques que le mâchefer est plus léger comparé au sable, ceci justifie le choix d'une substitution volumique. L'essai d'équivalent de sable montre qu'il est classé très propre, donc bon pour des bétons exceptionnels de haute résistance. On retient également que le mâchefer présente un coefficient d'absorption d'eau assez élevé, mais ce coefficient est en accord avec les données de la littérature (tableau 2).

II.2.4 L'adjuvant

Pour assurer l'ouvrabilité des composites, nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau à base de copolymère acrylique, dont les caractéristiques sont présentées

dans le tableau 6. Le dosage est proportionnel à la masse du ciment et égal à 0.25%, 0.75% et 2% respectivement pour le rapport E/C = 0.5, 0.4 et 0.3.

Tableau 6: Caractéristiques du superplastifiant (Sika, 2013)

Densité	pH	Teneur en ions Cl ⁻	Teneur en Na ₂ O _{éq}	Extrait sec
1,06	4,5	≤0,1%	≤1,5%	31,5 (%)

II.3 ELABORATION DES COMPOSITES

Les composites élaborés dans cette étude sont des mortiers. La procédure consiste à élaborer conformément à la norme EN 196-1 le mortier normal (sable/ciment = 3 et eau_{efficace}/ciment = 0,5) qui constitue la référence. Ensuite le sable a été substitué par le mâchefer à des proportions volumiques bien définis : 0%, 50% et 100%. Pour chaque rapport E/C = 0,5 ; E/C = 0,4 et E/C = 0,3, on a trois types de formulations : M0, M50 et M100 qui correspondent respectivement à une substitution de 0%, 50% et 100% de sable par le mâchefer. Le dosage en superplastifiant permet d'avoir une même maniabilité et de garder la même aptitude de mise en place des composites. A partir des masses volumiques spécifiques et des rapports E/C et S/C, nous avons calculé les différentes masses des matériaux composant le mortier tout en considérant une perte de 15% de matériaux (Annexe VII). Les éprouvettes ont été confectionnées et moulées conformément au type d'essai auquel elles sont destinées. Pour chaque type d'essai, trois échantillons sont confectionnés, démoulés après 24h et conservés dans l'eau non saturée à une température de 20°C pendant 28 jours. Le malaxage des mortiers de référence se fait conformément à la procédure décrite par la norme EN 196-1, l'ajout des granulats du mâchefer induit une minute supplémentaire de malaxage. Le tableau 7 présente la composition des différents mélanges

Tableau 7: Composition des différents mélanges

<i>Eau/Ciment</i>	<i>Composite</i>	<i>Eau (kg/m³)</i>	<i>Ciment (kg/m³)</i>	<i>Sable (kg/m³)</i>	<i>Mâchefer (kg/m³)</i>	<i>Superplastifiant (kg/m³)</i>
0,5	M0	296,88	593,75	1781,25	0,00	1,48
	M50	296,88	593,75	890,63	731,11	1,48
	M100	296,88	593,75	0,00	1462,22	1,48
0,4	M0	237,50	593,75	1781,25	0,00	4,45
	M50	237,50	593,75	890,63	731,11	4,45
	M100	237,50	593,75	0,00	1462,22	4,45
0,3	M0	178,13	593,75	1781,25	0,00	11,88
	M50	178,13	593,75	890,63	731,11	11,88
	M100	178,13	593,75	0,00	1462,22	11,88

II.4 DISPOSITIFS ET ESSAIS DE CARACTERISATION PHYSIQUE

II.4.1 Masse volumique

a) Essai sur les composites à l'état frais

A l'état frais, la masse volumique des composites est mesurée sur des éprouvettes compactées à la table à choc afin de minimiser le pourcentage des vides. La méthode consiste à utiliser un récipient de volume V et de masse m_1 connus. Après compactage, on pèse une masse m_2 et la masse volumique des composites est calculée par l'équation :

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad \text{Eq.7}$$

b) Essai sur les composites à l'état durci

A l'état durci, pour une meilleure précision, la masse volumique est déterminée par pesée hydrostatique. La procédure consiste à peser l'éprouvette dans l'air (m_1) puis dans l'eau (m_2). La différence $m_1 - m_2$ représente la masse du volume d'eau déplacé (V), qui correspond au volume de l'éprouvette. La masse volumique de l'éprouvette est définie par :

$$\rho = \frac{m_1}{V} \quad \text{Eq.8}$$

Connaissant la masse volumique de l'eau ρ_e , le volume d'eau déplacé est donné par :

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_e} \quad \text{Eq.9}$$

Ainsi, la masse volumique de l'éprouvette est alors donnée par l'équation 10.

$$\rho = \rho_e \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad \text{Eq.10}$$

II.4.2 Porosité accessible à l'eau

La porosité est définie comme étant la propriété d'un milieu de comporter des pores ; c'est à dire des vides interstitiels qui peuvent être interconnectés ou non. Elle est exprimée comme étant le rapport du volume de ces vides au volume total du milieu. Elle est aussi définie comme une propriété caractéristique d'un milieu poreux.

- Lorsque ces vides sont isolés et inaccessibles, ne permettant aucune perméabilité, on parle de la porosité fermée (figure 18.a).

- Dans le cas où les pores sont interconnectés et forment un espace continu participant à un transfert de matières dans le matériau, il s'agit d'une porosité ouverte (figure 18.b)

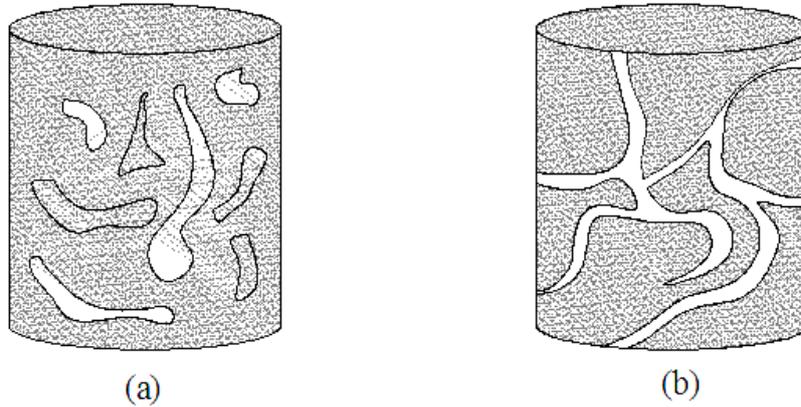


Figure 18: Illustration des matériaux poreux

Pour cette étude, il est question de déterminer la porosité communicante accessible à l'eau notée ϕ_{com} . Conformément à la norme ISO 5017, la procédure utilisée pour déterminer la porosité des composites consiste à les immerger dans l'eau à une température de 20°C pendant 24h au bout desquelles les éprouvettes arrivent à saturation totale. Après saturation, les éprouvettes sont pesées à l'air (M_{air}) et à l'eau (M_{eau}) ; ensuite la masse sèche (M_{sec}) est déterminée en séchant les éprouvettes à une température de 105°C jusqu'à masse constante. Enfin, la porosité communicante est calculée par l'équation 11.

$$\phi_{com}(\%) = 100 \times \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad \text{Eq.11}$$

II.5 DISPOSITIFS ET ESSAIS DE CARACTERISATION MECANIQUE

La caractérisation mécanique des composites a été réalisée à travers trois essais; il s'agit notamment de l'essai de compression sur des éprouvettes cylindriques de dimensions $\varnothing 50 \times 100$ mm, l'essai de flexion trois points sur des éprouvettes prismatiques $40 \times 40 \times 160$ mm³ et l'essai de traction par fendage sur des éprouvettes cylindriques de dimensions $\varnothing 40 \times 50$ mm.

Tous les essais mécaniques ont été réalisés conformément aux normes NF P 18-411, NF P 18-412 et à l'aide d'une presse hydraulique multi-essais de capacité maximale 300 kN contrôlée par ordinateur, équipée des dispositifs pour les différents essais.



a) Presse multi-essais

b) Dispositif de flexion

c) Dispositif de compression et traction

Figure 19: Presse et dispositifs d'essais mécaniques

II.5.1 Essai de compression

Il s'agit de la compression uniaxiale. L'essai est réalisé sur trois éprouvettes de diamètre 5 cm et de hauteur 10 cm conservées dans l'eau jusqu'à 28 jours, mais sorties 24h avant le jour de l'essai.

Le principe consiste à soumettre l'éprouvette à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance en compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette. La vitesse de chargement est fixée à 0,250 mm/mn.

En notant F_c la charge de rupture, la résistance en compression de l'éprouvette est donnée par l'équation suivante :

$$R_c = \frac{4F_c}{\pi D^2} \quad \text{Eq.12}$$

R_c est la résistance en compression exprimée en MPa

F_c exprimée en N

D représente le diamètre de l'éprouvette exprimée en mm.

