Etude du comportement hydrique et thermique du mortier contenant le 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 [Date] par

Séfiontien Maïmouna COULIBALY

Travaux dirigés par : Pr François TSOBNANG, Enseignant-chercheur à 2iE

Dr Adamah MESSAN, Enseignant-chercheur à 2iE

Yaovi Edem BAITE, Doctorant à 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président :

Dr Adamah MESSAN

Membres et correcteurs :

Koffi Agbévidé KOKOLE

Yasmine Binta TRAORE

Césaire HEMA

Promotion **[2014/2015]**

Institut International d'Ingénierie Rue de la Science - 01 BP 594 - Ouagadougou 01 - BURKINA FASO
Tél. : (+226) 50. 49. 28. 00 - Fax : (+226) 50. 49. 28. 01 - Mail : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

CITATION

« *Ne faites pas de petits plans, ils sont incapables de vous pousser à l'action; faites de grands plans, visez haut, dans votre travail et dans vos espoirs* ».

Daniel Burnham

DEDICACES

- A JEHOVAH DIEU
- A mes chers parents Porna COULIBALY et Safiatou COULIBALY
- A ma Grande sœur KABORE née COULIBALY Assana
- A mes petites sœurs COULIBALY Miriam, COULIBALY Anne namari, COULIBALY Esther
- A mes oncles et tantes
- A la Famille RAMADJI au TCHAD
- A mon ami OUATTARA Adama
- A mon ami SAWADOGO Abdoulaye

Durant tout le temps qu'a duré cette formation, je ne me suis pas un seul instant doutée, face aux innombrables défis, de la confiance, de l'amour et du soutien inconditionnel de toutes ces personnes, c'est pourquoi ce travail leur est spécialement dédié.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement le Professeur François TSOBNANG pour ses conseils et ses orientations.

Mes pensées se tournent vers le Docteur Adamah MESSAN, mon directeur de mémoire, pour ses orientations, son soutien, ses conseils et sa confiance à mon égard.

Je voudrais remercier Mr Yaovi Edem BAITE, mon maître de stage, qui m'a encadré et avec qui ce fut un plaisir de pouvoir dialoguer, expliquer ou concevoir de nouvelles approches.

Je tiens également à remercier Mr Agbévidé Koffi KOKOLE et Mr Salifou KABORE pour leurs soutiens et directives qu'ils m'ont accordés tout au long de ce travail.

Je remercie également toute l'équipe du laboratoire LEMC/2iE pour son accueil et son encouragement durant la période de stage.

A mes collègues de stage HOULJAKBE H. Dagou, RAMADJI Christian RASOLOFONIRINA T. Johanesa, et TUYISHIME Honoré, je leur dis merci pour les observations et les encouragements.

Mes remerciements s'adressent de même à tout le corps professoral de 2iE, qui malgré toutes les difficultés nous a accompagné durant cinq années, à travers ses qualités scientifique et pédagogique qui ont été pour moi très riches d'enseignements.

Pour terminer, je tiens sincèrement à remercier du fond du cœur ma mère et mon père pour m'avoir soutenue et encouragée dans mes études.

Merci papa !

RESUME

Notre travail de recherche s'inscrit dans le contexte du développement durable. Il vise à recycler les quantités importantes de mâchefers de charbon produites par l'entreprise SONICHAR comme nouvelle source de matière dans divers secteurs notamment dans le domaine du génie civil et tente d'élaborer de nouveaux matériaux composites incorporant des granulats de mâchefer. Les composites ont été élaborés en introduisant dans des mortiers cimentaires par substitution volumique définis du sable de mâchefer à 0% ; 50% ; 100% et en améliorant la qualité de la patte de ciment à des rapports E/C =0,5 et 0,4.

Les mortiers obtenus ont fait l'objet des études de durabilité au cycle thermique, au vieillissement accéléré et au séchage. A la fin de ces études ces mortiers ont ensuite été caractérisés par l'étude de leurs propriétés physiques et mécaniques.

Les résultats obtenus montrent que l'inclusion des granulats de mâchefer dans les mortiers cimentaires améliore les résistances résiduelles dans toutes les études de durabilité. Les études n'influencent presque pas la résistance à la traction. Les propriétés physiques telles que la porosité, l'absorption capillaire subissent aussi une légère augmentation.

Mots Clés :

1 - Mâchefer

2 - Mortier

3 – Durabilité

4- Propriétés Physiques

5- Propriétés Mécaniques

ABSTRACT

Our research task falls under the context of sustainable development. It aim at recycling the significant quantities of coal bottom ash produced by the company SONICHAR as new source of matter in various sectors in particular in the field of the civil engineering and tries to work out new composite materials which incorporate the bottom ash aggregates. The composites were elaborated while introducing into cementing mortars through voluminal substitution definite of the bottom ash sand with 0%; 50%; 100% and by improving quality of the leg of cement to reports/ratios E/C = 0,5 and 0,4.

The mortars obtained were the subject of the studies of durability to the cycle thermal, the ageing and drying. At the end of these studies these mortars were then characterized by the study of their physical and mechanical properties.

The results obtained show that the inclusion of the bottom ash aggregates into the cementing mortars improves residual resistances in all the studies of durability. The studies almost do not influence the tensile strength. The physical properties such as porosity, capillary absorption undergo also a light increase.

Key Word:

1 - Bottom ash

2 - Mortar

3 – Durability

4 - Physical properties

5 - Mechanical properties

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

LEMC : Laboratoire Eco-Matériaux de Construction

MC : Mâchefers de Charbon

MIOM : Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères

RCC : Résidus de Combustion du Charbon

SONICHAR : Société Nigérienne de Charbon

E/C : Eau sur Ciment

MEB : Microscope Electronique à Balayage

SOMMAIRE

Citation i

Dédicaces ii

Remerciements iii

Résumé iv

Abstract v

Liste des abréviations vi

Sommaire vii

Liste des tableaux ix

Liste des figures x

Introduction 1

Chapitre I : Généralités et synthèse bibliographique 3

1. Les matériaux cimentaires 3

1.1 Ciment 3

1.2 Hydratation du ciment 3

1.3 Structure de la pâte de ciment 4

2. Les mâchefers 4

2.1 Généralités sur les mâchefers 4

2.2 Identification du mâchefer utilisé dans notre travail 7

3. Les travaux antérieurs sur l'utilisation des mâchefers dans les matériaux cimentaires 9

3.1 Quelques travaux sur les propriétés des composites à l'état frais 9

3.2 Quelques travaux sur les propriétés des composites à l'état durci 11

3.3 Travaux sur la Durabilité du Béton et du Mortier 15

4. Conclusion partielle 18

Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales 20

1. Les protocoles d'essais de caractérisation physique des matériaux 20

a. L'analyse granulométrique par tamisage 20

b. La masse volumique spécifique 21

c. La masse volumique apparente 23

d. L'équivalent de sable 23

2. Les constituants **25**
2.1 Le ciment 25
2.2 Le sable 25
2.3 Le mâchefer 26
2.4 Le superplastifiant 28
3. Formulation des composites **28**
4. Dispositif et essais de caractérisation physique **29**
4.1 Mesures de vitesse de propagation des ondes ultrasonores 29
4.2 Mesure de l'absorption capillaire 30
4.3 Mesure de porosité communicante 31
5. Dispositif et essais de caractérisation mécanique **32**
5.1 Essai de compression 32
5.2 Essai de traction par fendage (essai brésilien) 32
6. Etudes de la durabilité **34**
6.1 Etude du vieillissement accéléré 34
6.2 Etudes des effets de cycle thermique 34
6.3 Effet de la dessiccation sur les composites 35
7. Conclusion partielle **35**
Chapitre III : Résultats et discussions **37**
1. Etude du cycle thermique **37**
1.1 Caractérisation physique 37
1.2 Caractérisation mécanique 40
2. Influence de la dessiccation sur les propriétés physico-mécaniques des composites **42**
2.1 Caractérisation physique 42
2.2 Caractérisation mécanique 45
3. Etude du vieillissement accéléré **47**
3.1 Caractérisation physique 47
3.2 Caractérisation mécanique 51
4. Conclusion partielle **52**
Conclusions et perspectives **53**
Bibliographie **55**
Annexes **59**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composition chimique des mâchefers (We Energies, 2012) 5
Tableau 2: Analyse chimique du mâchefer de charbon (Vinai R, et al., 2012) 8
Tableau 3: Eléments chimiques identifiés par lixiviation (Vinai R, et al., 2012) 8
Tableau 4 : Classement et qualité de sable (Norme NF 18-598)..... 24
Tableau 5 : récapitulatif des résultats obtenus après essais..... 25
Tableau 6 : Composition des différents mélanges 29
Tableau 7 : Endommagement des composites en fonction de E/C et de la teneur en mâchefer 45
Tableau 8 : Endommagement des composites dû au vieillissement accéléré 51

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Affaissement en fonction de la teneur en mâchefer dans le béton (Kim H.K, et al., 2010) 10
Figure 2: Béton à l'état frais avec (a) et sans (b) granulats de mâchefer (Kim H.K, et al., 2010) 10
Figure 3: Affaissement du béton en fonction de la teneur en mâchefer et du rapport E/C (Bai, 2005) 11
Figure 4 : Masse volumique du béton en fonction de la teneur en mâchefer (Kim H.K, et al., 2010) 12
Figure 5 : Absorption d'eau en fonction de la teneur en mâchefer et de l'âge du béton (Siddique, 2013) 13
Figure 6 : Porosité en fonction de la teneur en mâchefer et de l'âge du béton (Siddique, 2013) 13
Figure 7 : Série de tamis emboîtés 20
Figure 8 : Pycnomètre à air 22
Figure 9 : Cône normalisé 23
Figure 10 : Matériels pour l'essai d'équivalent de sable 24
Figure 11 : Courbe d'analyse granulométrique du sable 26
Figure 12 : Granulats de mâchefer broyés à l'appareil Los Angeles 26
Figure 13 : Courbe d'analyse granulométrique du mâchefer 27
Figure 14 : Courbes d'analyses granulométriques du sable et du mâchefer 27
Figure 15 : Appareil de mesure du temps des ultrasons 29
Figure 16 : Dispositif d'essai d'absorption capillaire 31
Figure 17 : Presse hydraulique contrôlée par ordinateur (a) et dispositif de compression (b) 32
Figure 18 : Schéma du dispositif de traction 33
Figure 19 : Dispositif de traction 33
Figure 20 : Eprouvettes soumises à la traction par fendage 33
Figure 21 : Porosité accessible à l'eau en fonction de la teneur en mâchefer 37
Figure 22 : Absorption capillaire en fonction de la teneur en mâchefer 38
Figure 23: Vitesse des ultrasons en fonction de la teneur en mâchefer 39
Figure 24: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer 40
Figure 25: Résistance en traction en fonction de la teneur en mâchefer 41

Figure 26: Porosité accessible à l'eau en fonction de la teneur en mâchefer 42
Figure 27: Absorption capillaire en fonction de la teneur en mâchefer 43
Figure 28: Perte de masse relative en fonction du temps de séchage 43
Figure 29: Perte de masse relative en fonction du temps de séchage 43
Figure 30: Evolution de la vitesse des ultrasons en fonction de la perte de masse relative 44
Figure 31: Evolution de la vitesse des ultrasons en fonction de la perte de masse relative 44
Figure 32: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer 45
Figure 33: Résistance en traction en fonction de la teneur en mâchefer 46
Figure 34: Porosité accessible à l'eau en fonction de la teneur en mâchefer 47
Figure 35: Absorption capillaire en fonction de la teneur en mâchefer 48
Figure 36: Evolution de la perte de masse relative en fonction du cycle 48
Figure 37: Evolution de la perte de masse relative en fonction du cycle 49
Figure 38: Evolution de la vitesse des ultrasons en fonction de la perte de masse relative 49
Figure 39: Evolution de la vitesse des ultrasons en fonction de la perte de masse relative 50
Figure 40: Vitesse des ondes ultrasons en fonction de la teneur en mâchefer 50
Figure 41: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer 51
Figure 42: Résistance en traction en fonction de la teneur en mâchefer 52

INTRODUCTION

Dans les processus de développement, l'industrialisation à grande échelle n'a pas que des avantages, elle a aussi des inconvénients, notamment la production en grande quantité de déchets industriels qui sont nocifs aussi bien à l'Homme qu'à l'Environnement. La production de ces déchets est si importante qu'elle constitue de nos jours une préoccupation cruciale au regard de la volonté clairement affichée de l'Humanité d'intégrer les principes du développement durable dans toutes ses actions, c'est-à-dire, travailler dans le sens d'un développement qui réponde aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs (Brundtland, 1987). Dans ce sens, le génie civil se pose en acteur clé du développement durable au regard d'une part de sa grande consommation des ressources minérales naturelles, et d'autre part, de sa capacité à contribuer utilement à l'élimination de déchets industriels tel que le mâchefer de charbon minéral.

Le mâchefer de charbon minéral est un déchet industriel issu de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. La Société Nigérienne de Charbon d'Anou Araren (SONICHAR) au Niger en rejette annuellement une quantité considérable. Créée en 1975, la SONICHAR fournit de l'électricité au Niger à partir de l'exploitation d'un gisement de charbon située dans la localité d'Anou Araren à quelques kilomètres d'Agadez. Par an, elle libère et stocke au minimum 150 000 tonnes de mâchefer dont le stockage à la longue pourait s'avérer dangereux et pour l'Homme et pour l'Environnement qui l'entoure.

C'est dans cette situation de préoccupation grandissante liée à la production d'une telle quantité de mâchefer que la SONICHAR collabore depuis un certain temps avec le Laboratoire Eco-matériaux de Construction (LEMC) de l'Institut Internationale d'ingénierie de l'Eau et l'Environnement (2iE) de Ouagadougou dans le sens de trouver un emploi utile à ces déchets dans les travaux de génie civil. Le présent travail de recherche s'inscrit dans ce cadre.

L'objectif général de notre travail de recherche est d'étudier le comportement hydrique et thermique des mortiers formulés avec du sable de mâchefer issus du charbon brulé dans les centrales thermiques de la SONICHAR en substitution volumique du sable naturel et ce, dans le but de proposer un matériau durable à l'industrie du béton. Pour mener à bien ce travail, il s'agit spécifiquement de :

- Déterminer l'effet de la dessiccation sur les propriétés physico-mécaniques du mortier.

- Evaluer les effets du vieillissement accéléré par l'étude du cycle mouillage-séchage sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier élaboré.
- Procéder à une étude du cycle thermique du mortier pour évaluer sa durabilité.

Le travail comporte essentiellement 3 chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique. Il présente d'abord les connaissances générales sur les matériaux cimentaires, ensuite les mâchefers. Enfin il souligne l'état de l'art sur l'utilisation des mâchefers dans les matériaux cimentaires.
- Le deuxième chapitre présente l'identification des matériaux et matériels utilisés et des composites élaborés.

Pour des différents rapports E/C, nous avons élaboré des composites en introduisant dans des mortiers cimentaires par substitution volumique définis du sable de mâchefer à 0% ; 50% ; 100%. Ce chapitre présente également les procédures expérimentales mises en œuvre pour les essais physiques et mécaniques.

- Le troisième chapitre et dernier présente les résultats et discussions des différentes études.

CHAPITRE I : GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce chapitre, nous abordons les matériaux cimentaires dans la généralité, ensuite les mâchefers et quelques-unes de leurs propriétés. Il présente aussi l'état de l'art sur l'utilisation des mâchefers dans les matériaux cimentaires.

1. LES MATERIAUX CIMENTAIRES

Par définition, on dit qu'un matériau est cimentaire dès lors que le liant est un ciment. Comme exemple nous pouvons citer le béton et le mortier qui sont des matériaux cimentaires très utilisés dans la construction. Le béton est composé de ciment, d'eau et de granulats (sable, gravier) tandis que le mortier est composé de sable, de ciment et d'eau. Les granulats présentent généralement des comportements stables. Mais c'est la pâte de ciment qui agit sur le comportement d'un béton ou d'un mortier.

1.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment de façon générale est obtenu à partir d'un ou de plusieurs constituant(s). Le cas du ciment Portland contient quatre constituants principaux : le silicate tricalcique 3 CaO, S_iO_2 (ou C_3S) ; le silicate bi calcique 2 CaO, S_iO_2 (ou C_2S) ; l'aluminatetricalcique 3 CaO, Al_2O_3 (ou C_3A) ; l'aluminoferrite tétra calcique 4 CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3 (ou C_4AF) (CIMbéton, 2005).

Ces constituants présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes :

– des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau ;

– des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité, de la compacité et la diminution du ressuage, etc.).

1.2 Hydratation du ciment

Le ciment anhydre est composé des poudres minérales obtenues par cuisson puis broyage d'un mélange intime de 80% de calcaire et 20% d'argile. Lorsque nous ajoutons de l'eau au ciment, l'eau permet la fluidification et l'hydratation du ciment. Et quand il y'a un mélange d'eau et de ciment à l'interface solide et liquide, il se crée une réactivité et différents mécanismes élémentaires (absorption, hydrolyse, dissolution, solvatation et la cristallisation) conduisant ainsi à l'hydratation du ciment.

1.3 Structure de la pâte de ciment

Lors de l'hydratation de la pâte de ciment, la quantité d'hydrates formés est insuffisante pour remplacer tout le volume initial occupé par l'eau et le ciment. On peut conclure que les matériaux cimentaires sont poreux. Da CHEN (Da CHEN, 2005) a montré par des mesures au porosimètre à mercure que les pâtes de ciment présentent essentiellement des pores :

- Les pores capillaires, correspondant aux pores de grand diamètre de quelques centaines à quelques milliers d'angströms, sont initialement occupés par l'eau de gâchage et non comblés par les hydrates. Leurs dimensions augmentent avec le rapport E/C et diminue avec l'âge.
- Les pores relatifs aux hydrates, correspondant aux pores de petit diamètre d'environ 34 angströms, représentent les espaces interfeuillets. Leur dimension dépend peu du rapport E/C et des conditions de l'hydratation, et sont caractéristiques des hydrates.