II.5.2 Essai de flexion trois points

L'essai de flexion est réalisé sur trois éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm³ conservées dans les mêmes conditions que les éprouvettes soumises à la compression.

La vitesse de chargement est fixée 0,05 mm/mn. Le dispositif de flexion est décrit sur la figure 20.

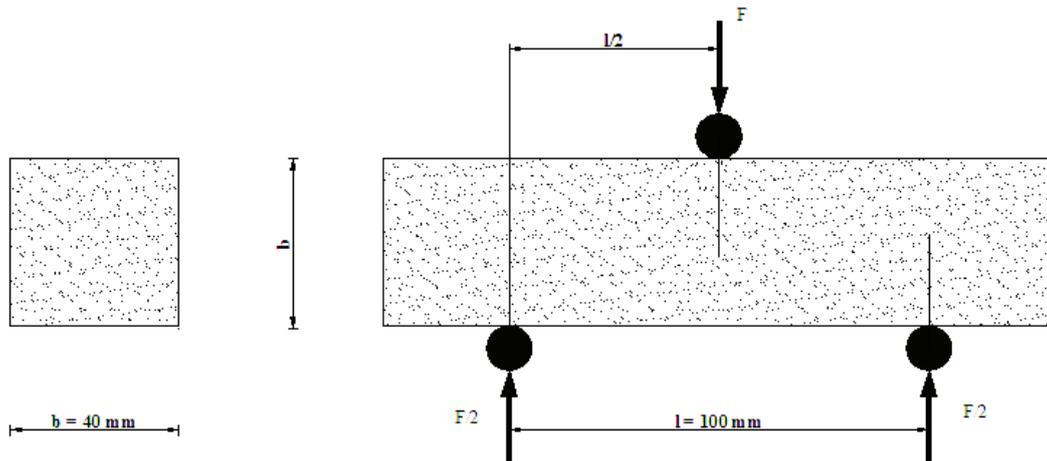


Figure 20: Dispositif pour l'essai de flexion

La contrainte de rupture est donnée par l'équation 13.

$$R_f = \frac{M}{I} y \quad \text{Eq.13}$$

Où M désigne le moment maximal en flexion, I le moment d'inertie et y la position de la fibre la plus tendue à partir de la fibre neutre.

Ainsi, on a :

$$M = \frac{Fl}{4} ; I = \frac{b^4}{12} \text{ et } y = \frac{b}{2} \quad \text{Eq.14}$$

$$R_f = \frac{3 Fl}{2 b^3}$$

R_f en MPa

F en N

l et b en mm

II.5.3 Essai de traction par fendage (essai brésilien)

Le test de traction directe est difficile à réaliser sur des matériaux fragiles, c'est ainsi qu'une technique (brésilienne) a été mise au point pour déterminer la résistance en traction des matériaux fragiles en procédant par essai de fendage sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 4 cm et de hauteur 5 cm conformément à la norme NF P 18-408. Cette technique consiste à appliquer sur l'éprouvette un effort de compression le long de deux génératrices opposées. Cet effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices et la rupture due aux contraintes de traction se produit dans ce plan (figure 21).

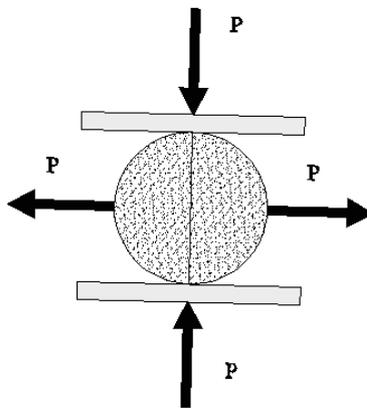


Figure 21: Dispositif pour l'essai de traction par fendage

L'éprouvette est placée entre les deux plateaux de la presse comme indiqué sur la figure 21, la vitesse de chargement est maintenue constante et égale 0,250 mm/mn.

Le plan de l'éprouvette subit une traction d'intensité P dans les deux sens à travers les deux demi-surfaces latérales de l'éprouvette.

Si h est la hauteur de l'éprouvette, d son diamètre et P la charge appliquée, la contrainte de rupture est exprimée par l'équation 15.

$$R_t = \frac{2P}{\pi dh} \quad \text{Eq.15}$$

R_t en MPa

P en N

d et h en mm

II.6 PRETRAITEMENT DES GRANULATS DE MACHEFER

La formulation des matériaux cimentaires à partir des granulats naturels ou recyclés relativement poreux nécessite une bonne connaissance de leurs propriétés, afin de respecter les valeurs limites de composition telles que le rapport E_{efficace}/C maximal. L'absorption à 24 heures est généralement la mesure de référence pour calculer l'eau absorbée (E_{abs}) par les granulats et en déduire l'eau totale (E_{tot}) à partir de l'eau efficace (E_{eff}) par l'équation ci-dessous :

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{eff}} + E_{\text{abs}} \quad \text{Eq.16}$$

Cependant la prise et la structuration de la pâte de ciment ont généralement lieu avant que cette quantité d'eau soit absorbée par les granulats initialement secs ou libérée par des granulats humides. La quantité d'eau restant dans la pâte ne correspond plus au calcul et le rapport E_{eff}/C , paramètre influant essentiellement les propriétés mécaniques et de durabilité des matériaux, s'en trouve alors modifié.

Il est alors important de mieux comprendre l'absorption des granulats ainsi que leurs cinétiques, afin d'ajuster la quantité d'eau nécessaire pour atteindre de meilleures performances en termes de résistances mécaniques et de durabilité. L'absorption d'eau des granulats est caractérisée par un coefficient d'absorption défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition dans l'eau à la masse sèche de l'échantillon. Le coefficient d'absorption d'eau noté Abs est défini par l'équation suivante:

$$Abs(\%) = 100 \times \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}}} \quad \text{Eq.17}$$

Cinétique d'absorption des granulats

Cet essai a pour but d'établir la cinétique d'absorption d'eau des granulats de mâchefer afin de déterminer le coefficient d'absorption d'eau des granulats et de prévenir le temps d'imbibition du matériau avant le malaxage. L'essai a été réalisé par pesée hydrostatique et consiste à peser l'échantillon et le placer dans un tissu quasi-imperméable pouvant retenir les fines afin d'éviter les pertes, suspendu à une balance. Au temps $t = 0$, le tissu est immergé dans l'eau à 20 °C et après 5 minutes, on commence l'enregistrement de la masse à intervalle de temps précis : 5 mn, 10 mn, 30 mn, 1h, 2h, 3h, 8h, 24h jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de variation significative de masse.

Suite à ce chapitre, les essais de caractérisation indiquent que les deux matériaux (sable et mâchefer) présentent des propriétés physiques assez différentes. Cet état de fait nous emmène à penser que la substitution du sable par le mâchefer aura des conséquences significatives sur les propriétés physiques et mécaniques des composites. Nous rappelons une fois de plus que l'essai de masse volumique a montré que les granulats de mâchefer sont plus légers que le sable ; ce qui justifie la substitution volumique. Cependant, l'analyse granulométrique a indiqué que les deux matériaux ont des modules de finesse (2,4 et 2,8 respectivement pour le sable et le mâchefer) qui se situent dans le fuseau préférentiel recommandé par le LCPC (LCPC, 1998) ($2,2 \leq Mdf \leq 2,8$) pour obtenir une bonne ouvrabilité et une bonne résistance mécanique des composites. L'essai de la cinétique d'absorption d'eau a permis de mettre en évidence le caractère absorbant des granulats de mâchefer.

Après formulations des composites, nous avons procédé aux différents essais conduisant à la vérification des objectifs spécifiques de cette étude. Le chapitre qui suit présente les résultats de tous les essais mécaniques et physiques effectués sur les composites.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Il est à rappeler que ce chapitre présente les résultats de tous les essais réalisés lors de cette étude. Les composites élaborés ont été caractérisés à l'état frais à travers la masse volumique et l'affaissement. A l'état durci, les composites ont été soumis aux essais de caractérisations physique et mécanique. La dernière partie de ce chapitre a traité l'influence du prétraitement du mâchefer sur les propriétés des composites à l'état frais et à l'état durci.

III.1 COMPORTEMENT DES COMPOSITES À L'ÉTAT FRAIS

III.1.1 Affaissement au mini-cône d'Abrams

L'essai a été réalisé sur tous les composites et sur chaque rapport E/C. L'utilisation du superplastifiant a permis d'avoir une même maniabilité pour les différents rapports E/C. Les résultats des essais sont présentés sur la figure 22.