2. LES MACHEFERS

2.1 Généralités sur les mâchefers

Avant d'aborder la notion de mâchefer, il est intéressant de savoir ce que c'est qu'un déchet. Un déchet est défini comme toute matière produite par l'homme ou l'activité industrielle et qui ne possède aucune valeur résiduelle (Serpell A, et al., 1998). Les mâchefers sont des résidus d'incinération desquels se distinguent deux grandes familles de mâchefers : les mâchefers de charbon (MC) et les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM).

2.1.1 Mâchefers de charbon (MC)

Le mâchefer est un sous- produit minéral provenant de la combustion du charbon utilisée pour la production de l'énergie (Ömer, et al., 2006). Le charbon, est un combustible fossile formé à partir de la dégradation de la matière organique des végétaux qui s'accumule en couches et composé principalement de carbone, d'hydrogène et d'oxygène (Guilbault Olivier, 2013). Quant à la combustion de charbon c'est un processus qui permet de produire de la chaleur utilisée pour réchauffer de l'eau. La vapeur produite sert à faire tourner des roues, comme dans le cas des anciennes locomotives, ou une turbine couplée à un alternateur, dans le cas des centrales thermiques. Par le biais de ce processus, la combustion du charbon produit des résidus de combustion du charbon (RCC) dans lesquels sont inclus les mâchefers. Ainsi les centrales thermiques produisent deux types de résidus de charbon : les cendres volantes et les résidus solides, ou mâchefers.

a. Les cendres volantes

Elles résultent de la combustion du charbon dans les chaudières. Elles sont constituées des composants inorganiques, présents dans le charbon, qui fusionnent entre eux pendant la combustion et deviennent une matière particulaire de très petite taille. La taille de ces particules varie entre 5 µm et 74 µm (Ariffin K.S, 2007).

b. Les mâchefers ou résidus solides

Ils sont produits par les centrales de charbon sous deux types de technologies. Une chaudière de type fond sec produit des mâchefers gris de la taille d'un sable fin à moyen, comparable à des cendres et une chaudière de type fond humide produit des mâchefers noirs de la taille d'un sable grossier. Les travaux effectués par Ömer et al (Ömer, et al., 2006) révèlent que les propriétés physiques et chimiques du mâchefer de charbon varient et dépendent du type, de la source, de la finesse du charbon brûlé et du type d'opération de combustion.

c. Propriétés chimiques des mâchefers de charbon

La composition chimique des mâchefers varie selon la source et le type de charbon utilisé, mais aussi selon la technologie de combustions utilisée c'est-à-dire la température de combustion, l'additif utilisé et le mode de récupération des cendres (We Energies, 2012). Le tableau ci-dessous présente la composition chimique des mâchefers et montre que le principal composé qu'on retrouve dans le mâchefer de charbon est l'oxyde de silice (SiO_2) suivit de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et de l'oxyde ferrique (Fe_2O_3).

Tableau 1: Composition chimique des mâchefers (We Energies, 2012)

Composé	Mâchefers charbon bitumineux, chaudière à fond sec, % poids	Mâchefers de charbon semi -bitumineux, chaudière à fond sec, % poids	Mâchefers de charbon bitumineux, chaudière à fond humide, % poids	Mâchefers de charbon lignite, chaudière à fond humide, % poids
S_iO_2	61	46,75	48,9	40,5
Al_2O_3	25,4	18,76	21,9	13,8
Fe_2O_3	6,6	5,91	14,3	14,2
CaO	1,5	17,8	1,4	22,4
MgO	1	3,96	5,2	5,6
Na_2O	0,9	1,28	0,7	1,7
K_2O	0,2	0,31	0,1	1,1

d. Propriétés physiques des mâchefers de charbon

Le MC est toujours à l'état solide. Il est recueilli dans une chambre de combustion sous une forme solide granulaire (Ömer, et al., 2007). Les particules de mâchefer sont angulaires, irrégulières et poreuses. Leur granulométrie varie du gravier fin au sable fin (Malkit Singh, et al., 2012). Le mâchefer est plus léger et plus fragile comparé au sable fin. Siddique (Siddique, 2010) a montré que la masse volumique apparente du mâchefer évolue entre 737 et 1586kg /m^3. Les mâchefers ne proviennent pas seulement de la combustion du charbon, ils sont aussi produits lors de l'incinération des ordures ménagères.

2.1.2 Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM)

Les MIOM n'ont rien de commun avec les MC. Ils sont issus de la combustion, souvent imparfaite, de déchets hétérogènes mélangés, mal caractérisés, car de composition et d'origines incontrôlées (Sarazin M, 2003). Le fonctionnement d'une usine d'incinération d'ordures ménagères est assez simple. Premièrement, les déchets sont déversés dans une fosse où ils peuvent être homogénéisés, puis ils sont acheminés dans les fours. Différents types de fours sont utilisés, fonctionnant à des températures de combustion différentes. Généralement, la température de combustion varie de 500 à 800 degré Celsius (°C) (Environnement Canada, 2010). La combustion des déchets génère une chaleur qui peut être partiellement récupérée pour produire de la vapeur. Cette dernière peut ensuite servir au chauffage, à produire de l'électricité, ou bien être vendue. Les MIOM sont aussi produits sous deux types de résidus. Il s'agit des cendres volantes et des mâchefers.

a. Types de résidus des incinérateurs d'ordures ménagères

Les cendres volantes sont récupérées par un dépoussiéreur et/ou un filtre. Elles représentent entre 10 % et 20 % du poids de tous les résidus solides produits par l'incinérateur, le reste étant des mâchefers (Guilbault Olivier, 2013). Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères sont extraits du fond de four, puis mis en pile. Généralement, les MIOM contiennent de nombreux déchets métalliques, des résidus minéraux incombustibles et des imbrûlés (os, pelures de fruits, cartons, plastiques, etc. Les mâchefers contiennent également une foule d'autres composés et résidus, dont certains sont toxiques, par exemple des piles électriques déformées lors de la combustion qui peuvent encore contenir des métaux lourds (Guilbault Olivier, 2013).

Selon Li (Li, 2004) et Lam (Lam, 2010), les caractéristiques physiques et chimiques des MIOM dépendent de la composition des ordures ménagères, du type de four, de la température d'incinération, des conditions d'opération, etc.

b. Propriétés chimique des MIOM

Les principaux composés chimiques qu'on trouve dans les MIOM sont très semblables à ceux retrouvés dans les MC : SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, TiO_2, P_2O_5 et SO_3 (Lam, 2010). Concernant les métaux lourds trouvés dans les mâchefers, les plus communs sont : Cr, Cu, Hg, Cd, Zn et Pb. Plusieurs autres métaux sont aussi présents. Selon Berthelon (Berthelon, 2002), les métaux lourds comptent pour moins de 1 % de la composition des MIOM. Les études scientifiques font consensus sur une chose : selon la répartition et la nature des ordures ménagères, les mâchefers ont des teneurs en métaux lourds extrêmement variables.

c. Propriétés physiques des MIOM

Les MIOM se présentent sous forme de granules grisâtres, friables et hétérogènes de grosseur variable. Ils ont une grande sensibilité à l'eau et des propriétés mécaniques inférieures à celles des matériaux naturels traditionnellement utilisés (EMSE, 2001). De plus les MIOM se distinguent des agrégats naturels par le fait qu'ils sont un mélange d'éléments de natures différentes peu ou pas liés entre eux, se répartissant différemment selon les classes granulométriques et aux caractéristiques différentes (OFFRIR, 2006).

2.2 Identification du mâchefer utilisé dans notre travail

Rappelons que ce travail de recherche utilise le mâchefer de charbon provenant de la SONICHAR et le choix porté sur ce mâchefer est dû au fait que la SONICHAR produit de l'électricité à partir du charbon et libère ainsi plus de 150 000 tonnes de mâchefers par année qui sont stockés dans les usines et constituent de ce fait un volume important de déchets solides pour le Niger. Donc il faut trouver des stratégies pour éliminer ces déchets pour la protection de l'environnement.

a. Propriétés chimiques et minéralogiques

Vinai et al. (Vinai R, et al., 2012) ont montré par des analyses chimiques et minéralogiques (tableau 2) que le mâchefer de la SONICHAR ne contient pas de quantités significatives d'uranium et que la radioactivité enregistrée peut être acceptée. Ils ont aussi fait des essais de lixiviation (tableau 3) qui ont révélé que les quantités des éléments détectés sont inférieures aux exemples proposés dans la littérature et que la concentration des métaux lourds détectés dans la lixiviation est inférieure aux seuils proposés par les normes allemandes. Ils ont aussi montré que 61,3 % du mâchefer est en forme amorphe dû aux températures de combustion. Leurs analyses MEB, DRX montrent que les silices, les aluminiums et les oxydes de fer constituent environ 99% de la masse totale.

Tableau 2: Analyse chimique du mâchefer de charbon (Vinai R, et al., 2012)

	Test séries 1		test séries 2			
Eléments	Wt%	At%	Wt%	At%	Oxydes	Wt%
Mg	1,04	1,23	1,12	1,34	MgO	0,95
Al	27,9	30,01	28,13	30,4	Al_2O_3	27,21
Si	59,49	61,53	56,9	58,94	S_iO_2	62,32
K	5,33	3,97	4,18	3,12	K_2O	2,58
Ti	2,68	1,63	2,52	1,55	T_iO_2	2,15
Fe	3,9	2,05	5,42	2,85	FeO	3,57
Na	n.d.	n.d.	1,02	1,29	CaO	0,5
Ca	n.d.	n.d.	0,7	0,51	Na_2O	0,7
Mn	n.d.	n.d.	0,02	0,01	MnO	0,01

Tableau 3: Eléments chimiques identifiés par lixiviation (Vinai R, et al., 2012)

Paramètres	Unités	Min	Max	Moyenne
PH	-	7,42	7,62	7,52
Température	°C	28,4	28,5	28,43
Conductivité	µs/cm	52,7	108,6	79,87
Fraction Soluble	(%)	6,61	16,39	12,1
Potassium	(mg/kg)	10	24	18
Sodium Na	(mg/kg)	75	155	106,67
Nickel Ni	(mg/kg)	0,03	0,03	0,03
Plomb Pb	(mg/kg)	0,01	0,01	0,01
Chrome Cr	(mg/kg)	0,01	0,01	0,01
Cadmium Cd	(mg/kg)	0,12	0,41	0,22
Cuivre Cu	(mg/kg)	0,03	0,24	0,1

3. LES TRAVAUX ANTERIEURS SUR L'UTILISATION DES MACHEFERS DANS LES MATERIAUX CIMENTAIRES

Plusieurs auteurs ont travaillé sur les propriétés physiques et mécaniques des composites à l'état frais et l'état durci, en utilisant le mâchefer comme substituant partiel ou total des granulats naturels dans le mortier et/ou le béton.

3.1 Quelques travaux sur les propriétés des composites à l'état frais

3.1.1 Les essais d'affaissement

Plusieurs auteurs ont travaillé sur l'effet de l'incorporation de granulats de mâchefer sur les propriétés à l'état frais en s'appuyant essentiellement sur des essais d'affaissement au cône d'Abrams.

Siddique et Sing (Malkit Singh, et al., 2012) révèlent que la demande en eau permettant d'atteindre l'ouvrabilité du béton dépend principalement de la quantité de fine de mâchefer et les propriétés des granulats fins dans le béton. Pour cela, ils ont d'abord fait une comparaison des propriétés physiques du sable et du mâchefer. La comparaison a montré que les particules de sable de rivière sont denses et leur surface devient lisse en raison de l'altération tandis que pour le mâchefer les particules sont angulaires avec une texture rugueuse et sont poreuses. De plus le mâchefer a plus de particules fines (taille inférieure à 75 µm) comparé au sable naturel de rivière.

Ensuite en substituant le sable par le mâchefer, ils ont conclu que les propriétés du mâchefer citées plus haut augmentent ainsi le frottement interne des particules qui, à leur tour, accroissent et entravent ainsi les caractéristiques d'écoulement du béton frais.

Sur ces mêmes travaux Singh et Siddique (Malkit Singh, et al., 2012) ont prouvé que le taux d'absorption du mâchefer était trop élevé par rapport à celui du sable. Conséquence, une partie de l'eau est absorbée en interne par les particules poreuses de mâchefer et la quantité d'eau restante est insuffisante pour assurer la fluidité des matériaux afin d'obtenir l'ouvrabilité du béton souhaitée.

Kim et al (Kim H.K, et al., 2010) ont aussi observé les effets du mâchefer sur les caractéristiques d'écoulement du béton frais. La figure ci-dessous montre que leurs valeurs d'affaissement du béton frais ont chuté de 100 mm lorsqu'ils ont utilisé 100% de mâchefer.

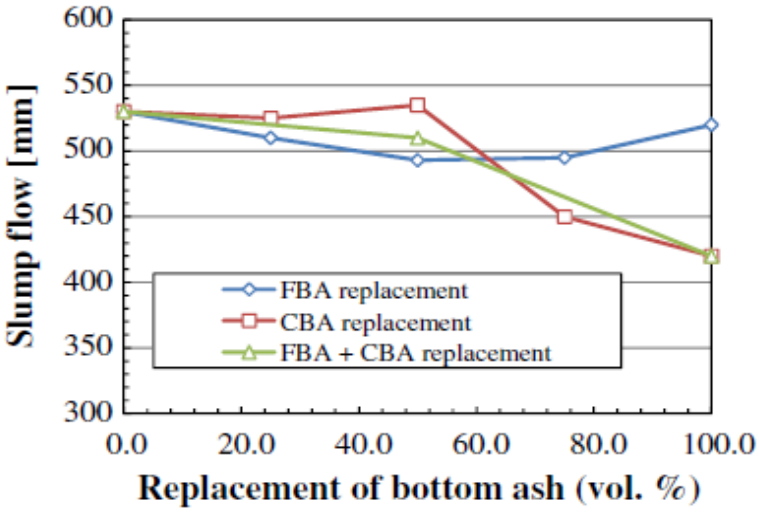


Figure 1: Affaissement en fonction de la teneur en mâchefer dans le béton (Kim H.K, et al., 2010)

Ils sont arrivés à la conclusion que cette chute peut être observée à deux niveaux :

- Premièrement, les particules du mâchefer ont une forme plus compliquée et une surface plus rugueuse que les particules des agrégats normaux.
- Deuxièmement, la quantité d'eau et de ciment pour la lubrification des agrégats a chuté parce qu'une partie de l'eau et de la pâte de ciment ont été absorbée par les particules du mâchefer.

La figure ci-dessous présente les formes de la surface du béton frais avec et sans mâchefer. Des tâches noires sont apparues sur la surface du béton frais de mâchefer à cause de l'absorption de l'eau et de la pâte de ciment par le mâchefer comme présenté à la figure 2.a.

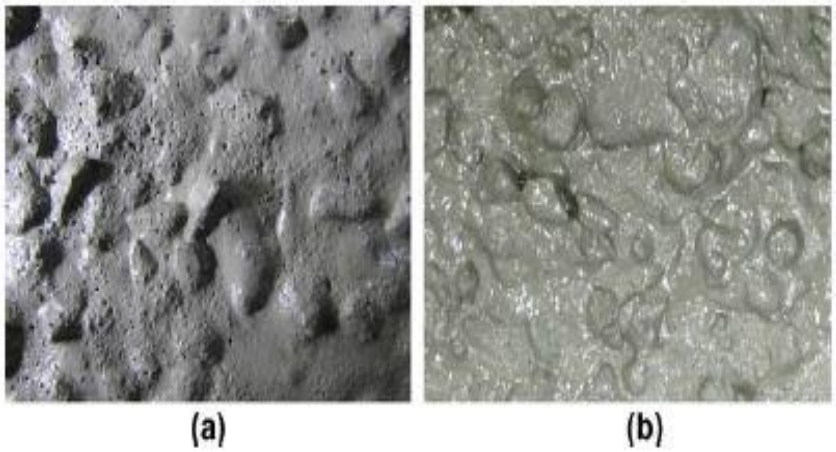


Figure 2: Béton à l'état frais avec (a) et sans (b) granulats de mâchefer (Kim H.K, et al., 2010)

Par contre des auteurs tel que Bai (Bai, 2005) ont observé des résultats inverses quand le sable naturel était substitué par le mâchefer. Comme le montre la figure 3, ils ont observé

qu'en fixant le rapport eau/ciment à 0,45 et 0,52 avec un dosage en ciment de 382 kg /m^3, l'affaissement augmentait avec l'augmentation du mâchefer.

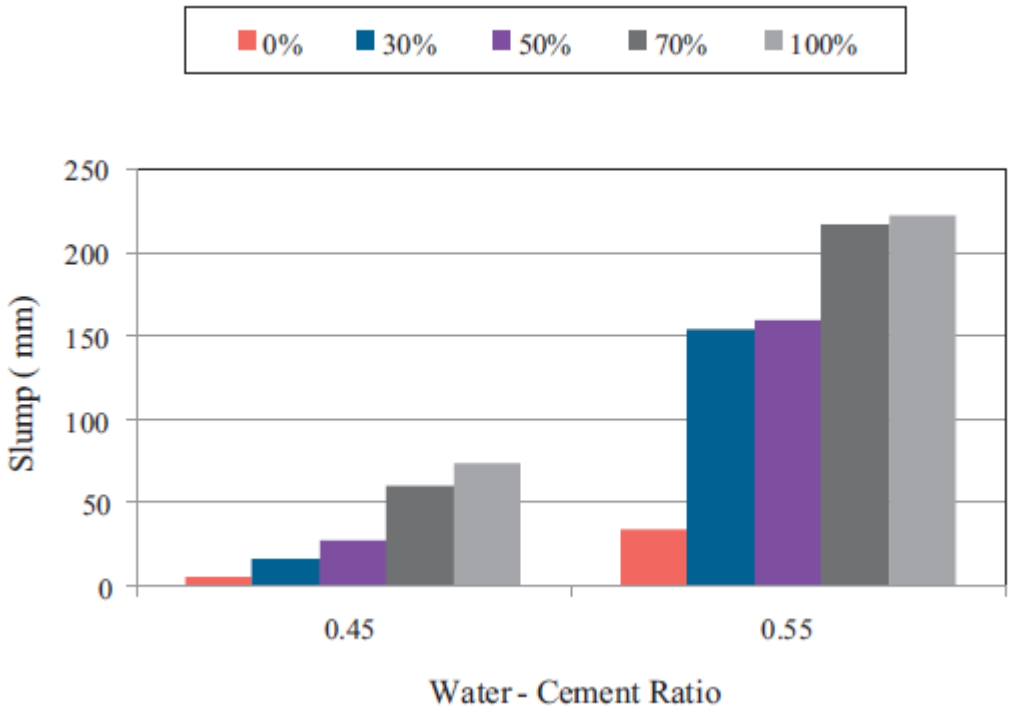


Figure 3: Affaissement du béton en fonction de la teneur en mâchefer et du rapport E/C (Bai, 2005)

3.2 Quelques travaux sur les propriétés des composites à l'état durci

3.2.1 Propriétés physiques

- **Masse volumique**

Naik et al. (Naik, et al., 2001) ont observé que les densités de béton ou du mortier durcis étaient généralement plus élevées que leurs densités respectives à l'état frais. De plus, la masse volumique d'un béton ou d'un mortier est essentiellement liée à la densité des granulats qui le composent. Kim et Lee (Kim H.K, et al., 2011) , dans leurs recherches ont montré que le mortier formulé avec du mâchefer était environ 5 à 15 % plus léger que le mortier formulé avec du sable naturel. Leur résultats indiquent que la densité du mortier de sable est comprise entre 1900 et 2000 kg /m^3. En incorporant le mâchefer, la densité varie de 1650-1800kg /m^3. Singh et Siddique (Malkit Singh, et al., 2012) sont parvenus aux mêmes résultats. Ils conclurent que cette diminution de la masse volumique du béton de mâchefer est due à la faible densité des granulats de mâchefer.

Kim et Lee (Kim H.K, et al., 2010) ont montré que l'incorporation des granulats du mâchefer dans le béton induit une diminution de la masse volumique du béton (figure 4).

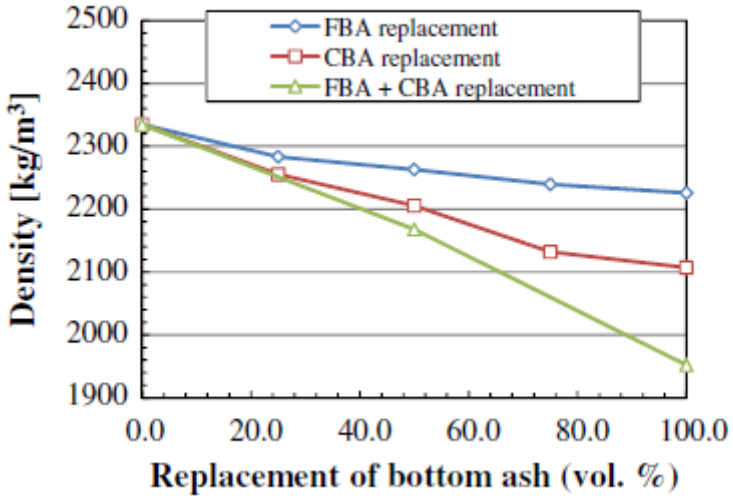


Figure 4 : Masse volumique du béton en fonction de la teneur en mâchefer (Kim H.K, et al., 2010)

- **Porosité et absorption capillaire**

Siddique (Siddique, 2013) a mis en évidence la porosité et l'absorption capillaire du béton de mâchefer. Les bétons de forme cubique à 7 jours d'âge sans fissures visibles ont été utilisés dans cette étude pour la détermination de la porosité et de l'absorption d'eau. Les résultats sont présentés sur les figures 5 et 6 et montrent que la porosité et l'absorption d'eau du béton augmentent avec le taux de substitution du sable par le mâchefer dans le béton. Les résultats ont montré une bonne corrélation entre la porosité et l'absorption d'eau. En ajoutant le mâchefer dans le béton, la connexion entre les capillaires est développée. La porosité et l'absorption d'eau sont passées respectivement de 14.25% à 20.02% et 5.9% à 7.21% pour une substitution de 100% du sable par le mâchefer dans le béton. La porosité du béton à base du mâchefer est réduite avec le temps de séchage.

Pour leur part, Siddique et Singh (Siddique R, et al., 2014) ont montré que la porosité du béton contenant 100% de mâchefer comme agrégats fins est passée de 20.02% à 7 jours à 18.06% à 180 jours de séchage. La réduction de la porosité du béton à base de mâchefer est significative avec l'augmentation du temps de séchage.

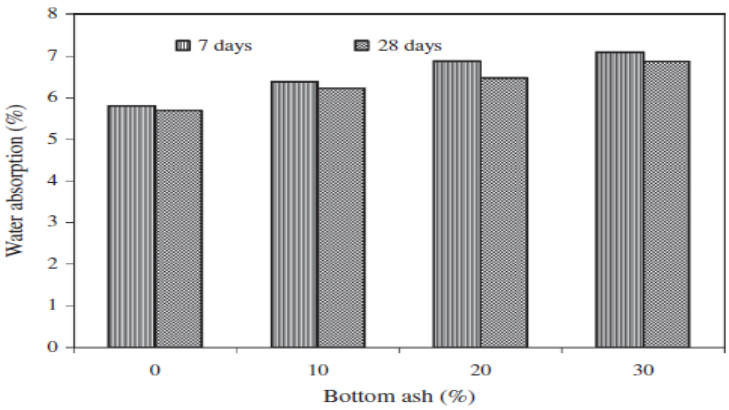


Figure 5 : Absorption d'eau en fonction de la teneur en mâchefer et de l'âge du béton (Siddique, 2013)

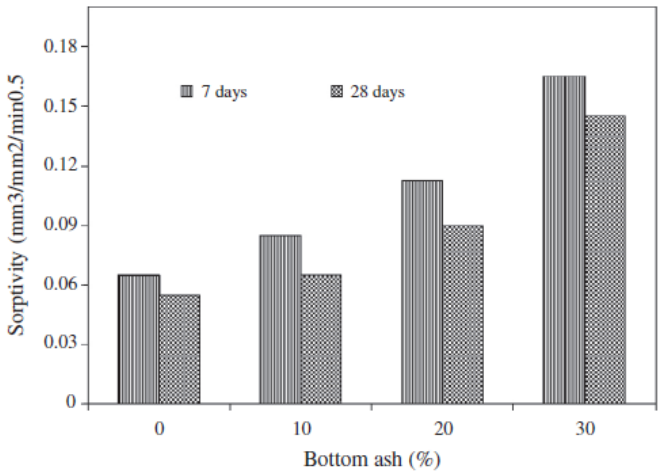


Figure 6 : Porosité en fonction de la teneur en mâchefer et de l'âge du béton (Siddique, 2013)

3.2.2 Propriétés Mécaniques

- **Résistance en compression**

La résistance à la compression du béton ou du mortier est vue comme l'une des propriétés mécaniques les plus caractéristiques car elle donne une idée globale sur la qualité du béton et dépend essentiellement de plusieurs facteurs tels que la nature du ciment, le rapport eau/ciment, la porosité, la nature des granulats…Plusieurs auteurs ayant travaillé sur le mâchefer comme substituts du sable ont tous observé une diminution de la résistance lorsque le sable naturel était remplacé par le mâchefer.

Ghafoori et Bucholc (Ghafoori, et al., 1997) ont constaté dans leurs travaux que la résistance à la compression des mâchefers combinés et mélangés avec le sable était plus faible que celle du béton témoin. Les différentes moyennes de résistance à la compression à l'âge de 3 et 7 jours étaient de 12 % et 14,5 % respectivement. Siddique (Siddique, 2013) a montré que la résistance en compression du béton diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation du mâchefer. A travers leurs différents travaux où le sable naturel était

substitué par le mâchefer à des proportions variant de 0 à 30% Il a constaté que pour chaque proportion de mâchefer, la résistance augmentait avec l'âge de la cure du béton. Par exemple pour un béton à 20% d'incorporation, les résistances du béton étaient de 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 100% sable au même âge étaient respectivement de 29,6 MPa ; 35,2 MPa ; 59 MPa et 61,2 MPa. On constate que de 7 jours à 90 jours le béton de sable croit de 99% alors que le béton mâchefer croit de 74%. A long terme c'est-à-dire 365 jours nous constatons que le béton de sable et de mâchefer augmentent respectivement de 107% et 100%. Soit une progression quasi similaire à 365 jours.

Une étude menée par Targan et al. (Targan S, et al., 2003) a montré qu'à deux (2) jours de cure de béton 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 14ème jour de cure (Siddique R, 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/m^3. Les résultats des essais mécaniques indiquent que, pour les deux valeurs du rapport E/C, la plupart des éprouvettes confectionnées présentent 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.

- **Résistance en traction**

La résistance en traction est aussi une propriété mécanique du béton.

Les auteurs tels que 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 ont observé une diminution considérable lorsque le taux de substitution de mâchefer augmentait. A 50% de substitution, la résistance en traction a diminué de 58%.

Ghafoori et Cai (Cai, et al., 1998) quant à eux 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 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.

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

Tous ces résultats disponibles dans la littérature montrent que la taille, la proportion et la texture de la surface des granulats de mâchefer ont des effets importants sur la résistance des bétons.

Pour l'ensemble des auteurs, il est clair que l'augmentation du taux d'incorporation de granulats en mâchefer dans le béton entraine une perte des résistances mécaniques aussi bien en traction qu'en compression.

3.3 Travaux sur la Durabilité du Béton et du Mortier

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant etc. tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service. La notion de durabilité d'un ouvrage se traduit donc par un ensemble de spécifications techniques basées sur des méthodes d'essais directes ou indirectes, sur l'expérience et sur des préconisations de mise en œuvre, de fabrication et d'entretien. Aujourd'hui, la durabilité est appréhendée en considérant un ensemble de propriétés dont, bien sûr, la résistance mécanique à 28 jours. Les autres caractéristiques prises en compte visent à assurer

l'adéquation entre les propriétés physico-chimiques du béton et les contraintes qui s'appliquent à l'ouvrage.

Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée de service souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la durabilité notamment les propriétés de durabilité du béton de mâchefer dont nous allons énumérer quelques-unes.

3.3.1 Perméabilité

La perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise l'aptitude d'un matériau poreux à se laisser traverser par un fluide.

Singh et Siddique (Malkit Singh, et al., 2012) révèlent que la perméabilité du béton dépend de la taille, de la distribution, de la continuité des pores présents dans la pâte de ciment et de la perméabilité des agrégats. Les rapports publiés par divers chercheurs indiquent que le béton de mâchefer a une perméabilité élevée par rapport à un béton de sable naturel. De plus l'augmentation de la teneur en mâchefer dans le béton entraine l'augmentation de sa perméabilité. L'augmentation de la perméabilité du béton de mâchefer est due à sa microstructure poreuse entrainant ainsi une demande accrue d'eau de gâchage. A l'état durci et plus l'âge du béton de mâchefer augmente la perméabilité diminue.

Pour vérifier la durabilité du béton de mâchefer les auteurs tels que Ghafoori et Bucholc (Bucholc, et al., 1996), Aramraks (Aramraks, 2006), Shii-Cong et Chi-Shun (Shii-Cong, et al., 2009) ont travaillé avec le chlorure de sodium (Nacl) et ont tous conclu que le béton de mâchefer est perméable en présence des ions chlorures.

Aramraks (Aramraks, 2006) a conclu que la perméabilité au chlorure du béton de mâchefer était supérieure à celle du béton normal.

Shii-Cong et Chi-Shun (Shii-Cong, et al., 2009) quant à eux tirent leur conclusion en ce sens que pour un même rapport E/C, la résistance à la pénétration des ions chlorure des bétons diminuait avec l'augmentation du pourcentage de mâchefer dans le béton.

3.3.2 Résistance au gel- dégel

Singh et Siddique (Malkit Singh, et al., 2012) ont fait des recherches sur le gel-dégel mais leur données de recherches sont limitées et ne permettent pas de donner des conclusions suffisantes. Néanmoins leurs recherches permettent de conclure que le béton de mâchefer présente une bonne résistance à la congélation et à la décongélation similaire à celle du béton normal. Ils concluent aussi que les adjuvants réducteurs d'eau ont un effet négligeable sur la résistance de congélation et la décongélation du béton de mâchefer.

Ghafoori et Bucholc (Bucholc, et al., 1996) ont observé également que malgré un meilleur rapport E /C, le béton de mâchefer contenant une teneur en ciment de 356 kg /m^3 a plus affiché une performance remarquable lorsqu'il est exposé à un environnement avec des cycles répétés de gel et de dégel. L'addition du superplastifiant avait un effet minimal sur la résistance de gel et de dégel du béton de mâchefer.

3.3.3 Résistance à l'attaque sulfate

Ghafoori et Cai (Ghafoori, et al., 1998) ont étudié l'effet de l'incorporation des mâchefers dans le béton sur sa durabilité à long terme. Les résultats des études ont conclu que le rouleau de béton compacté contenant des mâchefers présente une excellente résistance aux attaques de sulfate externes. Au cours des 28 premiers jours de cure dans une solution de sulfate de sodium, les éprouvettes de mâchefers ont affichés une valeur moyenne de l'expansion de 0,0017. Aucune perte de masse n'a été détectée au cours de cette période.

A 180 jours, la résistance en compression des échantillons durcis dans eau était identique à celle des échantillons équivalents durcis dans une solution de sulfate de sodium à 5%.

Ghafoori et Bucholc (Bucholc, et al., 1996) ont observé que le béton de mâchefer et le béton de sable naturel présentaient des caractéristiques de dilatation similaires sous attaque de sulfate externe. Ils ont constaté qu'après six mois d'exposition, la plus grande expansion du béton dosé à 272,16 kg/m^3 contenant du mâchefer était de 0,035%. Cependant l'expansion du béton de mâchefer contenant 362,88 kg /m^3 de ciment était similaire à celle du béton de contrôle. Ils conclurent que cela peut être dû à l'amélioration de la qualité de la matrice.

3.3.4 Comportement du béton de mâchefer sous haute température

Les principaux facteurs qui peuvent influencer la résistance au feu d'un béton sont : le type de granulats, le ciment utilisé dans sa composition, la température, la durée du feu, la taille de l'élément structurel et l'humidité du béton.

Singh et Siddique (Malkit Singh, et al., 2012) ont constaté qu'à une température d'environ 500 °C, le silicate de calcium hydraté dans la pâte de ciment durci commence à se

déshydrater et à environ 900 °C le silicate de calcium hydraté se décompose complètement. Aussi lorsque la température dépasse 100 °C, l'eau présente dans le béton commence à se vaporiser et à accumuler ainsi de la pression dans le béton. Dans leur recherche ils sont arrivés à la conclusion suivante: le mâchefer est un matériau poreux, cette porosité élevée de béton peut être considérée comme bénéfique lorsque le béton est soumis à une température élevée.

Yuksel et al. (Yuksel, et al., 2011) ont étudié l'influence de la haute température sur les propriétés des bétons de mâchefer. Dans leur travail de recherche des échantillons de béton ont été soumis à 800 °C à l'âge de 90 jours. Ils ont observé une perte de poids croissante avec l'augmentation du taux de mâchefer. A 50%, la perte de poids était de 6% alors qu'elle est de 4,5% pour le béton de référence. De plus la résistance résiduelle diminue avec l'augmentation du taux de substitution. Pour les échantillons contenant 50% de mâchefer, la résistance résiduelle a diminué de 74% contre 63% pour le béton de référence. Ils ont également observé que le module dynamique d'élasticité résiduel a diminué d'environ 10 fois par rapport au module initial d'élasticité dynamique. Ils ont tiré la conclusion en ce sens que lorsque le béton a été soumis à une température élevée, la diminution de module d'élasticité dynamique était due à la détérioration de la matrice du béton et non en raison de l'inclusion des mâchefers.

4. CONCLUSION PARTIELLE

La synthèse bibliographique a permis de comprendre que le ciment est le principal constituant qui définit les matériaux cimentaire. La structure de la pâte cimentaire a montré que les matériaux cimentaires sont poreux.

Cette synthèse bibliographique a permis de faire le point sur l'influence des mâchefers sur les propriétés physico-mécaniques des matériaux cimentaires. Il en découle que les mâchefers modifient de façon significative leurs propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. A l'état frais, on peut conclure que l'ouvrabilité dépend du type et de la forme de mâchefers. A l'état durci, toutes les études convergent pour conclure que la densité des composites, confère au composite cimentaire une faible résistance en compression et en traction. Le point sur la durabilité a aussi permis de comprendre le comportement des mâchefers. En effet, l'ensemble des résultats permet de comprendre que l'inclusion des granulats de mâchefer induit une augmentation de la perméabilité des composites. Cependant, on note une amélioration de la résistance à l'attaque sulfate, à la congélation et

la décongélation. L'augmentation de la porosité des composites due à l'inclusion des granulats de mâchefer pourrait être bénéfique dans des conditions de haute température.