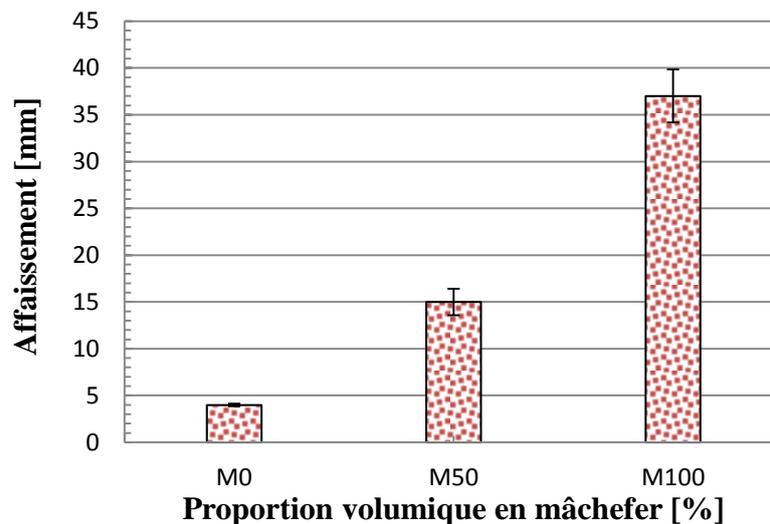


Figure 22: Affaissement des composites en fonction de la teneur en mâchefer

Les résultats de l'essai d'affaissement présentés sur la figure ci-dessus indiquent que l'affaissement augmente lorsque la proportion en mâchefer augmente dans les composites ; ceci est conforme aux résultats de l'étude effectuée par Kim et al. (Kim, et al., 2012). L'affaissement est passé de 4 mm (pour mortier de référence) à 37 mm lorsque le mâchefer est utilisé à 100%. Cette augmentation peut se justifier par l'ajout de l'eau absorbée lors de la formulation qui se traduit par l'augmentation de la fluidité des composites. Toutefois, il est à noter que cette augmentation d'affaissement peut être considérée comme un effet positif dans ce sens que cette fluidité se traduit par une bonne ouvrabilité du matériau.

III.1.2 Masse volumique à l'état frais

La masse volumique est déterminée après compactage à la table à choc. Les résultats sont présentés sur la figure 23.

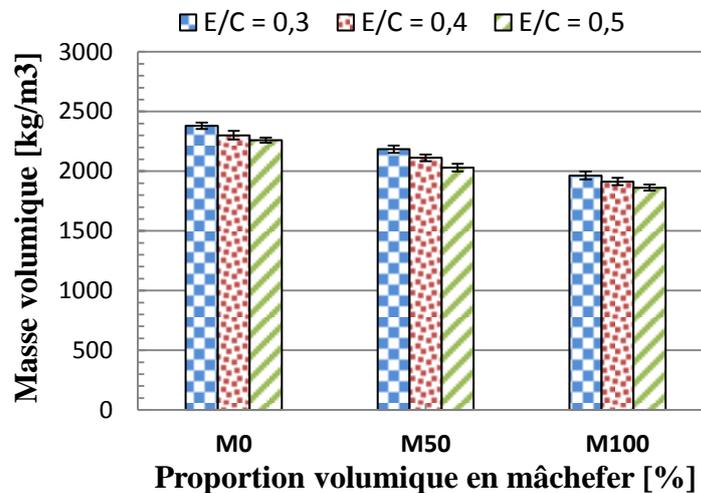


Figure 23: Masse volumique humide en fonction de la teneur en mâchefer

On constate sur la figure 23 que la masse volumique humide diminue avec l'augmentation du taux de substitution. Cette réduction est due à la faible densité des granulats de mâchefer. Pour un même taux de substitution, la masse volumique augmente en fonction de la diminution du rapport E/C, ceci est théoriquement justifié au paragraphe III.2.1.a

III.2 COMPORTEMENT DES COMPOSITES A L'ETAT DURCI

III.2.1 Propriétés physiques

a) Masse volumique sèche

La masse volumique sèche a été déterminée sur des composites à 28 jours de durcissement dans l'eau. L'essai a été réalisé par pesée hydrostatique. Les résultats sont présentés sur la figure 24.

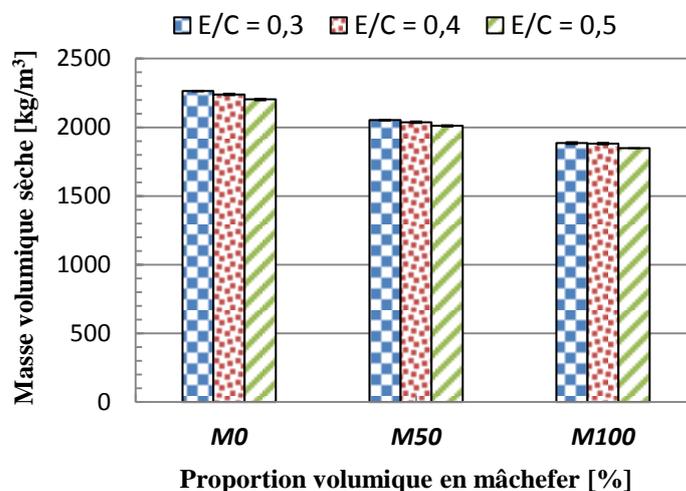


Figure 24: Masse volumique sèche en fonction de la teneur en mâchefer

Les résultats de la figure 24 indiquent que les masses volumiques des composites évoluent inversement à l'augmentation de la proportion en mâchefer. Ceci se justifie par la faible densité des granulats de mâchefer comparés au sable naturel (2,63 pour le sable et 2,28 pour les granulats de mâchefer), en substituant le sable par le mâchefer, on procède à un remplacement des particules denses (sable) par des particules plus légères (mâchefer). D'autre part, on constate une augmentation de la masse volumique liée à la diminution du rapport E/C, ceci s'explique par le fait qu'à volume constant, la diminution de l'eau dans les composites est compensée par une combinaison de matériaux plus denses (ciment, sable et mâchefer). Ces résultats sont conformes à ceux rencontrés dans la littérature (Kim, et al., 2012; Özkan, et al., 2007; Siddique, et al., 2014)

b) Porosité accessible à l'eau

La procédure de calcul de la porosité accessible à l'eau \emptyset_{com} a été détaillée au chapitre 2. Les résultats des essais sont présentés sur la figure 25.

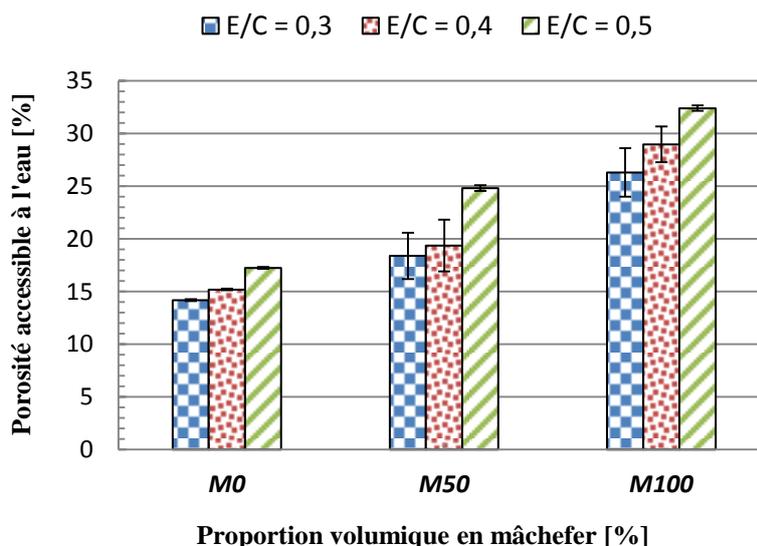


Figure 25: Porosité accessible à l'eau en fonction de la teneur en mâchefer

On constate à partir de la figure 25 que la porosité augmente avec le taux d'incorporation du mâchefer dans les composites. Cette augmentation peut être attribuée à la structure poreuse des granulats de mâchefer. Il faut aussi constater que la porosité diminue avec la diminution du rapport E/C, ceci s'explique par la densification des composites liée à la diminution du rapport E/C illustrée par les résultats de la masse volumique (figure 24). La densification des composites se traduit par la réduction de la connexion des pores, donc une diminution de vides dans les composites.

III.2.2 Propriétés mécaniques

III.2.2.1 Résistance en compression

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de diamètres 5 cm et de hauteur 10 cm. Les résultats sont présentés sur la figure 26.