La synthèse bibliographique a montré que la plupart des recherches portant sur ce sujet ont été réalisées plus sur du béton que sur du mortier. Très peu d'auteurs ont abordé le mortier; ce qui vient en appui à l'intérêt de notre étude.

L'objectif de ce travail est d'étudier, l'effet du séchage, le cycle thermique, et le vieillissement accéléré des mortiers formulés à base de sable de mâchefer. Pour cela, les composites élaborés ont été caractérisés par des essais physiques et mécaniques. Les propriétés déterminées sont la porosité, l'absorption capillaire, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores et la résistance en compression, traction, les résistances résiduelles. Une étude de durabilité a été effectuée sur les composites élaborés. Le chapitre qui suit décrit les différents matériaux utilisés et la procédure expérimentale mise au point pour atteindre les objectifs de notre étude.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents matériaux utilisés en les caractérisant. Il détaille la formulation et la caractérisation physico-mécanique des mortiers incorporant le mâchefer. Il décrit également les protocoles des différentes études de durabilité auxquelles ont été soumis les composites.

Le choix de mener cette étude sur les mortiers est uniquement un choix pratique car l'étude sur les mortiers constitue une première approche pour le passage au béton.

Nous avons procédé à quelques essais de caractérisation physiques des matériaux utilisés tout au long de ce travail. Cela va permettre de mieux maitriser les propriétés des matériaux, notamment le ciment, le sable, le mâchefer. Cette caractérisation a consisté en la détermination des paramètres caractéristiques essentiels, il s'agit de l'analyse granulométrique, la masse volumique spécifique, la masse volumique apparente et l'équivalent de sable.

1. LES PROTOCOLES D'ESSAIS DE CARACTERISATION PHYSIQUE DES MATERIAUX

a. L'analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituants l'échantillon.

L'essai suit la norme NFP 18-560 et consiste à classer les différents grains constituants l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboités les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas (figure 7).

Figure 7 : Série de tamis emboîtés

L'opération se fait par tamisage après avoir éliminé à l'eau les fillers (< 80 mm). Les pourcentages ainsi obtenus sont exprimés sous forme d'un graphique appelé courbe granulométrique. A partir de cette courbe, un certain nombre d'indicateurs permettent de caractériser la distribution granulométrie du matériau tels que :

- Coefficient d'uniformité ou de Hazen :

$$Cu = D60/D10 \qquad \text{Eq.1}$$

- Coefficient de Courbure :

$$Cc = D30^2/(D10*D60) \qquad \text{Eq.2}$$

D10, D30, D60 représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 10%, 30%, 60% de tamisât cumulé.

D'après Caquot et Kérisel :

- Pour Cu < 2 la granulométrie est dite uniforme.
- Pour Cu > 2 la granulométrie est dite étalée.

Par ailleurs, un sable est bien gradué si *Cc* est compris entre 1 et 3.

- Module de finesse :

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 -1,25 - 2,5 - 5 mm

Cet essai est effectué sur le sable et le mâchefer.

b. La masse volumique spécifique

La masse volumique spécifique est déterminée à l'aide du pycnomètre à air. Le Pycnomètre à air peut être considéré schématiquement comme 2 enceintes volumiques communiquant entre elles par une soupape (figure 8).

Figure 8 : Pycnomètre à air

L'essai est effectué conformément à la norme EN 1097-7 et consiste à déterminer la masse volumique des grains solides de l'échantillon. Pour cela, une masse connue Ws de l'échantillon est introduite dans la cuve du pycnomètre auquel on ajoute une masse connue d'eau assez importante pour submerger l'échantillon. Une pression d'environ 23,5 mWs est appliquée dans la chambre à air qui est ensuite répartie dans les deux enceintes de façon égale et cette pression égalisée est lue et avec la formule suivante on détermine la masse volumique spécifique.

$$\mathbf{V_{lu}} = \frac{\mathbf{P' - 4{,}4174}}{\mathbf{P' - 1}} * \mathbf{1214{,}7465} \qquad \textbf{Eq.3}$$

Avec :

P': pression moyenne lue (mWs);

1214,7465: volume total des 2 cuves (cm3);

4,4174: pression obtenue en partant de 23 mWs quand la cuve est vide (mWs);

1: pression atmosphérique (mWs).

Le poids spécifique est calculé grâce à l'équation:

$$\boldsymbol{\gamma_s} = \frac{\mathbf{M_S}}{\mathbf{V_{lu} - V_e}} \qquad \textbf{Eq.4}$$

Ms : masse de l'échantillon de terre sèche ;

Ve : volume d'eau ajoutée.

Cet essai a été effectué sur le sable, le ciment, le mâchefer.

c. La masse volumique apparente

L'essai est fait sur la base des Normes NFP 8-554-1 et NFP 18-555 et a pour but de déterminer la masse volumique apparente sèche (γd). La densité apparente varie avec le degré de tassement de l'échantillon, ce qui nous amène a utilisé un cône normalisé permettant d'avoir un tassement identique lors de tous les essais. Il s'agit d'un entonnoir muni d'une passoire qui limite la hauteur de chute de l'échantillon dans un litre taré. La masse volumique apparente est donc obtenue en faisant le rapport de la masse par le volume. L'essai est répété trois fois et on obtient alors une valeur moyenne (figure 9).

Figure 9 : Cône normalisé

d. L'équivalent de sable

Basé sur la Norme NF 18-598 l'essai d'équivalent de sable permet de mesurer la propreté d'un sable. Il rend compte globalement de la quantité des éléments fins contenus dans ce sable.

L'équivalent de sable (ES) est le rapport multiplié par 100 de la hauteur de la partie sableuse sédimentée à la hauteur totale du floculat. L'essai consiste à faire floculer les éléments fins d'un sable mis en suspension dans de l'eau distillée puis, après un temps de mise au repos, à mesurer la hauteur des éléments sédimentés. Il est effectué sur la fraction du sable passant au tamis à maille carrées de 5mm (figure 10).

Figure 10 : Matériels pour l'essai d'équivalent de sable

On détermine l'équivalent de sable à vue (ESv) et l'équivalent de sable à piston (ESP).

$$\mathbf{ES_V = \frac{H'2}{H1} * 100} \qquad \textbf{Eq.5}$$

$$\mathbf{ES_p = \frac{H2}{H1} * 100} \qquad \textbf{Eq.6}$$

Avec

H1= hauteur du floculant (cm)

H'2= hauteur à vue du sédiment

H2= hauteur au piston du sédiment

Tableau 4 : Classement et qualité de sable (Norme NF 18-598)

ES à vue	ES à piston	classement et qualité du sable
ES<65	ES<60	sable argileux: risque de retrait ou gonflement pas bon pour le béton de qualité
65≤ES≤75	60≤ES≤70	sable légèrement argileux: propreté admissible pour béton de qualité courante (retrait possible) de retrait ou gonflement pas bon pour le béton de qualité
75≤ES≤85	70≤ES≤80	Sable propre à faible% de fines argileuses, bon pour béton de haute qualité
ES≥85	ES≥80	Sable très propre: pas de fines argileuses, ce qui risque en fait d'amener un défaut de plasticité du béton→ augmenter le dosage d'eau donne des bétons exceptionnels de très haute résistance

Tableau 5 : récapitulatif des résultats obtenus après essais

Matériaux	Caractéristiques physiques							
	Mdf	Ab (%)	Cu	Cc	ρ (t/m3)	ρs (t/m3)	ES	
							ESv	ESp
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	-	-
Ciment	-	-	-	-	1,08	3,15	-	-

Suivant le tableau 5, on constate que selon les valeurs des coefficients de courbure et d'uniformité, les matériaux étudiés sont bien gradués avec des granulométries étalées. Les valeurs des modules de finesse sont comprises entre 2,2 et 2,8 ; donc ces matériaux sont classés bons pour des bétons à haute résistance. Les masses volumiques indiquent que le sable est plus dense que le mâchefer, ceci justifie le choix d'une substitution volumique. L'équivalent de sable montre que ce sable est très propre. L'absorption d'eau de mâchefer est de 19 % de la masse de mâchefer. Ce coefficient est assez élevé et conforme aux résultats de la littérature. Il pourra avoir une conséquence sur les propriétés du mortier frais.

2. LES CONSTITUANTS

Les principaux constituants utilisés sont : le ciment qui est un liant hydraulique, le sable, le mâchefer, le super plastifiant et l'eau.

2.1 Le ciment

Dans cette étude le liant hydraulique utilisé est un ciment portland **(CEM I-CPA 45)** de la société **CIMTOGO** qui contient au moins 95% de clinker et au plus 5% de constituants secondaires.

2.2 Le sable

Le sable utilisé est lavé et l'essai de l'équivalent de sable montre que c'est un sable très propre car on a obtenu un équivalent de sable à vue (ESv) de 99 et un équivalent de sable au piston (Esp) de 98. Une analyse granulométrique faite sur le sable (figure 11) a permis de déterminer un module de finesse de 2,4. En effet un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8.Ce qui respecte la norme et permet d'obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

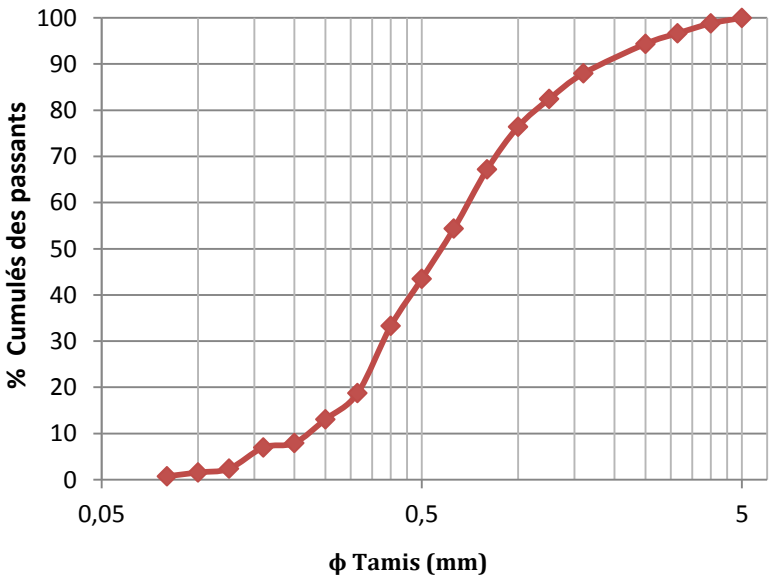


Figure 11 : Courbe d'analyse granulométrique du sable

2.3 Le mâchefer

Le mâchefer de charbon est broyé à partir d'un appareil appelé Los Angeles (figure 12) et le module de finesse obtenu est de 2,8. Son coefficient d'absorption d'eau obtenu en laboratoire est de 19%. Cette valeur est conforme à celles rencontrées dans la littérature (Gupta Sakshi, 2013).

Le résultat de l'analyse granulométrique par voie sèche du mâchefer est présenté sur la figure 13. La masse volumique spécifique =**2,28 t/m^3** et la masse volumique apparente = **0,98t/m^3** Conformes aux résultats trouvés dans la littérature (Gupta Sakshi, 2013).

Figure 12 : Granulats de mâchefer broyés à l'appareil Los Angeles

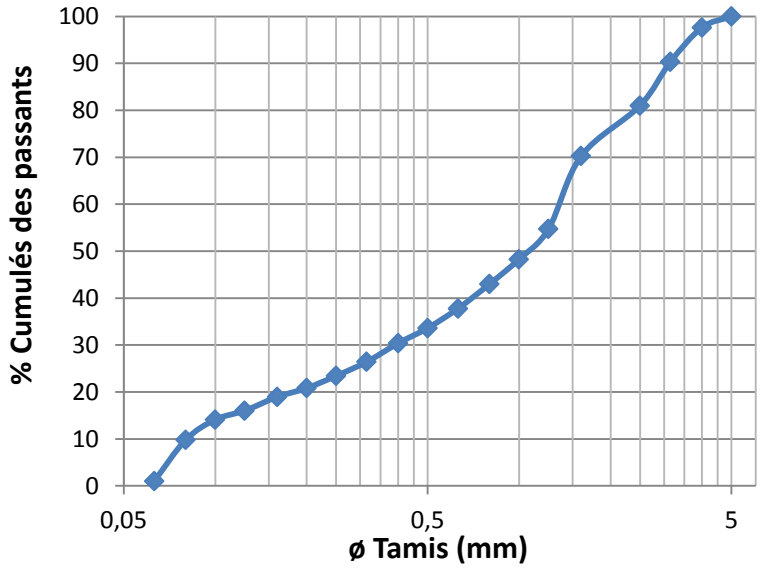


Figure 13 : Courbe d'analyse granulométrique du mâchefer

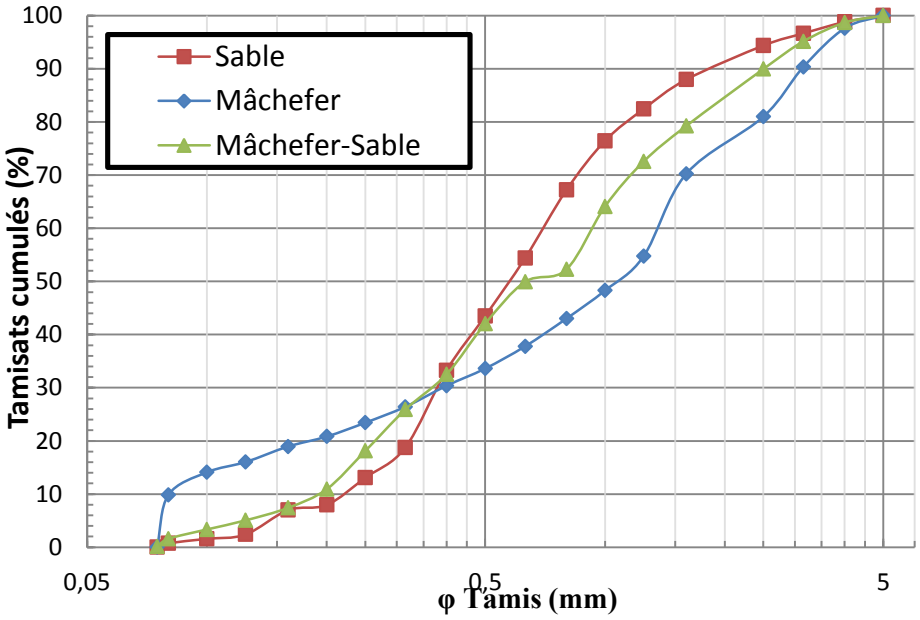


Figure 14 : Courbes d'analyses granulométriques du sable et du mâchefer

La figure 14 nous montre que les allures tendent à se rapprocher. De plus le sable et le mâchefer ont un module de finesse très proche. Ce qui permet de remplacer plus facilement le sable par le mâchefer par des proportions volumiques. Le mâchefer contient un peu plus d'éléments fins donc le mortier de mâchefer aura une demande en eau plus élevée.

2.4 Le superplastifiant

SIKA®VISCOCRETE®KRONO 951 est un superplastifiant haut réducteur d'eau à base de copolymère acrylique qui se présente sous la forme d'un liquide prêt à l'emploi. Il est spécialement conçu pour assurer à la fois une puissante défloculation et une robustesse d'usage. La plage d'utilisation recommandée est entre 0,2 à 3% du poids du ciment ou du liant. L'utilisation du super plastifiant permet d'obtenir une même ouvrabilité des composites pour tous les rapports E/C. En effet, son dosage est proportionnel à la masse du ciment, et est égale à 0.25% et 0.75% respectivement pour le rapport E/C=0.5 et 0.4.

3. FORMULATION DES COMPOSITES

Les matériaux élaborés dans ce travail sont des composites cimentaires. Le procédé consiste à préparer des mortiers avec sable /ciment = 3 fixe et le rapport eau /ciment = 0,5 et 0,4. La substitution du sable par le mâchefer est faite à des proportions volumiques bien définies : 0%, 50%, et 100% correspondant respectivement aux notations M0, M50 et M100. Chaque mélange obtenu est coulé dans différents types de moules adaptés à la nature des essais auxquels les éprouvettes sont destinées. Pour le cas du mâchefer le mélange a été fait en tenant compte de l'eau d'absorption du mâchefer. Cette eau est de 19% de la masse de celui-ci car le mâchefer est un matériau très poreux.

Au total deux types d'éprouvettes cylindriques de dimensions ϕ40x60mm et ϕ50x100mm ont été utilisés. Pour chaque rapport E /C nous avons confectionné au total quarante-huit éprouvettes de ϕ40x60mm et trente-six éprouvettes ϕ50x100mm. Les mortiers ont été malaxés suivant les modalités de malaxage données par la Norme EN 196-1. Toutes nos éprouvettes sont mises à l'eau pendant 28 jours après démoulage.

Les gâchées ont été préparées en deux phases. Pour la première phase, nous avons confectionné des éprouvettes témoins. L'objectif était d'étudier quelques propriétés physiques (la vitesse ultrason longitudinale, la porosité accessible à l'eau, l'absorption capillaire) et mécaniques (compression et la traction par fendage) des composites. La deuxième phase a pour objectif d'étudier les aspects relatifs à la durabilité des matériaux élaborés. Pour cela, nous avons fait des études de durabilité sur les éprouvettes. Il s'agit de faire des études du cycle mouillage séchage, études des effets du cycle thermique et les études de l'endommagement hydrique. Nous avons évalué les propriétés physiques pour chaque étude de durabilité mais aussi les propriétés mécaniques pour déterminer les résistances résiduelles.

Le tableau 6 présente les compositions des différentes gâchées. La différence du superplastifiant pour le rapport E/C=0.5 et 0.4 s'explique par le fait que la diminution de l'eau de E/C=0.4 est compensé par l'augmentation du dosage en superplastifiant.

Tableau 6 : Composition des différents mélanges

Eau/Ciment	Composite	Eau (Kg/m^3)	Ciment (Kg/m^3)	Sable (Kg/m^3)	Mâchefer (Kg/m^3)	Superplastifiant (Kg/m^3)
0,5	M0	296,87	593,74	1781,23	0,00	1,48
	M50	296,87	593,74	890,61	731,10	1,48
	M100	296,87	593,74	0,00	1462,20	1,48
0,4	M0	237,50	593,74	1781,22	0,00	4,45
	M50	237,50	593,74	890,61	731,10	4,45
	M100	237,50	593,74	0,00	1462,20	4,45

4. DISPOSITIF ET ESSAIS DE CARACTERISATION PHYSIQUE

4.1 Mesures de vitesse de propagation des ondes ultrasonores

Les méthodes ultrasonores sont très utilisées dans la caractérisation et le contrôle non destructif des matériaux.

L'essai de caractérisation consiste à mesurer le temps t que mettent des ultrasons à se propager dans l'éprouvette à l'aide d'un contrôleur de vitesse de pulsation d'ultrason (figure 15). Cette propagation des ondes ultrasonores est sensible à l'assemblage minéralogique et est affectée par les formes, la distribution, l'orientation cristallographique préférentielle des composants.

Figure 15 : Appareil de mesure du temps des ultrasons

De la valeur obtenue par mesure nous déterminons à l'aide de l'équation 7 la vitesse ultrason. Ainsi donc les méthodes ultrasonores présentent de nombreux avantages : facilité de mise en œuvre, bonne adaptation aux orientations naturelles de la plupart des défauts et

possibilité de traverser de fortes épaisseurs, etc. mais aussi quelques exigences telles que la nécessite de coupler le transducteur à l'éprouvette, la grande sensibilité de la propagation des ultrasons aux degrés d'hétérogénéité ou d'anisotropie du matériau ou des paramètres variables liés aux conditions de mesure telles que la température, le taux d'humidité, l'état de contrainte du matériau, la taille et l'orientation des défauts tels que les pores et les fissures, et la présence ou l'absence de fluides interstitiels. En fonction du matériau que nous aurons à utiliser, l'onde change de vitesse et la propagation des ondes est perturbée par les discontinuités. Quand les matériaux présentent des fissurations et changements assez élevés et grandissants, la propagation des ondes est perturbée, la vitesse diminue tandis que l'atténuation de l'onde ultrasonore augmente.

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{t}} \qquad \textbf{Eq.7}$$

Où :

L= longueur de propagation en mm

t = le temps de propagation en m /s

V = vitesse de l'onde en Km/s

4.2 Mesure de l'absorption capillaire

Quand un matériau poreux est mis en contact avec un liquide mouillant comme l'eau, celui-ci pénètre dans le matériau sans l'application d'une pression extérieure. Ce phénomène d'imbibition par capillarité est directement lié à la taille du matériau et forme des pores, ainsi que la connectivité du milieu poreux du matériau. Pour chaque type d'éprouvettes, des échantillons préalablement séchés sont mis en contact avec de l'eau à 20°C à leur base. La masse des échantillons est mesurée à intervalles de temps croissants. L'essai consiste à immerger les éprouvettes dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 5 mm Le récipient doit être muni d'un couvercle évitant l'évaporation de l'eau et permettant la respiration de la face supérieure de l'éprouvette. A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées puis replacées dans le récipient. Les échéances sont les suivantes : 0.25h, 1h, 2h, 4h, 8h, 24h.

Figure 16 : Dispositif d'essai d'absorption capillaire

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par la relation suivante

$$\mathbf{Ca(kg/m^2)} = \frac{\mathbf{M_X - M_0}}{\mathbf{A}} \qquad \textbf{Eq.8}$$

Ou

Mx : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (Kg)

M_0 : masse initiale de l'éprouvette (Kg)

A : section de l'éprouvette (m2)

4.3 Mesure de porosité communicante

La porosité se définit par le rapport entre le volume des vides et le volume total de matériau.

Pour notre étude, nous avons déterminé la porosité communicante accessible à l'eau selon la norme ISO 5017. Les éprouvettes sont placées dans une enceinte à une température de 20°C et mises à saturation sous vide pendant 24h. On fait une pesée hydrostatique notée Meau qui est la masse en grammes pesée sous l'eau. Puis une pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau Mair. On fait enfin un séchage à une température de 105°C jusqu'à masse constante (C'est-à-dire deux pesées espacées de 24h ne s'écartant pas plus de 0.05% doivent être considérées comme la perte de masse sèche) puis une dernière pesée dans l'air de l'éprouvette sèche Msec.

On calcule de la porosité accessible à l'eau par l'équation 9 :

$$\mathbf{Peau}(\%) = \frac{\mathbf{M_{air} - M_{sec}}}{\mathbf{M_{air} - M_{eau}}} * \mathbf{100} \qquad \textbf{Eq.9}$$

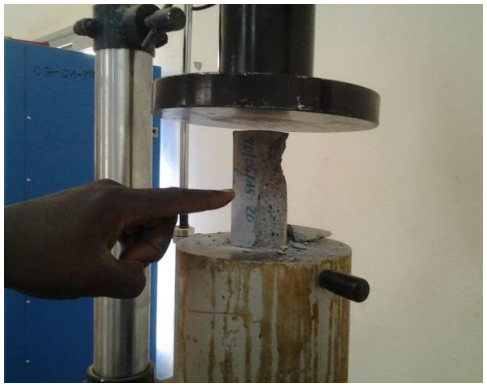
5. DISPOSITIF ET ESSAIS DE CARACTERISATION MECANIQUE

Pour la caractérisation mécanique des mortiers élaborés, nous avons réalisé d'une part des mesures de résistance en compression sur des éprouvettes cylindriques (50x100 mm) pour les témoins et les résistances résiduelles pour les études. D'autre part, des mesures de résistance en traction sur des éprouvettes cylindriques (ϕ40x60mm) également pour les témoins et également les résistances résiduelles pour les études.

5.1 Essai de compression

Pour la mesure de la résistance à la compression, la sollicitation mécanique appliquée est la compression uniaxiale. Nous avons confectionné nos éprouvettes à l'aide des moules cylindriques de diamètre 5cm et de hauteur 10cm. Puis nous les avons conservées dans une pièce à 20° C et 100% d'humidité relative, elles sont ensuite démoulées au bout de 24h puis conservées dans l'eau. On fait sortir de l'eau à 24h avant le jour de l'essai prévu à 28 jours pour les témoins. Pour les différentes études, l'essai est réalisé à la fin de chaque étude. La machine utilisée est une presse hydraulique multi-essais contrôlée par ordinateur et la vitesse de déplacement est fixée à 0,250mm /mn. Les valeurs de la résistance en compression en MPa sont directement lues sur l'ordinateur.

(a)



(b)

Figure 17 : Presse hydraulique contrôlée par ordinateur (a) et dispositif de compression (b)

5.2 Essai de traction par fendage (essai brésilien)

Le test de traction directe est difficile à réaliser sur des matériaux fragiles, pour cela 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. L'essai consiste à appliquer sur l'éprouvette un effort de compression le long de deux génératrices opposées (figure 17). 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.

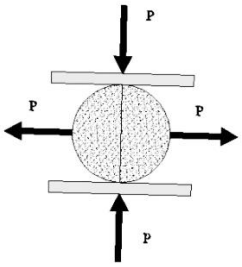


Figure 18 : Schéma du dispositif de traction

La même procédure a été appliquée pour la confection de nos éprouvettes mais dans ce cas nous avons utilisé des éprouvettes cylindriques de hauteur 4cm et de diamètre 6cm. L'application de l'essai se fait en plaçant l'éprouvette entre les deux plateaux de la presse (figure 18), la vitesse de chargement est maintenue constante et égale 0,250 mm/mn.

Figure 19 : Dispositif de traction

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 comme l'indique la figure 19.

Figure 20 : Eprouvettes soumises à la traction par fendage

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 10 :

$$\mathbf{R_t = \frac{2P}{\pi dh}} \qquad \textbf{Eq.10}$$

R_t en MPa ; P en N; d et h en mm

6. ETUDES DE LA DURABILITE

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la durabilité comme nous l'avons souligné dans le chapitre 1. Ils ont abordé des thèmes tels que le gel- dégel, la perméabilité, l'effet de sulfate, les hautes températures sur le béton de mâchefers. Cette partie du présent travail aborde la durabilité des mortiers de mâchefers. Il s'agira de faire des études sur le vieillissement accéléré des mortiers de mâchefers à travers des cycles de mouillage séchage, des études sur le cycle thermique et enfin des études d'endommagement hydrique. A la fin de chaque étude et pour chaque rapport E/C, il sera question de procéder aux essais de caractérisation physico-mécanique afin d'évaluer les comportements des composites. Dans nos recherches bibliographiques, il en ressort que peu d'auteurs ont abordé les études que nous présentons dans ce travail. Ce qui vient appuyer l'intérêt de ce travail.

6.1 Etude du vieillissement accéléré

Pour réaliser cette étude, il faut procéder par le cycle de mouillage séchage des éprouvettes à 28 jours d'âge. L'essai fait l'objet de la norme ASTM D 559-57 et comprend essentiellement douze cycles de vieillissement accéléré. Il se définit ainsi comme une suite alternative d'une période de mouillage à 20°C pendant 5heures et une période de séchage à 71 °C pendant 42 heures. Ce type de cyclage a pour but de simuler expérimentalement le vieillissement des mortiers de mâchefers par les simples conditions naturelles (action de la pluie, du vent, du soleil, …) sans source de pollution extérieure.

Pour chaque éprouvette, nous avons mesuré d'une part sur les éprouvettes cylindriques de dimensions ϕ50x100 mm la perte de masse, la vitesse ultrason pendant chaque cycle et à la fin du douzième cycle. D'autre part les éprouvettes cylindriques de dimensions ϕ40x60mm ont elles aussi été soumises au cycle de mouillage séchage et à la fin du douzième cycle nous avons fait des essais d'absorption capillaire, de porosité. Pour terminer nous avons fait les essais de résistances résiduelles sur les éprouvettes à la fin de l'étude.

6.2 Etudes des effets de cycle thermique

Il nous a paru intéressant d'évaluer l'impact des températures supérieures à la moyenne ambiante sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers. En effet, on conçoit aisément que les variations de température peuvent générer au sein de la matrice cimentaire, des contraintes importantes susceptibles de conduire à des fissures et par conséquent, à une réduction de la durabilité du matériau. L'objectif de cet essai est centré sur l'effet des cycles thermiques du mortier contenant le sable de mâchefer. Les cycles thermiques appliqués vont de 15°C à 71°C représentatifs de l'exposition à des conditions

très ensoleillées au Burkina Faso. En effet les climats chaud et sec sont caractérisés par un rayonnement solaire direct très intense et pouvant atteindre 800w/m² sur une surface horizontale. La faible humidité relative (4 à 20%) couplée à l'absence de nuage, provoque de large amplitude de température pouvant varier de 71°C le jour à 15°C la nuit (Mokhtari A, et al., 2008) .

Pour réaliser cette étude, nous disposons de deux types d'éprouvettes cylindriques de dimensions ϕ50x100 et ϕ40x60mm pour chaque rapport E /C fixé. Tous les types de composites seront soumis à 40 cycles thermiques 15°C/71°C.

Les étapes opératoires sont les suivantes :

1. Cure de 28 jours en ambiance humide (20°C et 100% d'humidité) puis conservation dans une salle sèche (20°C et 50% d'humidité) pendant 48 heures.
2. Echauffement des éprouvettes dans une étuve à 71°C pendant 12 heures.
3. Refroidissement et maintien des éprouvettes dans la salle sèche à 15°C pendant 12 heures.
4. Reprise du cycle par échauffement à 71°C pendant 12 heures.
5. Au terme du 40eme cycle on procède à une caractérisation non destructive et destructive. Les caractéristiques non destructives sont les essais physiques (absorption capillaire, porosité, essai poundite) et celle destructives sont les essais mécaniques (résistances résiduelles).

6.3 Effet de la dessiccation sur les composites

Les éprouvettes sont à 28 jours d'âges. Pour cette étude, les éprouvettes sont mises à l'étuve à 71°C. Dans les 24 premières heures, l'évolution de la perte de masse et la vitesse ultrasonore est évaluée à chaque heure. Au-delà de 24h, ces paramètres sont évalués toutes les 12h jusqu'à masse constante. A la fin, c'est-à-dire, lorsque la perte de masse est nulle, on réalisera les essais physiques résiduels et de porosité à l'eau, absorption capillaire et les résistances résiduelles.

7. CONCLUSION PARTIELLE

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les matériaux utilisés dans cette étude, leurs caractéristiques essentielles et les principaux dispositifs de caractérisation mis en place. Nous avons pu élaborer plusieurs formulations de mortiers composites contenant essentiellement du ciment, du sable et des mâchefers. Le processus consiste à élaborer un mortier de référence à partir duquel le sable a été substitué par le mâchefer à des proportions volumiques variables : 0%, 50% et 100%. Dans ce chapitre, nous avons

également présenté les techniques expérimentales (porosité, vitesse ultrason, absorption capillaire, traction, compression etc.) mises en œuvre au cours de l'étude. Pour terminer nous avons effectué aussi les études de durabilité des mâchefers à travers des études de vieillissement accéléré, cycle thermique, effet de la dessiccation des composites. Tous ces résultats sont présentés et commentés dans le troisième chapitre.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

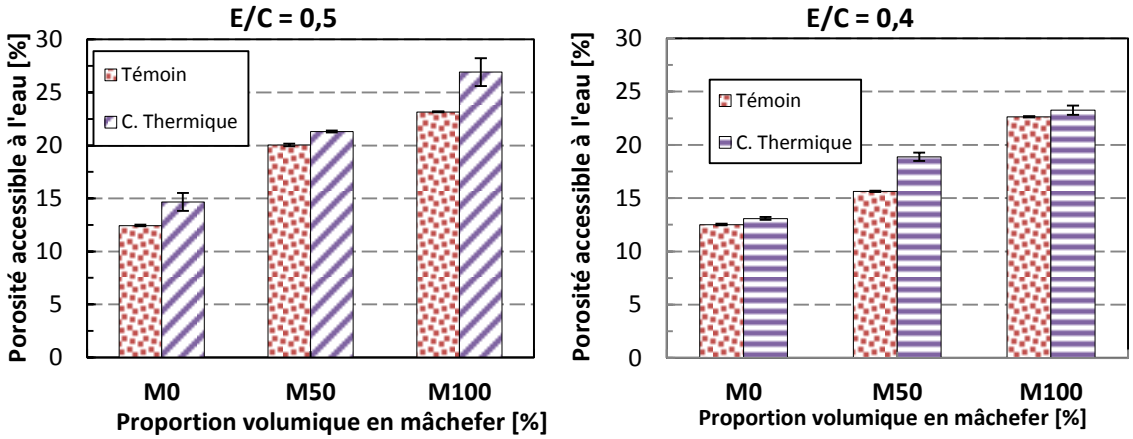
Cette partie présente les résultats de notre travail. En effet, il synthétise les résultats des essais de caractérisation physico-mécanique des différentes études auxquelles ont été soumis les composites. Pour chaque rapport E/C et à la fin de chaque étude, nous avons procédé aux essais de caractérisation physique (absorption capillaire, porosité accessible à l'eau, vitesse ultrason) avant de déterminer les résistances résiduelles (compression et traction).

1. ETUDE DU CYCLE THERMIQUE

1.1 Caractérisation physique

a. Porosité accessible à l'eau

L'essai de porosité a été réalisé sur les éprouvettes ϕ40x60mm et les résultats sont présentés sur la figure 21 (a et b).



(a) (b)

Figure 21 : Porosité accessible à l'eau en fonction de la teneur en mâchefer

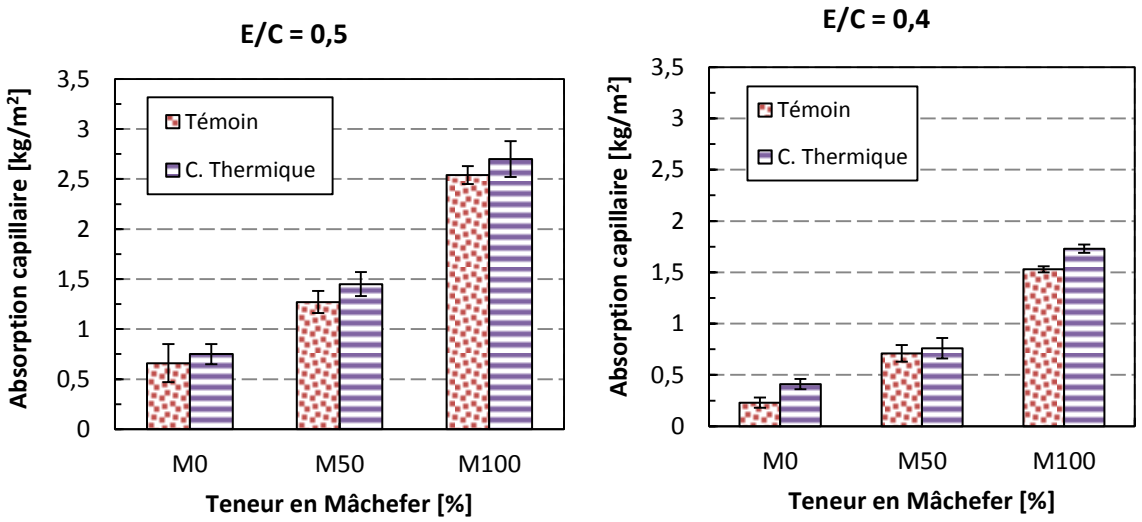
Suite aux résultats de l'essai de porosité présentés sur les figures 21 (a et b), on constate que pour tous les rapports E/C, la porosité augmente avec le taux d'incorporation du mâchefer dans les composites. Cette augmentation peut être attribuée à la structure poreuse des granulats de mâchefer. Ces résultats sont conformes à la littérature. (Siddique, 2013) , (Siddique R, et al., 2014).