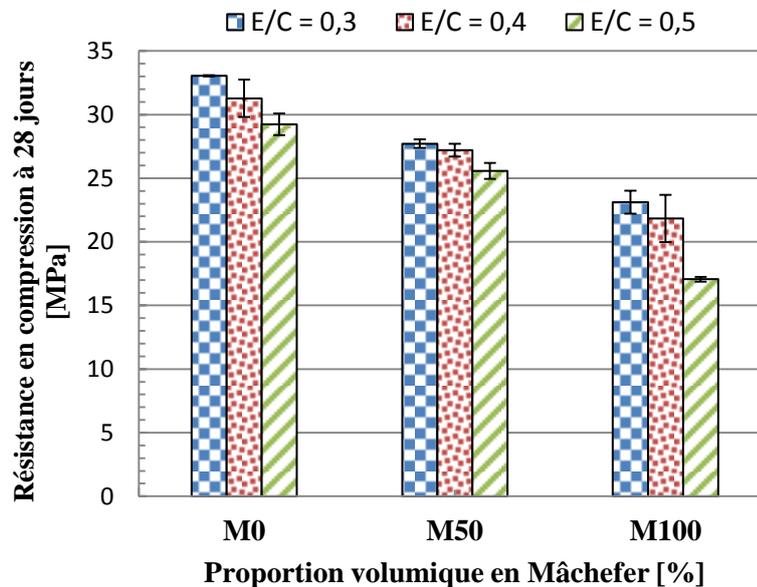


Figure 26: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer

Suite à ces résultats, on peut observer une augmentation des résistances en fonction de la diminution du rapport E/C. Pour une substitution de 100%, on observe une nette amélioration de la résistance lorsque le rapport E/C est passé de 0,5 à 0,4 et 0,3 ; on peut conclure que la qualité de la pâte a une grande influence sur la résistance en compression des composites de type M100. Cependant, on constate une diminution des résistances en fonction du taux de substitution et ceci pour tous les rapports E/C, exceptés les composites de type M50 pour lesquels la diminution du rapport E/C n'a pas eu une grande influence sur la résistance en compression. Pour une substitution de 100%, on observe une diminution de la résistance en compression de 41,62% pour le rapport E/C = 0,5 tandis que pour les rapports E/C = 0,4 et 0,3 on observe respectivement des diminutions de 30,18% et 29,94%. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par Topcu et Bilir (Topcu, et al., 2010) lorsqu'ils ont étudié l'influence du mâchefer sur le mortier. Toutefois, pour tous les rapports E/C et même pour des substitutions de 100%, les valeurs de résistances en compression à 28 jours des différents composites sont toutes supérieures à 15 MPa. Conformément aux recommandations de la RILEM (RILEM LC2, 1978), ces mortiers peuvent être utilisés pour la fabrication du béton de structure.

III.2.2.2 Résistance en flexion

Les résultats de l'essai de la résistance en flexion sont présentés sur la figure 27. En rappel, l'essai a été effectué sur les éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

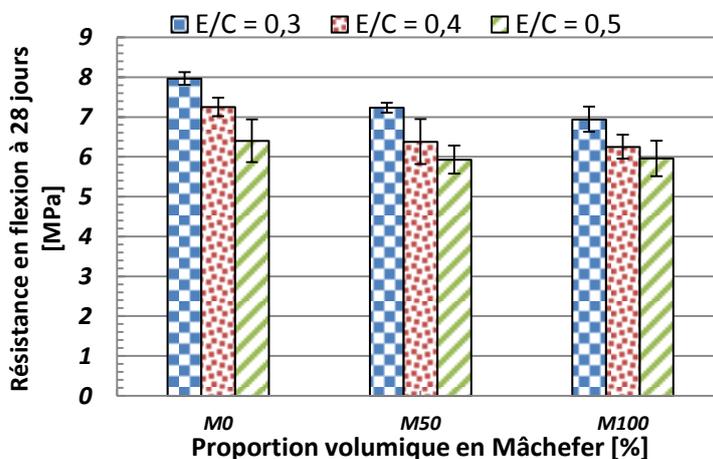


Figure 27: Résistance en flexion en fonction de la teneur en mâchefer

Sur cette figure, on observe une diminution des résistances en flexion en fonction du taux de substitution du sable par le mâchefer. Ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature (Topcu, et al., 2010) ; (Seung, et al., 2008) ; (Yuksel, et al., 2007). Cependant, on observe une augmentation de la résistance liée à la diminution du rapport E/C. On conclut que l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment a eu une grande influence sur la résistance en flexion et ceci à tous les taux de substitution.

III.2.2.3 Résistance en traction

L'essai de traction a été effectué sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 4 cm et de hauteur 10 cm. Les résultats sont portés sur la figure 28.

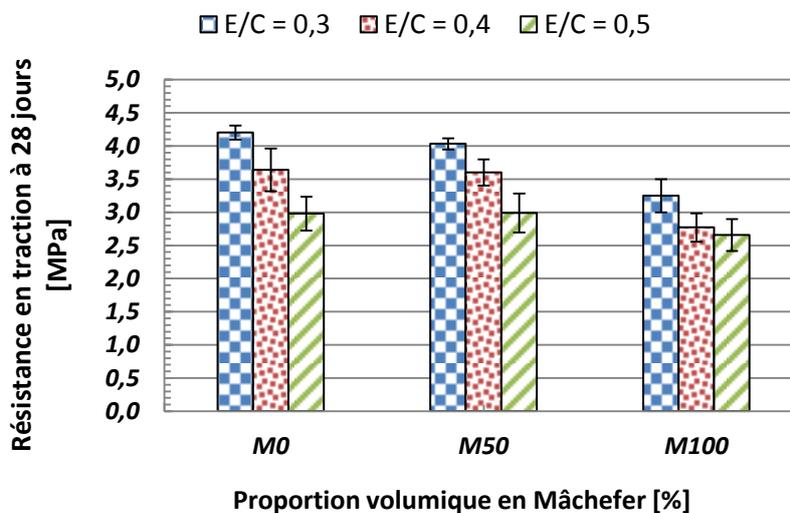


Figure 28: Résistance en traction en fonction de la teneur en mâchefer

On observe également une diminution de la résistance en traction lorsque le taux de substitution augmente. Toutefois on constate aussi que l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment a nettement amélioré les résistances en traction. La diminution de la résistance en fonction du taux de substitution est en accord avec les résultats de la littérature (Aggarwal, et al., 2007), (Ghafoor, et al., 1998a) et (Yuksel, et al., 2007).

La diminution des résistances peut s'expliquer par la structure poreuse, la fragilité et la faible densité des granulats de mâchefer comparés au sable naturel. D'autre part, on a constaté une augmentation liée à l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment. Ceci peut s'expliquer par la densification des composites illustrée par les résultats de la masse volumique sèche (figure 24) et de la porosité des composites (figure 25). En effet, la diminution du rapport E/C entraîne une réduction de l'eau libre dans les composites, donc après départ de cette eau, la création des pores est atténuée. La figure 29 illustre cette hypothèse en montrant la bonne corrélation entre la masse volumique sèche des composites et la résistance en compression.

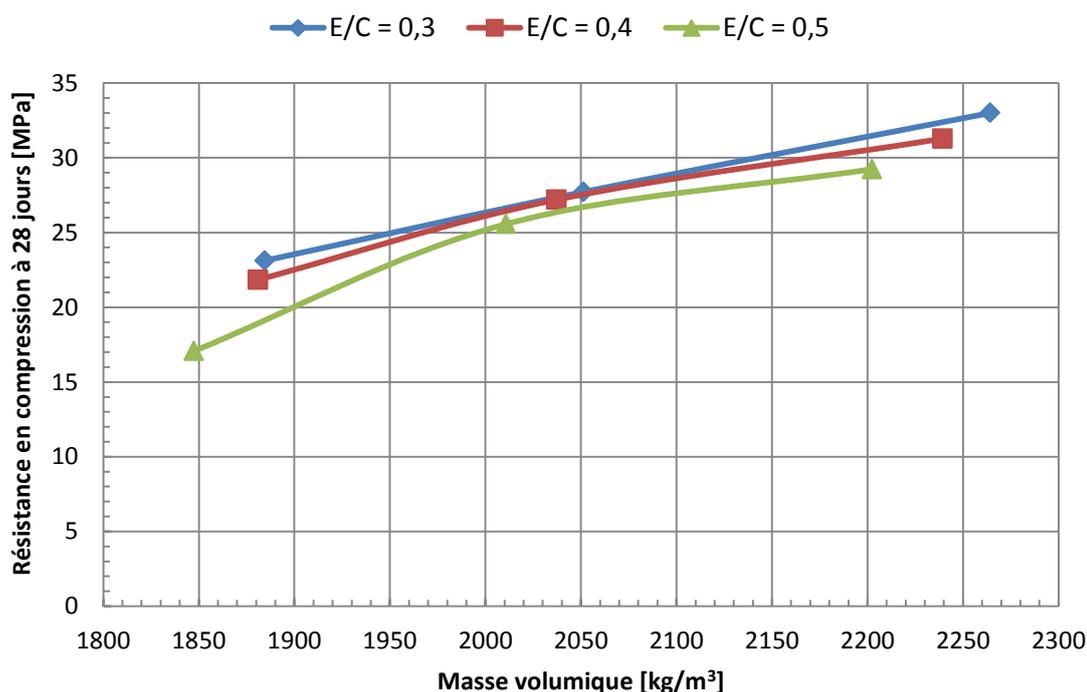


Figure 29: Résistance en compression en fonction de la masse volumique sèche

Sur la figure 29, on remarque que la résistance en compression est directement liée à la masse volumique sèche des composites. En effet, plus le matériau est dense, plus il est résistant. Ceci est dû au fait que la densification des matériaux conduit systématiquement à la réduction de la porosité, qui à son tour se traduit par une amélioration des résistances.