D'autre part, la diminution du rapport E/C a contribué à la diminution de la porosité. Ceci s'explique par la réduction de l'eau libre qui a atténué la création et la connexion des pores dans les composites. On en déduit que l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment a influencé positivement la porosité des composites.

On constate également qu'après l'étude du cycle thermique, la porosité augmente quel que soit le rapport E/C. Ces résultats peuvent s'expliquer par la création des microfissures dans les composites après le cycle thermique. Toutefois, cette augmentation est légèrement atténuée pour les composites de rapport E/C = 0,4 ; excepté le composite de type M50. On peut affirmer que l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment a contribué à cette atténuation de la porosité.

b. Absorption capillaire

Au terme du cycle thermique l'essai d'absorption capillaire a été réalisé sur les éprouvettes cylindriques et de dimension ϕ40x60mm.Les résultats sont présentés sur les figures 22 (a et b).



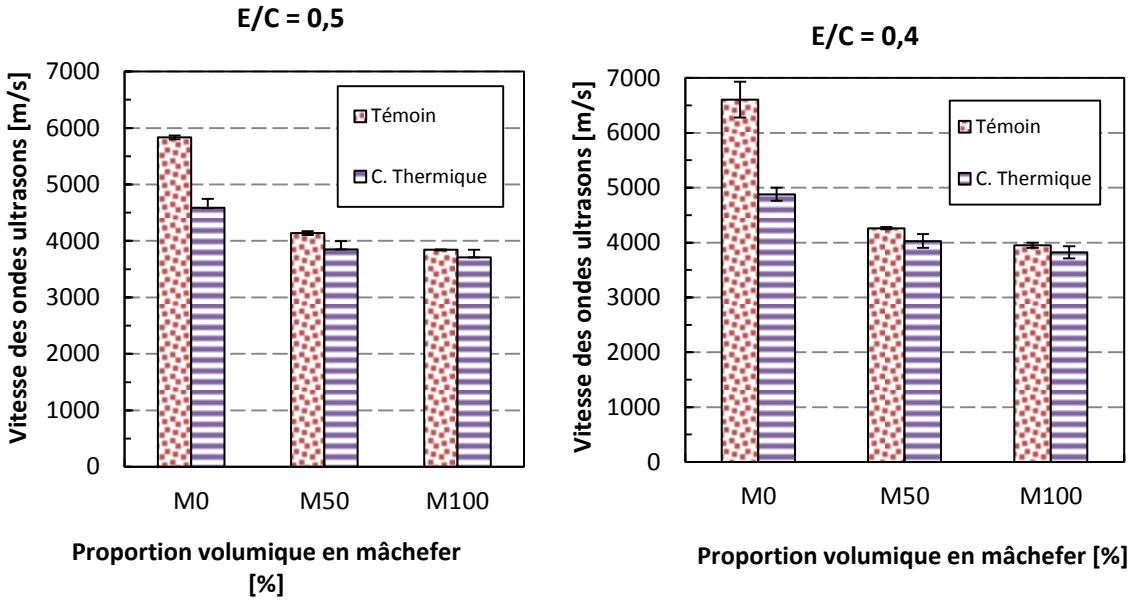
(a) (b)

Figure 22 : Absorption capillaire en fonction de la teneur en mâchefer

Les figures 22 (a et b) montrent que quel que soit le rapport E/C, l'absorption capillaire augmente en fonction du taux de substitution du sable par le mâchefer. Ceci s'explique par la porosité des granulats de mâchefer introduits dans les composites. Ces résultats sont en accords avec ceux rencontrés dans la littérature (Andrade L.B, et al., 2006) et (Siddique R, et al., 2014). Toutefois on note une diminution de l'absorption lorsque le rapport E/C diminue. Cette diminution se justifie par la réduction de la porosité dans les composites (cf. 1.1.a). On conclut que l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment a eu une influence sur l'absorption d'eau des composites.

c. Vitesse des ondes ultrasons

L'essai a été effectué sur les éprouvettes cylindriques de diamètre 5 cm et de hauteur 10 cm. Les résultats sont présentés sur la figure 23.



(a) (b)

Figure 23: Vitesse des ultrasons en fonction de la teneur en mâchefer

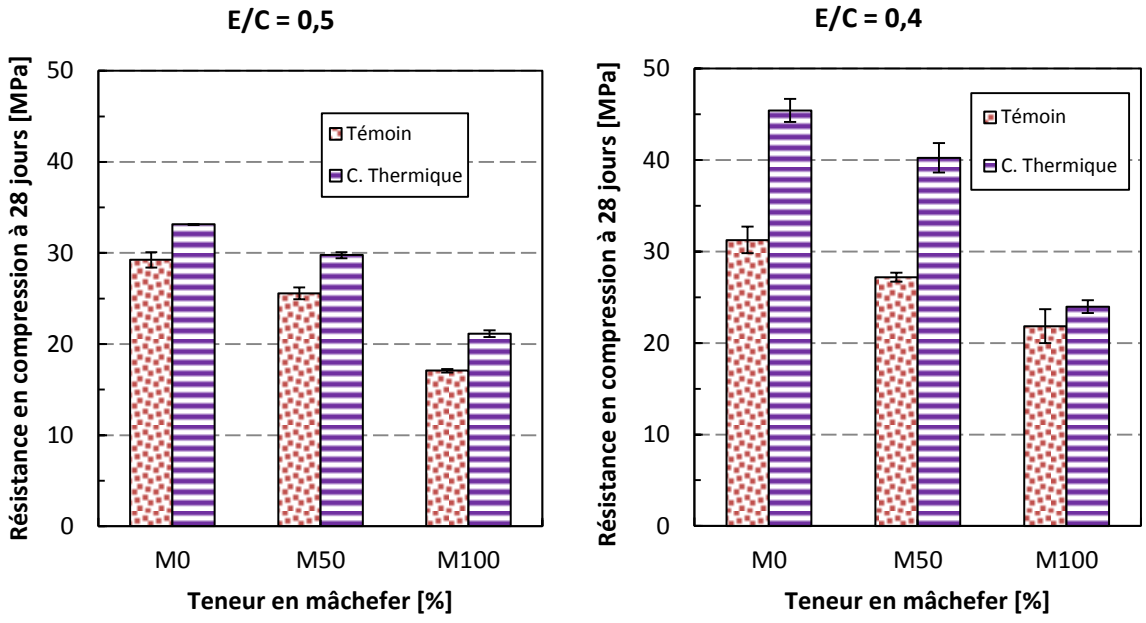
On constate à partir de la figure 23 que l'incorporation des granulats de mâchefer induit une diminution de la vitesse des ondes ultrasonores dans les composites, avant et après le cycle thermique pour tous les rapports E/C. Cette diminution peut être attribuée à l'augmentation de la porosité des composites liée à la structure poreuse des granulats de mâchefer et aux effets du cycle thermique (cf. 1.1.a). En effet, l'augmentation des vides dans les composites entraine une diminution de la vitesse des ondes ultrasonores à cause de la faible conductivité acoustique de l'air se trouvant dans ces vides.

Cependant, on observe une amélioration des vitesses lorsqu'on diminue le rapport E/C, cette amélioration se justifie par la réduction de la porosité en fonction de l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment (cf. 1.1.a). On remarque également une forte diminution de la vitesse après le cycle thermique pour le composite M0 et ceci pour les deux rapports E/C. Ce qui n'est pas le cas de M50 et M100. On pourra penser que la présence du mâchefer attenue les effets négatifs du cycle thermique sur les composites cimentaires.

1.2 Caractérisation mécanique

a. Résistance en compression

L'essai de compression a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 5 cm et de hauteur 10 cm. Les résultats sont présentés sur la figure 24.



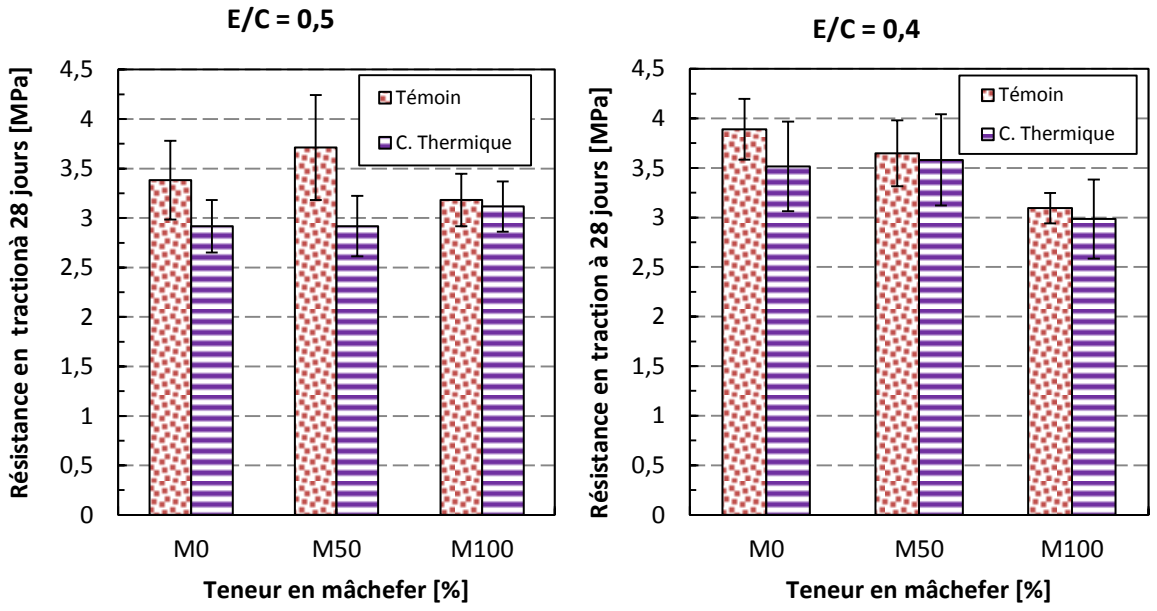
(a) (b)

Figure 24: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer

Pour tous les rapports E/C, les résultats indiquent une augmentation des résistances en compression des composites après le cycle thermique. Ces résultats se justifient par le fait que le cycle thermique crée des gradients hydriques qui, à travers les microfissurations, ont conduit au confinement du cœur des composites. Cette augmentation est plus prononcée avec l'amélioration de la qualité de la pâte, on en conclut que l'amélioration de la qualité de la pâte a une grande influence sur le cycle thermique. Cependant, on observe une diminution de la résistance en fonction du taux d'incorporation du mâchefer dans les composites. Elle se justifie par la fragilité et la structure poreuse des granulats de mâchefer.

b. Résistance en traction

Les essais de traction ont été effectués sur les éprouvettes cylindriques de diamètre 4 cm et de hauteur 6 cm. Les résultats sont présentés sur la figure 25.



(a) (b)

Figure 25: Résistance en traction en fonction de la teneur en mâchefer

Les résultats des essais de traction présentés indiquent que le cycle thermique n'a pas eu une grande influence sur la résistance en traction.

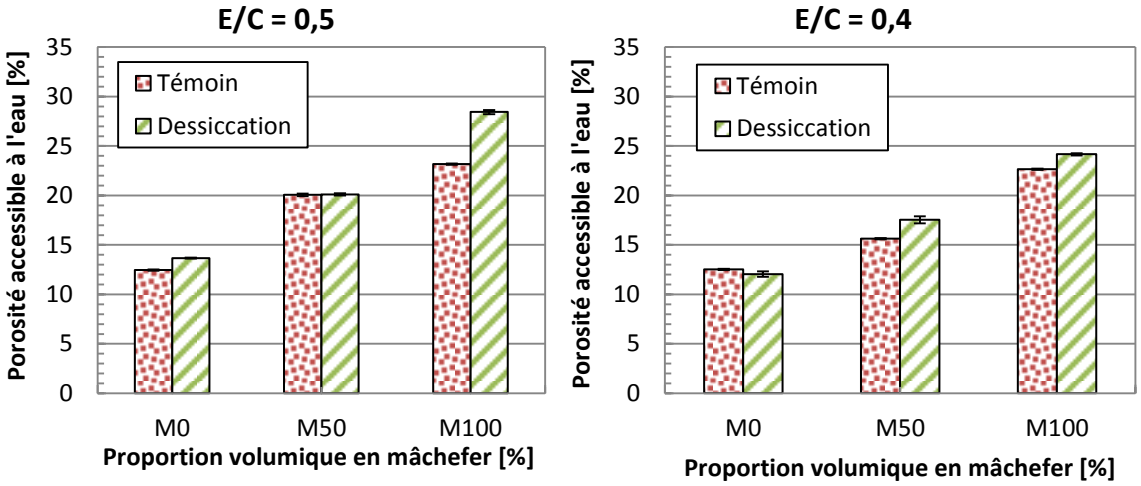
On observe également que quel que soit le rapport E/C, l'incorporation des granulats de mâchefer n'a pas affecté de façon significative la résistance en traction avant et après le cycle thermique.

2. INFLUENCE DE LA DESSICCATION SUR LES PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUES DES COMPOSITES

2.1 Caractérisation physique

a. Porosité accessible à l'eau

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 5 cm et de hauteur 10 cm. Les résultats sont présentés sur la figure 27.



(a) (b)

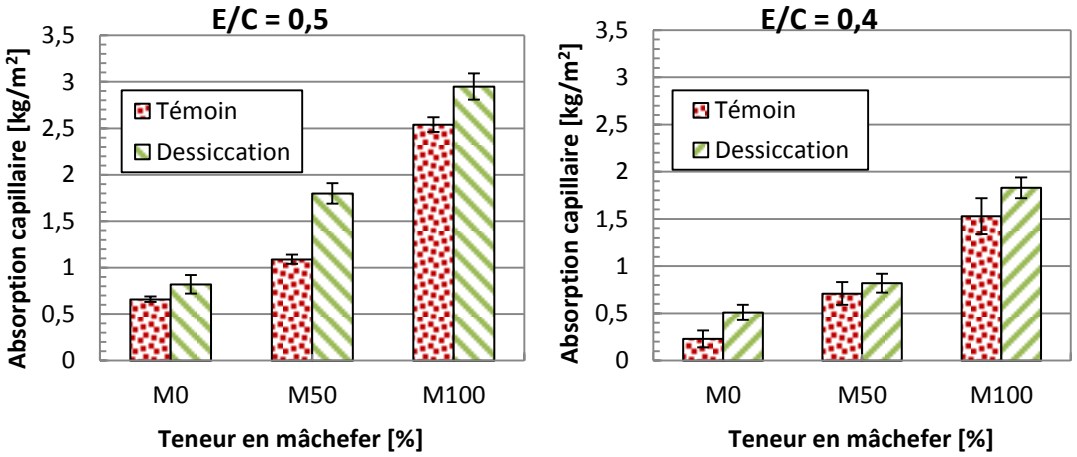
Figure 26: Porosité accessible à l'eau en fonction de la teneur en mâchefer

On constate sur ces figures que la dessiccation a légèrement affecté la porosité des composites. On note également qu'avec le rapport E/C = 0.4, l'augmentation de la porosité après le séchage est plus faible sur le M100 comparativement au rapport E/C = 0.5.

b. Absorption capillaire

Cet essai a été réalisé sur les mêmes éprouvettes utilisées pour l'essai précédent. Les résultats sont présentés sur la figure 27.

Sur ces figures, on observe également une atténuation de l'absorption d'eau en fonction de la qualité de la pâte, mais une légère augmentation en fonction de la teneur en mâchefer et de l'effet de la dessiccation. En effet, la dessiccation produirait la création des microfissures au sein des composites cimentaires. Ces microfissures sont d'autant plus diffuses que quand le rapport E/C est grand.