III.3 INFLUENCE DU PRETRAITEMENT SUR LES PROPRIETES DES COMPOSITES

Le prétraitement consiste à saturer les particules du mâchefer avant le malaxage. Ceci laisse le temps nécessaire aux particules poreuses de mâchefer d'absorber toute la quantité d'eau absorbée avant le malaxage. Ça permet d'éviter le surplus d'eau libre dans les composites.

III.3.1 Cinétique et coefficient d'absorption d'eau des granulats de mâchefer

L'essai a été décrit au paragraphe II.6 du deuxième chapitre. Les résultats sont présentés sur la figure ci-dessous.

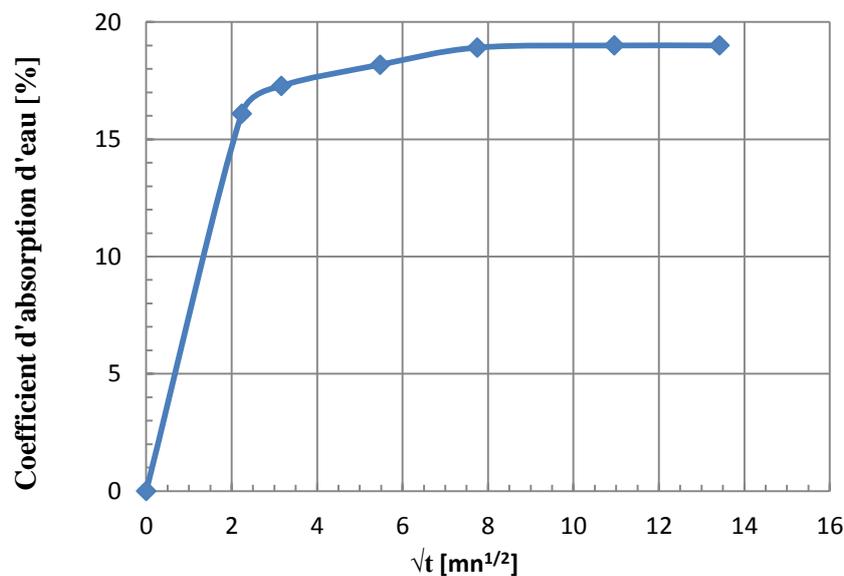


Figure 30: Cinétique d'absorption des granulats du mâchefer

Sur la figure, on peut remarquer que la courbe de la cinétique se présente en deux parties. La première, quasi-linéaire, caractérisée par une pente assez forte, exprime la forte absorption d'eau des granulats dans les cinq (5) premières minutes. La seconde partie curviligne se stabilise au bout d'une heure de temps ; elle caractérise la saturation des particules.

Suivant le résultat de l'essai, les particules du mâchefer arrivent à saturation au bout d'une heure d'imbibition dans l'eau, soit un coefficient d'absorption d'eau de 19%.

III.3.2 Influence sur l'affaissement

Pour étudier l'influence du prétraitement, le mâchefer a été saturé selon le coefficient d'absorption pendant une heure avant le malaxage. Les résultats des essais de l'affaissement sont présentés sur la figure 31.

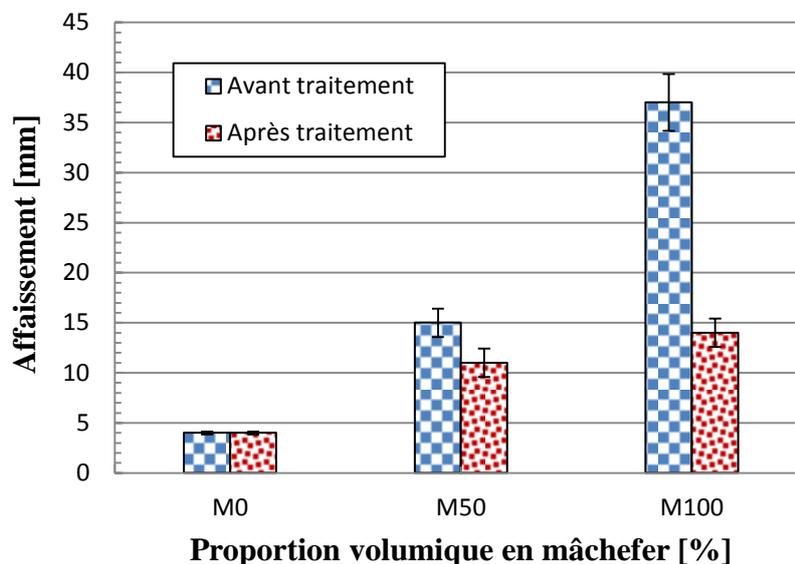


Figure 31: Affaissements des composites traités et non traités en fonction de la teneur en mâchefer

Les résultats de l'essai montrent une diminution de 26,67% pour une substitution 50% et 62,16% pour une substitution de 100%. Les affaissements passent de 15 mm et 37 mm respectivement à 11 mm et 14 mm.

Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait qu'avant le traitement, compte tenu de la durée de malaxage, la quantité d'eau absorbée calculée n'a pas été absorbée totalement par les granulats, donc une partie s'est ajoutée à l'eau de gâchage et a entraîné une augmentation de la fluidité. Par contre, après le traitement, toute la quantité d'eau absorbée ajoutée a été totalement absorbée par les particules, par conséquent l'eau de gâchage ne subit aucune modification, ce qui explique cette réduction d'affaissement. La différence d'affaissement entre M50 et M100 après traitement s'explique par l'absorption d'eau du sable qui n'a pas été prise en compte dans cette étude.

III.3.3 Influence sur les propriétés mécaniques

Les composites ont été caractérisés mécaniquement afin d'évaluer l'influence du traitement sur les propriétés à l'état durci. Les figures ci-dessous présentent les résultats pour le rapport E/C = 0,5 en comparaison avec les composites non traités (Voir les résultats des autres rapports E/C en Annexe VIII et IX).

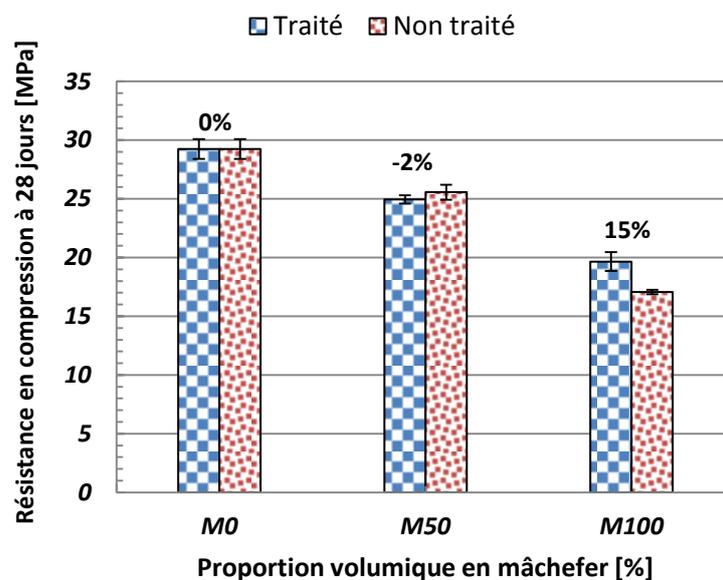


Figure 32: Résistance en compression des composites traités et non traités en fonction de la teneur en mâchefer

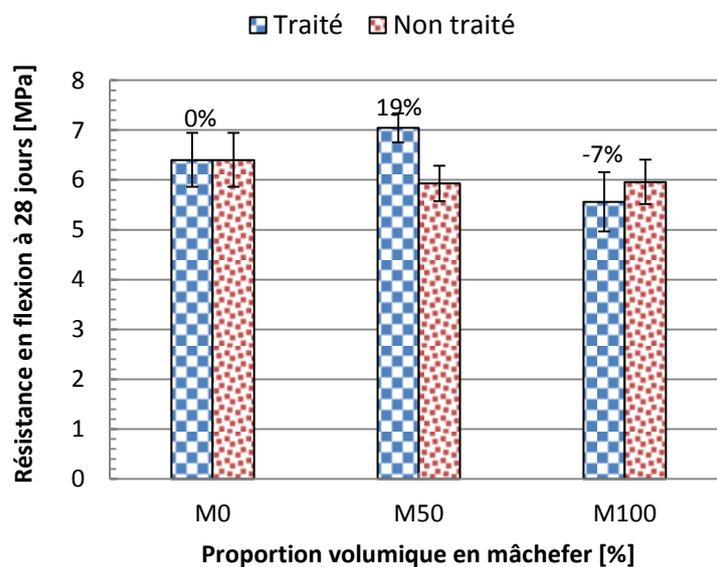


Figure 33: Résistance en flexion des composites traités et non traités en fonction de la teneur en mâchefer