(a) (b)

Figure 27: Absorption capillaire en fonction de la teneur en mâchefer

c. Evolutions de la perte de masse relative et de la vitesse des ondes ultrasons

- **Evolution de la perte de masse relative**

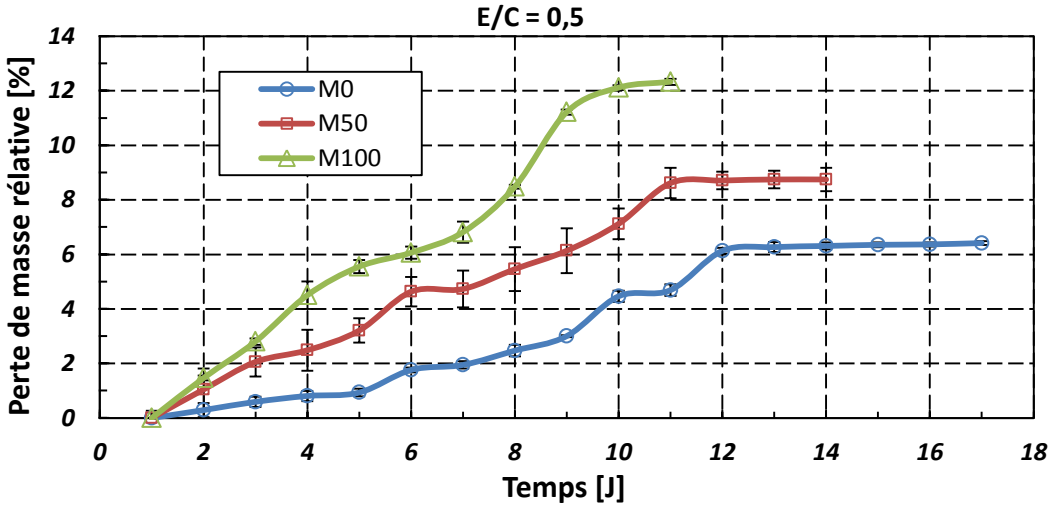


Figure 28: Perte de masse relative en fonction du temps de séchage

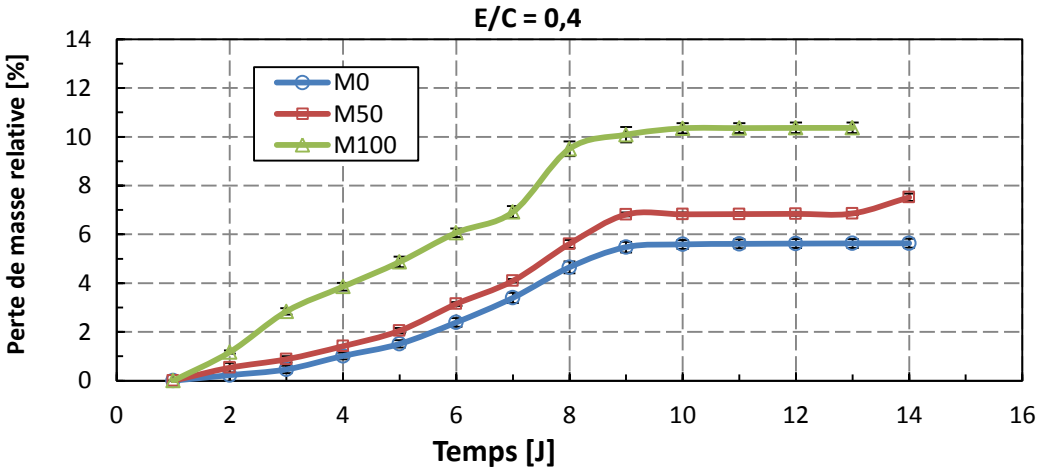


Figure 29: Perte de masse relative en fonction du temps de séchage

Les figures 28 et 29 montrent l'évolution de la perte de masse liée à la dessiccation des composites. On remarque que quel que soit le rapport E/C, la cinétique et la valeur finale de la perte de masse augmentent avec le taux de substitution du sable par le mâchefer. Ces résultats sont en accord avec ceux de la porosité (Figure 26). Toutefois, on remarque que plus le rapport E/C est élevé, plus la cinétique et la valeur finale de la perte de masse augmentent. On conclut que l'amélioration de la qualité de la pâte atténue la perte de masse sous l'effet de la dessiccation.

- **Evolution de la vitesse des ondes ultrasons**

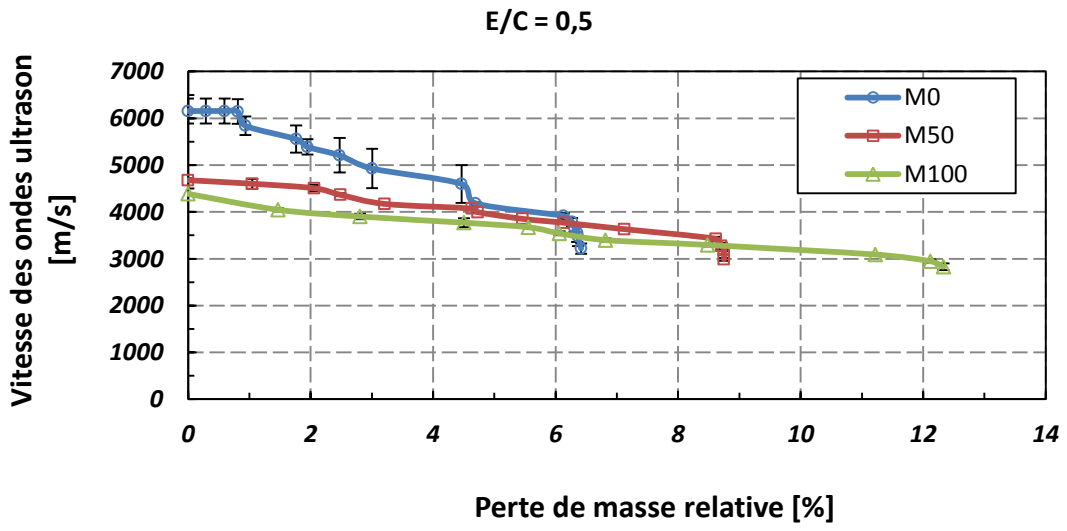


Figure 30: Evolution de la vitesse des ultrasons en fonction de la perte de masse relative

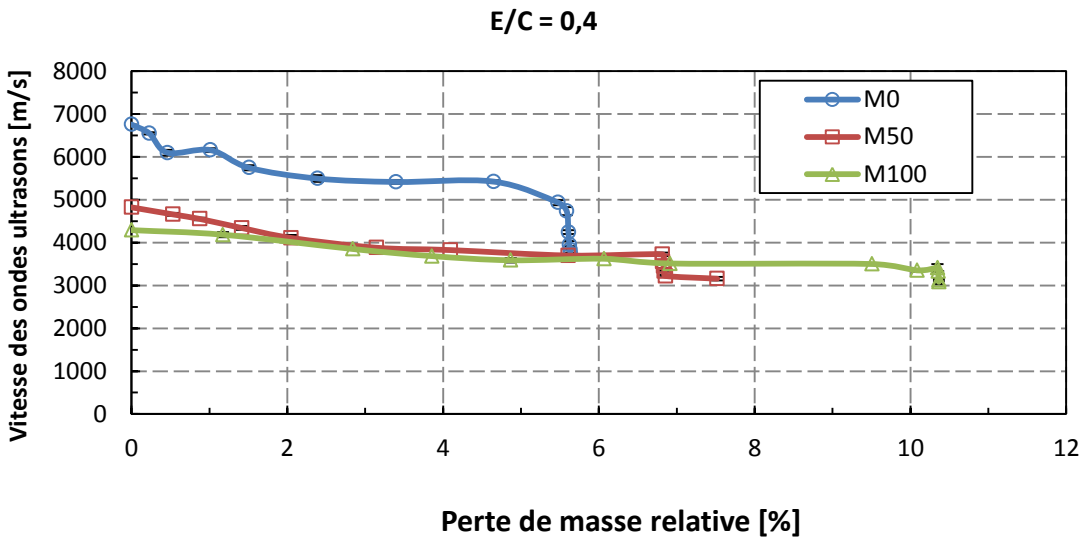


Figure 31: Evolution de la vitesse des ultrasons en fonction de la perte de masse relative

Les figures 30 et 31 traduisent l'évolution de la vitesse des ondes ultrasonores en fonction de la perte de masse. Sur ces courbes, on remarque que la vitesse diminue avec

l'augmentation de la perte de masse relative. Cette diminution est causée par les microfissurations induites par le séchage. On note aussi que pour un même taux de substitution, les composites présentent approximativement les mêmes cinétiques de diminution quel que soit le rapport E/C.

L'endommagement hydrique est défini par la grandeur notée η telle que :

$$\eta = 100 \times \left(1 - \frac{V_f}{V_i}\right) \qquad \textbf{Eq.11}$$

Avec V_i et V_f représentent respectivement les vitesses des ondes ultrasons avant et après le séchage.

Le tableau 7 regroupe la valeur de η en fonction du taux de substitution et du rapport E/C.

Tableau 7 : Endommagement des composites en fonction de E/C et de la teneur en mâchefer

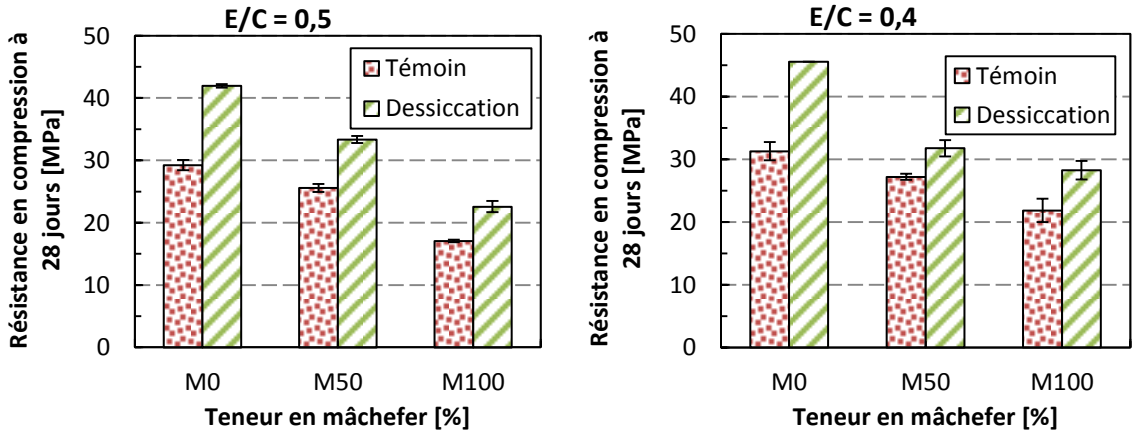
η(%)	*M0*		*M50*		*M100*	
	E/C = 0,5	E/C = 0,4	E/C = 0,5	E/C = 0,4	E/C = 0,5	E/C = 0,4
	44,12	43,2	27,83	25,89	26,36	20,77

On constate à partir du tableau 7 que quel que soit le rapport E/C, l'incorporation des granulats de mâchefer réduit de façon considérable l'endommagement hydrique des composites. On note également une réduction de l'endommagement hydrique liée à l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment. Ceci est bien en accord avec les résultats de la porosité (Figure 26).

2.2 Caractérisation mécanique

a. Résistance en compression

L'essai de compression a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 5 cm et de hauteur 10 cm. Les résultats sont présentés sur la figure 32.



(a) (b)

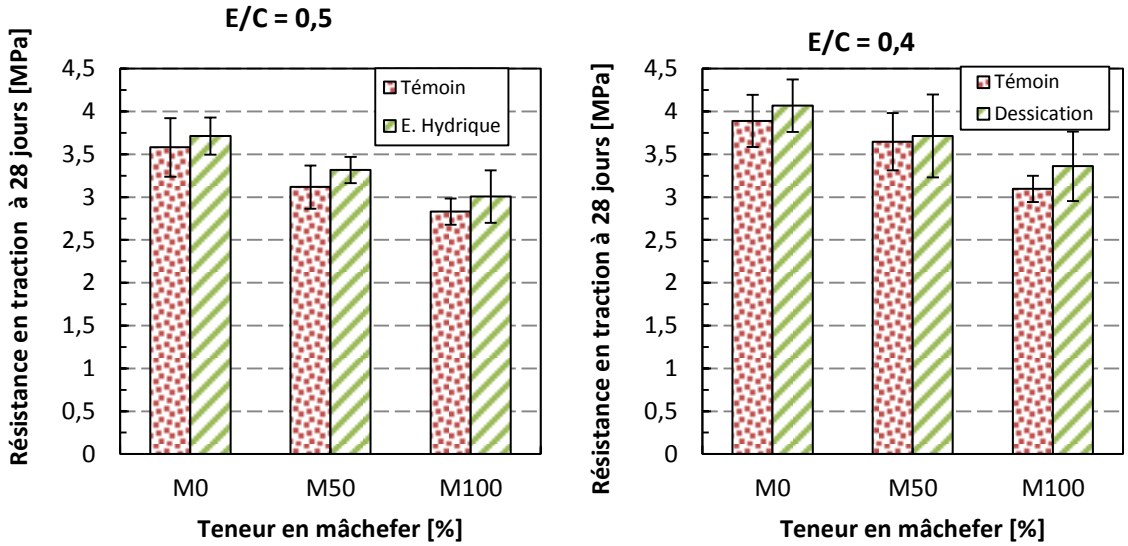
Figure 32: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer

On constate que pour les M0, la résistance augmente avec la diminution du rapport E/C, ceci est dû à l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment et à la diminution de la porosité. On peut dire que le développement de la microstructure est plus faible lorsque le rapport E/C est grand ; ce qui est confirmé par les résultats du tableau 7.

On observe une augmentation des résistances en compression due à l'effet de dessiccation. En effet, l'augmentation de la résistance résulte des gradients hydriques qui engendrent le confinement du cœur par la zone externe et des dépressions capillaires ; ce qui agit comme une précontrainte. Ce phénomène se passe d'une manière concourante avec celui de la création des microfissures sous l'effet du séchage. On remarque ainsi que l'effet des microfissures est moindre par rapport à celui du confinement.

b. Résistance en traction

L'essai de traction a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 4 cm et de hauteur 6 cm. Les résultats sont présentés sur la figure 34.



(a) (b)

Figure 33: Résistance en traction en fonction de la teneur en mâchefer

Les résultats de cet essai indiquent une légère augmentation de la résistance en traction. On note également une légère augmentation due à l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment. Cependant, on observe pour tous les rapports E/C une diminution de la résistance en traction en fonction du taux d'incorporation des granulats de mâchefers dans les composites. Celle-ci peut être attribuée à la fragilité des granulats de mâchefer.

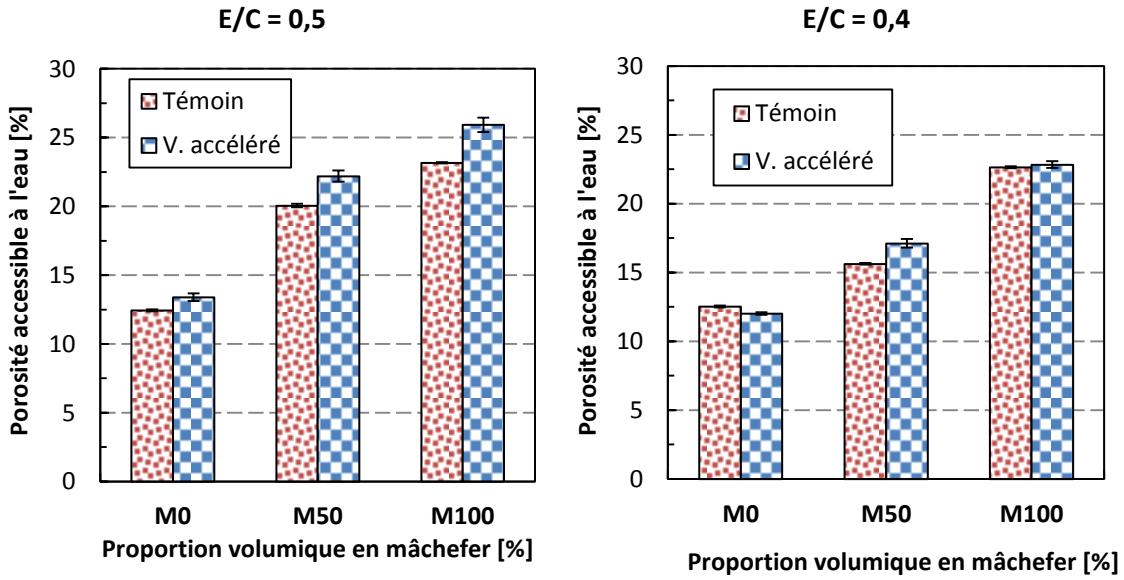
3. ETUDE DU VIEILLISSEMENT ACCELERE

Cette étude a été réalisée à travers l'essai de mouillage-séchage sur des éprouvettes conservées dans l'eau à 20°C. A l'âge de 28 jours les éprouvettes sont soumises à 12 cycles de vieillissement accélérés suivant la norme ASTM D559-57. Les résultats de caractérisation physico-mécaniques sont présentés comme suit :

3.1 Caractérisation physique

Pour la caractérisation physique nous avons la porosité accessible à l'eau, l'absorption d'eau par capillarité, l'évolution de la masse et de la vitesse ultrason.

a. Porosité accessible à l'eau

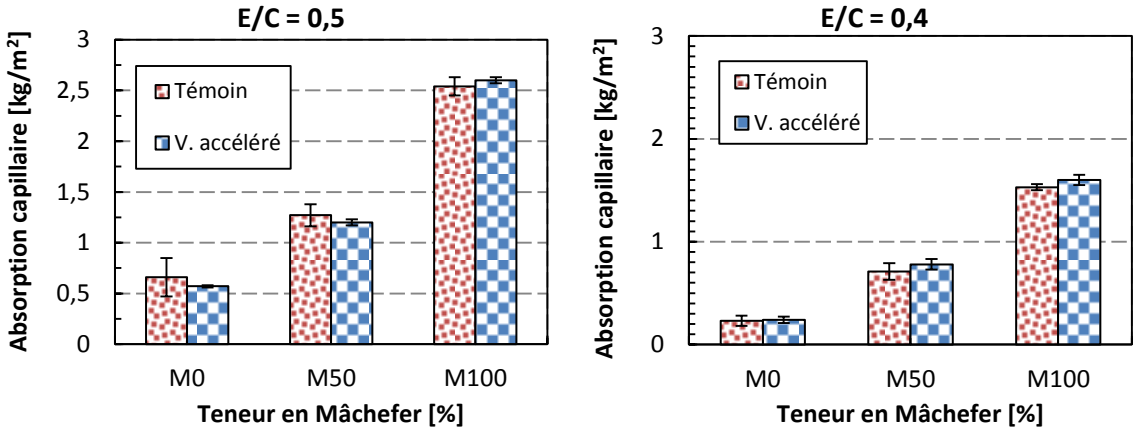


(a) (b)

Figure 34: Porosité accessible à l'eau en fonction de la teneur en mâchefer

On remarque sur la figure 34 que quel que soit le taux de substitution, le vieillissement accéléré n'a pas eu une grande influence sur la porosité accessible à l'eau des composites ; sauf pour le rapport E/C = 0.5 où on observe une augmentation de la porosité après le vieillissement ; cette augmentation est d'autant plus importante quand le taux de mâchefer est élevé. Toutefois, on note une diminution de la porosité liée à l'amélioration de la qualité de la pâte, et ceci même après le cycle de vieillissement.

b. Absorption capillaire



(a) (b)

Figure 35: Absorption capillaire en fonction de la teneur en mâchefer

Les résultats des figures 35 (a et b) indiquent que quel que soit le rapport E/C, l'absorption capillaire augmente avec le taux de substitution. On constate également que le vieillissement accéléré n'a pratiquement eu aucune influence sur l'absorption d'eau des composites. Toutefois, on note une diminution de l'absorption d'eau liée à l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment, et ceci avant et après le cycle du vieillissement accéléré.