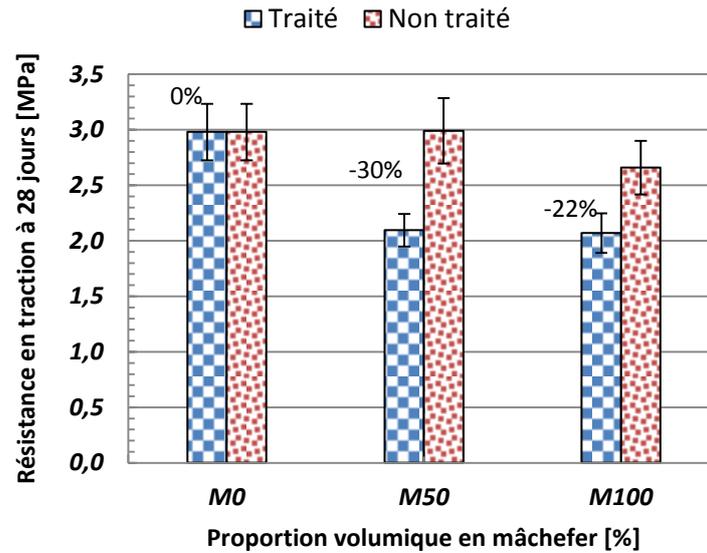


Figure 34: Résistance en traction des composites traités et non traités en fonction de la teneur en mâchefer

Les résultats indiquent que le prétraitement n'a eu pratiquement aucune influence sur les propriétés mécaniques des composites. En traitant le mâchefer, on aurait cru réduire la porosité des composites afin d'améliorer leurs résistances. Cependant, selon la cinétique d'absorption établie ci-haut, les granulats du mâchefer arrivent à saturation au bout d'une heure, donc en formulant les composites sans traitement, selon le temps de malaxage (4 minutes), les granulats de mâchefer n'absorbent pas toute l'eau absorbée, une partie s'ajoute à l'eau efficace et crée ainsi un surplus d'eau. Et ce surplus est absorbé avant le temps de prise du ciment, par conséquent l'eau de gâchage ne connaît aucune modification, ce qui crée logiquement le même espace poreux que dans les composites prétraités.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail se situe dans le contexte du développement durable et l'objectif a été d'améliorer les performances mécaniques du mortier de mâchefer à travers la qualité de la matrice cimentaire. Nos résultats indiquent que l'ajout des granulats de mâchefer induit une augmentation de la porosité, qui s'est traduite logiquement par une diminution des résistances mécaniques du mortier et de la masse volumiques des composites. Toutefois, ces valeurs de résistances restent supérieures à 15 MPa et selon les recommandations de la RILEM (RILEM LC2, 1978), ces mortiers peuvent être utilisés pour la fabrication des bétons de structure. D'autres parts, cette diminution considérable de la masse volumique constitue un atout important dans la construction des structures légères. Cependant, l'amélioration de la qualité de la pâte a contribué à une nette augmentation des résistances mécaniques.

Dans la dernière partie de ce travail, nous avons mis en évidence l'influence du prétraitement des granulats sur les propriétés des composites à l'état frais et à l'état durci. Les résultats ont montré qu'à l'état durci, le prétraitement n'a pas affecté de façon significative les propriétés des composites. Cependant, à l'état frais, on a observé une forte diminution de l'affaissement lorsque les granulats ont été traités. Cette démarche a permis, une fois de plus de mettre en évidence le caractère absorbant des granulats de mâchefer et ainsi de prédire l'aptitude de mise en place des composites élaborés à base du sable de mâchefer.

Nous pouvons retenir de cette étude que l'incorporation du mâchefer dans le mortier présente des résultats prometteurs plus particulièrement dans les structures légères. Toutefois, d'autres études sont nécessaires pour une bonne applicabilité.

Ainsi, comme perspectives, les possibilités suivantes pourraient être nécessaires pour compléter ce travail :

- La diminution des propriétés mécaniques des composites élaborés est due à la nature poreuse des granulats de mâchefer, ainsi il conviendrait d'élaborer des composites à partir d'une substitution mixte, c'est-à-dire l'utilisation du mâchefer et de la cendre volante de mâchefer. A travers l'activité pouzzolanique, la création des silicates de calcium et des alumines hydratés pourraient combler les pores, améliorer la zone d'interface pâte-granulats et par conséquent améliorer les résistances mécaniques.

- ↻ Vu le niveau de porosité des composites, une étude de perméabilité s'avère nécessaire afin d'évaluer la capacité des composites à se laisser traverser par un fluide.
- ↻ Il est également nécessaire d'envisager une étude sur la conductivité thermique des composites.
- ↻ Il faudrait aussi envisager une étude pour évaluer les comportements mécanique et physique des composites à long terme.
- ↻ Nous proposons également une étude sur les possibilités d'utilisation du mâchefer dans les structures routières.

BIBLIOGRAPHIE

- Aggarwal, P. et SM, Y. Gupta. 2007.** Effect of bottom ash as replacement of fine aggregates in concrete. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. 2007. pp. 49-62.
- Andrade, LB. et Rocha JC, Cheriaf M. 2007.** Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement. *Waste management*. 2007. pp. 1190-1199.
- Aramraks. 2006.** Experimental study of concrete mix with bottom ash as fine aggregate in Thailand, In: Symposium on infrastructure development and the environment. *Symposium on infrastructure development and the environment*. 2006. pp. 1-5.
- Arumugam, K. et Ilangovan R., James MD. 2011.** A study on characterization and use of pond ash as fine aggregate in concrete. *International Journal of Civil and Structural Engineering*. 2011. pp. 466-474.
- Bai, Y. et Basheer. 2003.** Influence of furnace bottom ash on properties of concrete . In; *Ice proceedings, structures and buildings, special issue new materials and new uses of for old materials*. 2003. pp. 156,85-92.
- Bai, Y. et Darcy F., Basheer PAM. 2005.** Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. *Construction and Building Materials*. 2005. pp. 961-7.
- Baron, R. et Sauterey. 1982.** Le béton hydraulique: connaissance et pratique. *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*. 1982. pp. 485-501.
- Chun, L.B., et al.** A study on the fundamental properties of concrete incorporating pond-ash in Korea. *The 3rd ACF international conference-ACF/VCA*. pp. 401-8.
- Churcill, V.E. et SN, Amirkhanian. 1999.** Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1999. pp. 11(4),295-297.
- Dupain, R., Lanchon, R. et Saint-Arroman, J.-C. 1995.** GRANULATS, SOLS, CIMENTS ET BETONS. Paris : Editions CASTEILLA, 1995. pp. 79-80.
- Ghafoor, N. et Y., Cai. 1998a.** Laboratory-made roller compacted concretes containing dry bottom ash: part-I-mechanical properties. *ACI Materials Journal*. 1998a. p. 30.
- Ghafoori, N. et Bucholc, J. 1997.** Properties of higg-calcium dry bottom ash concrete. s.l. : ACI Mater, 1997. pp. 90-101.
- Ghafoori, N. et Cai Y. 1998b.** Laboratory-made roller compacted concretes containing dry bottom ash: part-II-long term durability. *ACI Materials Journal*. 1998b. p. 51.

- Ghafoori, N. et J., Bucholc. 1996.** Investigation of lignite based bottom ash for structural concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1996. p. 37.
- Guilbault, O. 2013.** Gestion comparée des mâchefers au Québec et dans d'autres juridictions. *Essai présenté au centre universitaire de formation en environnement*. 2013. pp. 3-11.
- Kim, H.K. Lee. 2011.** Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2011. pp. 1115-22.
- Kim, H.K., J.H., Jeon et H.K., Lee. 2012.** Flow, water absorption, and mechanical characteristics of normal and high-strength mortar incorporating fine bottom ash aggregates. *Construction and Building Materials*. 2012. pp. 249(1)-256(8).
- Kurama, H. et M., Kaya. 2008.** Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture. *Construction and Building Materials*. 2008. pp. 1922-8.
- Lam, C.H.K., Ip, A.W.M., Barford, J.P. et McKay, G. 2010.** Use of incineration MSW Ash. [éd.] <http://www.mdpi.com/2071-1050/2/7/1943>. A review. *Sustainability*. 2010. Vol. 2, 2010.
- LCPC. 1998.** Laboratoire central des ponts et chaussées. [éd.] www.lcpc.fr. 1998.
- Naik, et al. 2003.** Properties of field manufactured cast-concrete products utilizing recycled materials. *Journal of Material Civil Engineering ASCE*. 2003. pp. 400-407.
- Naik, T., et al. 2004.** Precast concrete products using industrial by-products. *ACI Material Journal*. 2004. pp. 101,199-206.
- Özkan, Ö et Isa Yüksel, Özgür Muratoglu. 2007.** Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*. 2007. pp. 961 (1)-972(6).
- Regourd, M. 1982.** "L'hydratation du ciment portland". *Presse de l'Ecole Nationale de Ponts et Chaussées*. 1982. pp. 193-221.
- RILEM LC2. 1978.** Functional classification of lightweight concretes: Recommendation LC2, 2nd edition. 1978. Vol. 11, pp. 281-283.
- Sakshi, Gupta. 2013.** Sustainable Utilization Of Bottom Ash And Foundry Sand In Cementations Composition: REVIEW. *Research in Civil and Environmental Engineering*. 2013. pp. 1-13.
- Seung, Bum Park, et al. 2008.** An experimental study on the hazard assessment and mechanical properties of porous concrete utilizing coal bottom ash coarse aggregate in Korea. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. pp. 348-355.

- Shii-Cong, Kou et Chi-Shun, Poon. 2009.** Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. *Construction and Building Materials*. 2009. pp. 2877-2886.
- Siddique. 2010.** Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials. *Resources, Conservation and Recycling*. 21 Juin 2010. pp. 1-7.
- Siddique, M. Sing. 2012.** Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. pp. 20-32.
- Siddique, R. 2013.** Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self compacting concrete containing coal bottom ash. *Construction and Building Materials*. 2013. pp. 1444(1)-1450(7).
- Siddique, R. et Singh, M. 2014.** Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate. *Construction and Building Materials*. 2014. pp. 246-256.
- Sika, viscocrète krono 951. 2013.** Superplastifiant:Haut réducteur d'eau de nouvelle génération pour l'industrie de la préfabrication. [éd.] www.sika.fr. *Construction*. s.l. : Sika France S.A, 2013. 325, pp. 1-2.
- Targan, S. et Olgun, A., Erdogan, Y., and Sevi, V. 2003.** Influence of natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash, and fly ash on the properties of Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2003. pp. 33,1175-1182.
- Topcu, IB et BilirT. 2010.** Effect of bottom ash as fine aggregate on shrinkage cracking of mortars. *ACI Materials Journal*. 2010. pp. 2877-86.
- Vinai, R., et al. 2012.** Coal combustion residues valorisation: Research and development on compressed brick production. *Construction and Building Materials*. 2012. pp. 1088-1096.
- Yuksel, I. et Genc, A. 2007.** Properties of concrete containing non ground ash and slag as fine aggregate. *ACI Materials Journal*. 2007. pp. 397-403.
- Yurtdas, I. 2003.** Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire: étude expérimentale sur mortiers. *Thèse de doctorat*. s.l. : Université des sciences et technologies de Lille, 2003. p. 10. 3340.

ANNEXES

<i>Annexe I : Tableau d'analyse granulométrique du sable</i>	<i>I</i>
<i>Annexe II : Tableau d'analyse granulométrique du mâchefer.....</i>	<i>II</i>
<i>Annexe III : Calcul des masses volumiques apparentes des matériaux</i>	<i>III</i>
<i>Annexe IV : Calcul des masses volumiques spécifiques des matériaux</i>	<i>III</i>
<i>Annexe V : Equivalent de sable.....</i>	<i>III</i>
<i>Annexe VI : Récapitulatif des caractéristiques des composites élaborés.....</i>	<i>IV</i>
<i>Annexe VII : Equation de formulation du mortier.....</i>	<i>V</i>
<i>Annexe VIII : Influence du traitement sur les propriétés mécaniques, E/C = 0,4.....</i>	<i>VI</i>
<i>Annexe IX : Influence du traitement sur les propriétés mécaniques, E/C = 0,3.....</i>	<i>VII</i>

ANNEXE I : TABLEAU D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE

Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus cumulés	% Refus cumulés	% passant cumulés
38	5,000	0	0,0	100,0
37	4,000	27,35	1,2	98,8
36	3,150	76	3,3	96,7
35	2,500	127,98	5,6	94,4
34	1,600	273,6	12,0	88,0
32	1,250	400	17,6	82,4
31	1,000	536	23,6	76,4
30	0,800	746,69	32,8	67,2
29	0,630	1038,25	45,6	54,4
28	0,500	1286,35	56,5	43,5
27	0,400	1518,44	66,7	33,3
26	0,315	1849,27	81,3	18,7
25	0,250	1978,28	86,9	13,1
24	0,200	2094,82	92,0	8,0
23	0,160	2116,76	93,0	7,0
22	0,125	2221,38	97,6	2,4
21	0,100	2240	98,4	1,6
20	0,080	2258,88	99,3	0,7
21	0,075	2275,8	100,0	0
Paramètres caractéristiques	Module de finesse		2,4	
	D10		0,12	
	D30		0,39	
	D60		0,70	
	Cu		5,8	
	Cc		1,8	

ANNEXE II : TABLEAU D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU MACHEFER

Modules AFNOR	ϕ tamis mm	Refus cumulés	% Refus cumulés	% passant cumulés
38	5,000	0	0,0	100,0
37	4,000	31,55	2,4	97,6
36	3,150	128,49	9,7	90,3
35	2,500	252,85	19,0	81,0
34	1,600	395,92	29,8	70,2
32	1,250	602,5	45,3	54,7
31	1,000	688,15	51,7	48,3
30	0,800	758,37	57,0	43,0
29	0,630	827,77	62,2	37,8
28	0,500	883,43	66,4	33,6
27	0,400	926,41	69,6	30,4
26	0,315	979,16	73,6	26,4
25	0,250	1018,91	76,6	23,4
24	0,200	1053,57	79,2	20,8
23	0,160	1078,51	81,1	18,9
22	0,125	1117,45	84,0	16,0
21	0,100	1142,99	85,9	14,1
20	0,080	1199,89	90,2	9,8
21	0,075	1330,6	100,0	0
Paramètres caractéristiques	Module de finesse		2,8	
	D10		0,08	
	D30		0,40	
	D60		1,30	
	Cu		16,3	
	Cc		1,54	

ANNEXE III : CALCUL DES MASSES VOLUMIQUES APPARENTES DES MATERIAUX

Matériau		Sable		Ciment		Mâchefer	
Prise d'essai N°		1	2	1	2	1	2
Volume de la tare (l)	V	1	1	1	1	1	1
Masse de la tare (g)	T	312,98	312,98	312,74	312,74	312,74	312,74
Masse de la tare+matériau sec (g)	P	1406,47	1391,62	1858,82	1845,96	1295,58	1294
Masse du matériau sec (g)	$P_m = P - T$	1093,49	1078,64	1546,08	1533,22	982,84	981,26
Masse volumique apparente (Kg/m ³)	$\rho = P_m / V$	1093,49	1078,64	1546,08	1533,22	982,84	981,26
Masse volumique moyenne (t/m ³)	ρ_{moy}	1,1		1,54		0,98	

ANNEXE IV : CALCUL DES MASSES VOLUMIQUES SPECIFIQUES DES MATERIAUX

Matériau	Masse du matériau sec	Volume d'eau	1er essai P ₁	2e essai P ₂	3e essai P ₃	P moyenne	Valeur lue V _{lu} (cm ³)	γ_s (KN/m ³)	ρ_s (t/m ³)
Sable	1036	302,09	9,21	9	8,8	9,00	696,05	25,8	2,63
Mâchefer	741,16	342,09	8,6	8,6	8,5	8,57	667	22,4	2,28
Ciment	650	301,17	6,870	6,860	6,865	6,87	508	30,9	3,15

ANNEXE V : EQUIVALENT DE SABLE

Masse de l'échantillon M = 120g		
Prise d'essai N°	1	2
Hauteur h1 (cm)	9,56	9,2
Hauteur h2 (cm)	9,51	9,15
Hauteur h2' (cm)	9,2	9,15
ESv	99,48	99,46
ESp	96,23	99,46
Moyenne ESv	99	
Moyenne ESp	98	

ANNEXE VI : RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DES COMPOSITES ELABORES

Composites		Résistance en compression à 28 J (MPa)		Résistance en flexion à 28 J (MPa)		Résistance en traction à 28 J (MPa)		Affaissement (mm)		Masse volumique sèche (kg/m ³)		Porosité (%)	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
M0	E/C = 0,5	29,24	0,84	6,4	0,54	2,98	0,25	4	0,14	2202,37	5,12	17,25	0,08
	E/C = 0,4	31,28	1,46	7,25	0,23	3,64	0,32	4	0,14	2239,29	4,90	15,20	0,08
	E/C = 0,3	33,05	0,05	7,97	0,16	4,2	0,11	4	0,14	2264,26	1,78	14,26	0,10
M50	E/C = 0,5	25,57	0,64	5,93	0,35	2,99	0,29	15	1,41	2010,83	4,39	24,83	0,27
	E/C = 0,4	27,2	0,49	6,38	0,56	3,6	0,2	15	1,41	2037,3	5,21	19,37	2,44
	E/C = 0,3	27,72	0,33	7,23	0,13	4,03	0,08	15	1,41	2051,47	1,14	18,38	2,21
M100	E/C = 0,5	17,07	0,19	5,96	0,44	2,66	0,24	37	2,83	1847,45	0,52	32,41	0,25
	E/C = 0,4	21,84	1,85	6,25	0,3	2,77	0,21	37	2,83	1880,89	5,93	28,99	1,70
	E/C = 0,3	23,12	0,9	6,94	0,31	3,25	0,25	37	2,83	1884,51	7,42	26,31	2,31

ANNEXE VII : EQUATION DE FORMULATION DU MORTIER

Pour un volume de 1 m^3 , on a :

$$V_e + V_c + V_s = 1$$

En considérant les rapports massiques $\frac{E}{C} = \frac{1}{2}$ et $\frac{S}{C} = 3$ et les masses volumiques spécifiques des matériaux, on a la masse du ciment entrant dans la composition définie par :

$$m_c = \frac{1}{\frac{1}{2\rho_e} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{3}{\rho_s}}$$

Pour un volume V de mortier et une perte de 15%, la masse du ciment est donnée par la formule :

$$m_c = \frac{1,15 \times V}{\frac{1}{2\rho_e} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{3}{\rho_s}}$$

Avec $\rho_e = 1 \text{ t/m}^3$, $\rho_c = 3,15 \text{ t/m}^3$ et $\rho_s = 2,63 \text{ t/m}^3$

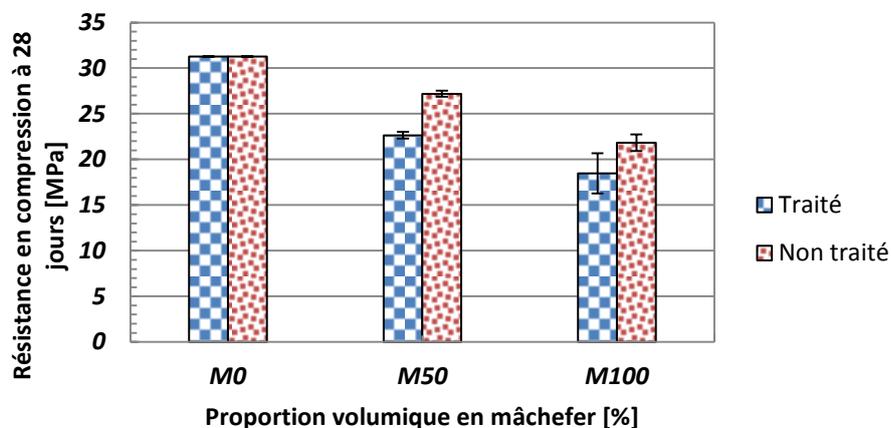
En posant le rapport $\frac{E}{C} = r$, les masses d'eau (m_e) et du sable (m_s) sont données par les formules suivantes :

$$m_e = \frac{1,15 \times r \times V}{\frac{1}{2\rho_e} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{3}{\rho_s}}$$

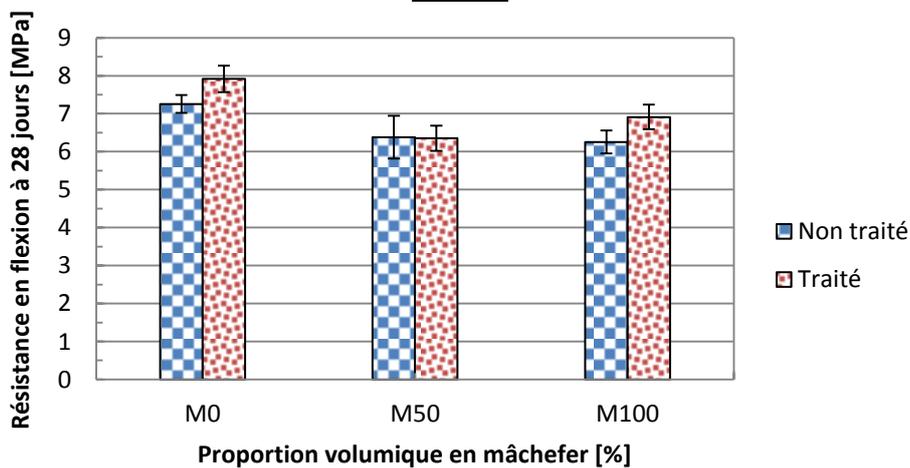
$$m_s = \frac{1,15 \times 3 \times V}{\frac{1}{2\rho_e} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{3}{\rho_s}}$$

ANNEXE VIII: INFLUENCE DU TRAITEMENT SUR LES PROPRIETES MECANIQUES, E/C = 0,4

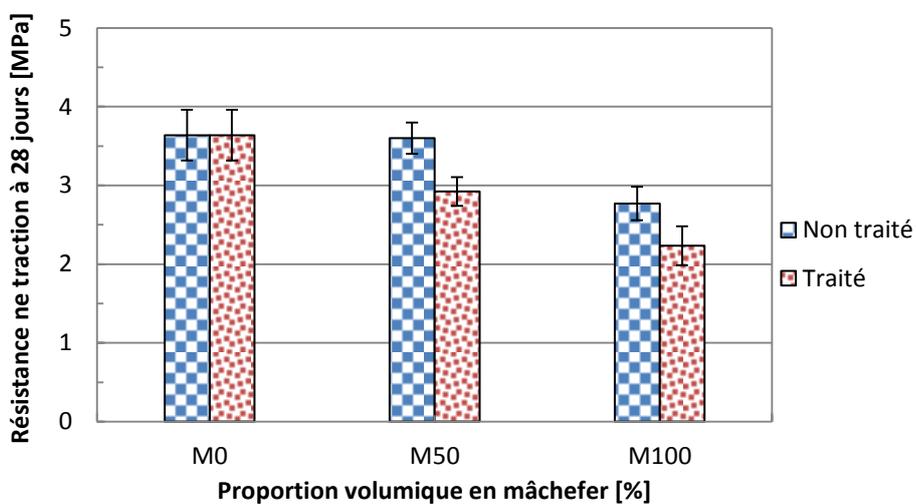
Compression



Flexion

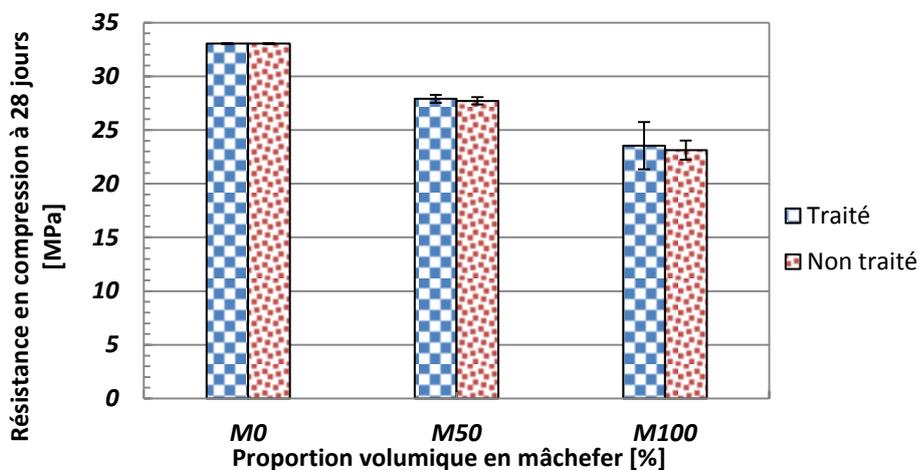


Traction

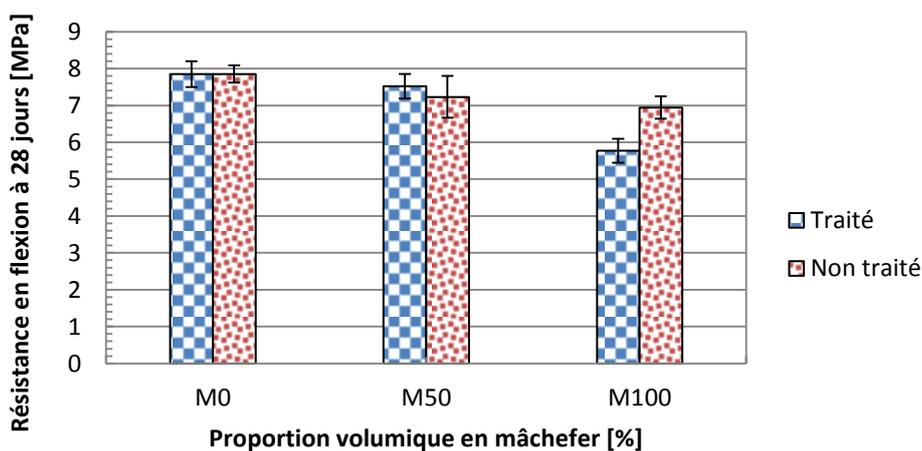


ANNEXE IX : INFLUENCE DU TRAITEMENT SUR LES PROPRIETES MECANIQUES, E/C = 0,3

Compression



Flexion



Tractiion