Des deux figures 34 et 35 on remarque que les résultats obtenus montrent une augmentation nette de la porosité et de l'absorption d'eau par capillarité avec l'augmentation du dosage en mâchefer.

c. Evolutions de la perte de masse et de la vitesse des ondes ultrasons

- **Evolution de la perte de masse relative**

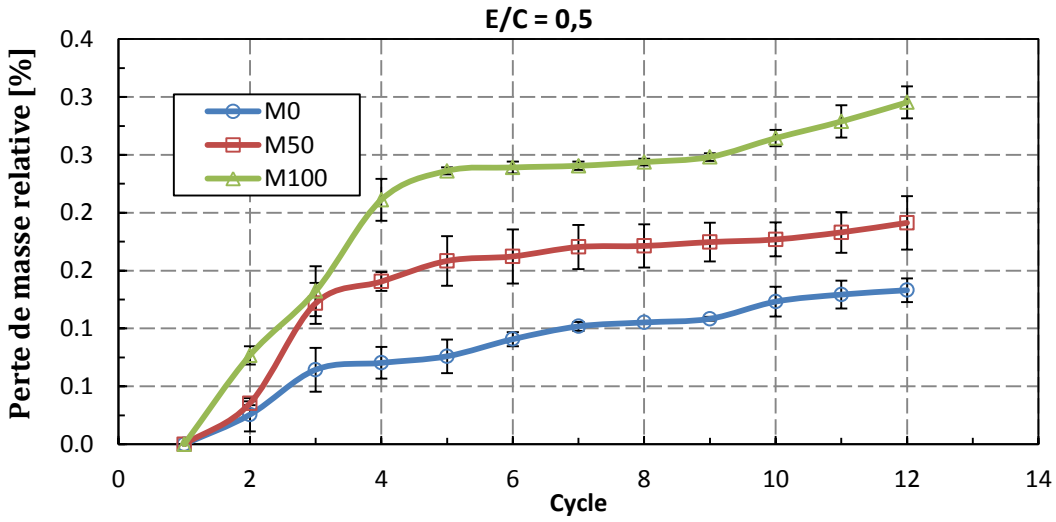


Figure 36: Evolution de la perte de masse relative en fonction du cycle

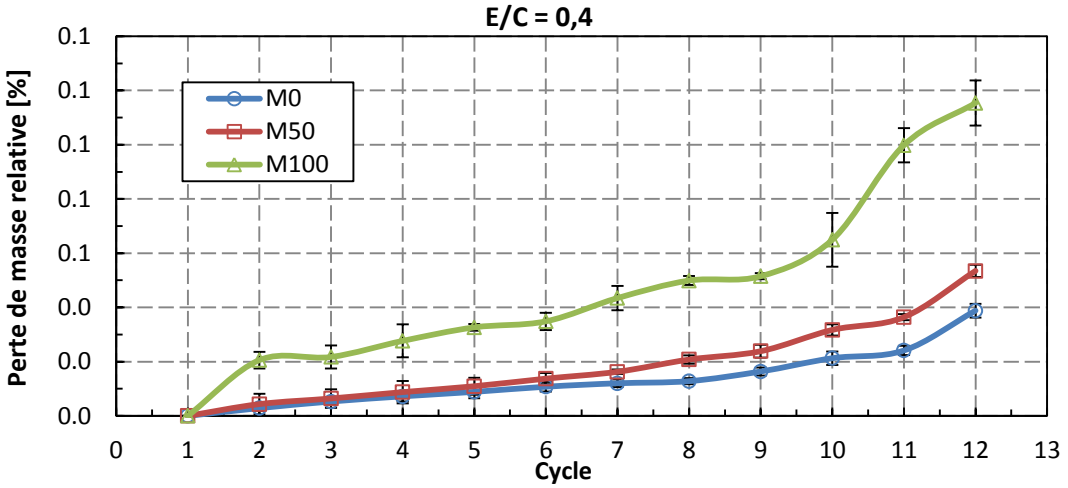


Figure 37: Evolution de la perte de masse relative en fonction du cycle

Les figures 36 et 37 montrent l'évolution de la perte de masse par rapport au cycle de vieillissement. Pour les deux rapports E/C, on constate une perte de masse légèrement croissante avec le taux d'incorporation du mâchefer. Ces résultats se justifient par l'augmentation de la porosité des mortiers contenants le mâchefer. D'autre part, en observant les cinétiques de perte de masse des composites, on constate que les composites de rapport E/C = 0,5 présentent une forte cinétique de perte de masse dans les quatre premiers cycles du vieillissement avant de se stabiliser. Tandis que pour le rapport E/C = 0,4, on remarque que la perte de masse est assez lente. Cette différence de cinétiques s'explique par la forte présence de l'eau libre dans les composites de E/C = 0,5, contrairement à ceux de rapport E/C = 0,4. On note également, pour un même taux de substitution, une diminution de la perte de masse en fonction de la diminution du rapport E/C. Ceci est dû à l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment.

- **Evolution de la vitesse des ondes ultrasons**

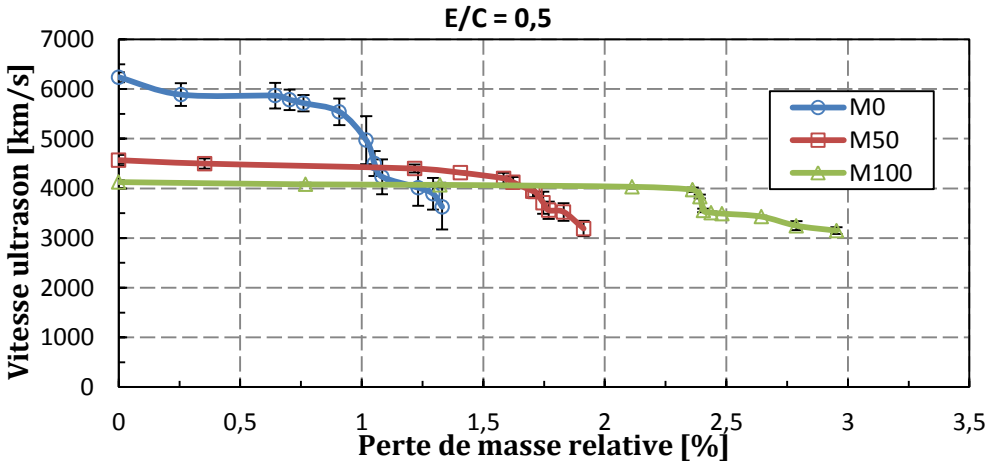


Figure 38: Evolution de la vitesse des ultrasons en fonction de la perte de masse relative

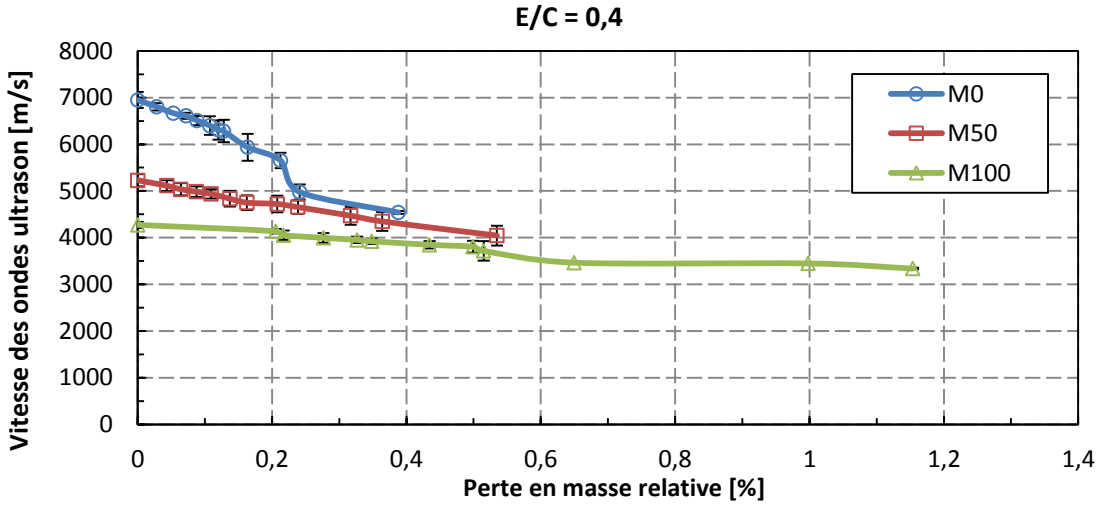
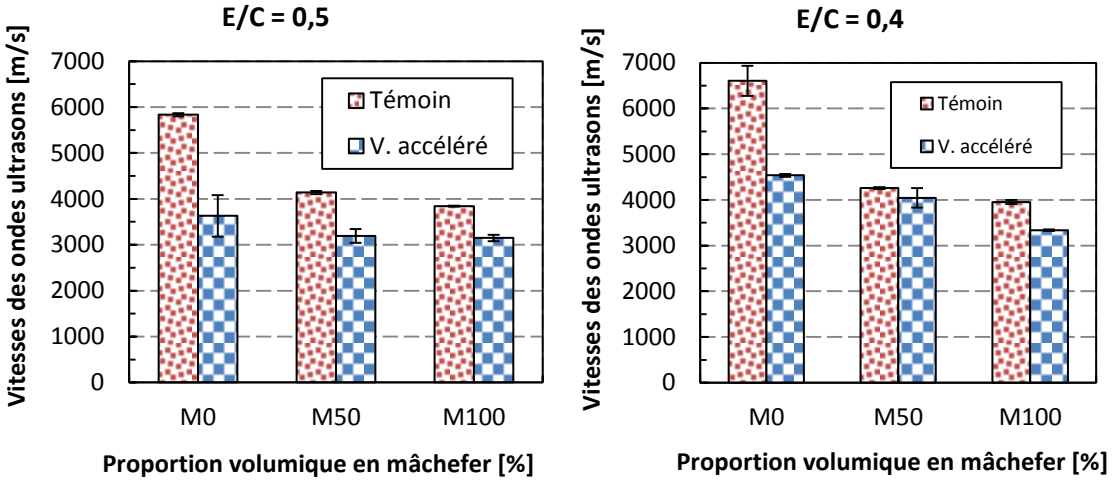


Figure 39: Evolution de la vitesse des ultrasons en fonction de la perte de masse relative

Les courbes d'évolution de la vitesse figures 38 et 39 montrent que la vitesse des ondes ultrasons diminue avec l'augmentation de la perte en masse. Cette diminution de la vitesse peut s'expliquer par le fait qu'à volume constant, l'augmentation de la perte de masse entraine une augmentation de la porosité qui se traduit par une réduction de la vitesse des ondes ultrasonores due à la faible conductivité de l'air. Toutefois, la diminution de la vitesse est plus faible pour les composites de rapport E/C = 0,4, ceci s'explique par l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment.

d. Vitesse des ondes ultrasons



(a) (b)

Figure 40: Vitesse des ondes ultrasons en fonction de la teneur en mâchefer

Selon l'endommagement défini par l'équation 11, on constate sur la figure 40 que quel que soit le rapport E/C, l'endommagement dû au vieillissement accéléré diminue avec

l'augmentation du taux de mâchefer dans les composites. La diminution est plus prononcée lorsque le rapport E/C diminue. On en déduit que le mâchefer a un effet bénéfique sur l'endommagement dû au vieillissement accéléré et que cet effet est plus significatif avec l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment. Les résultats de l'endommagement présentés au tableau 8 confirment cette hypothèse.

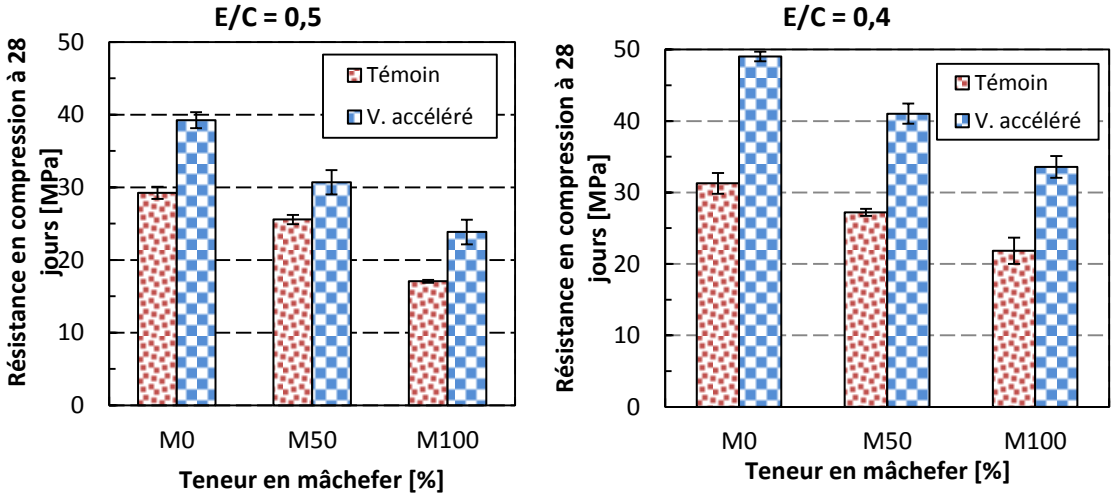
Tableau 8 : Endommagement des composites dû au vieillissement accéléré

η(%)	*M0*		*M50*		*M100*	
	E/C = 0,5	E/C = 0,4	E/C = 0,5	E/C = 0,4	E/C = 0,5	E/C = 0,4
	37,79	31,28	22,86	5,08	18,08	15,58

3.2 Caractérisation mécanique

Les variations des résistances à la compression et à la traction des mortiers, avant et après les cycles de mouillage séchage sont schématisées sur les figures 41 et 42.

a. Résistance en compression



(a) (b)

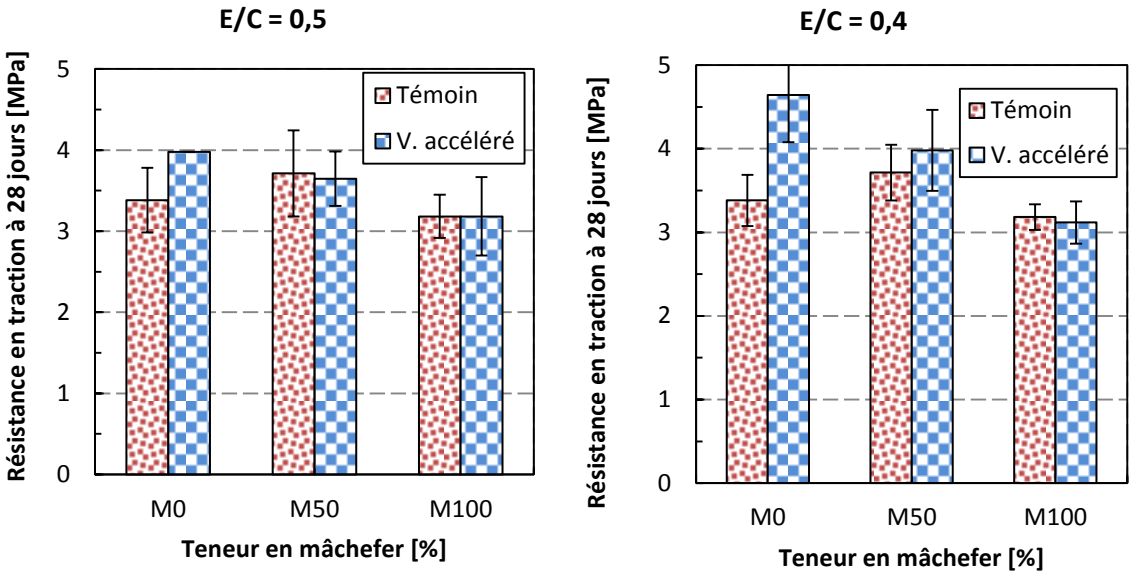
Figure 41: Résistance en compression en fonction de la teneur en mâchefer

Les éprouvettes soumises aux cycles de mouillage-séchage (figure 41) montrent que la résistance en compression augmente progressivement avec l'amélioration de la qualité de la patte de ciment et aussi en fonction des taux de substitution. Cette amélioration des résistances serait due à l'effet du séchage expliqué au paragraphe 1.2. On constate aussi une légère diminution des résistances mécaniques en fonction du taux d'incorporation du mâchefer. Cette légère diminution est bien liée à la modification de la structure des mortiers de mâchefer. Ce qui est certainement affecte les résistances mécaniques des mortiers.

b. Résistance en traction

Les résultats de l'essai de traction sont présentés sur la figure 42.

Les résistances à la traction pour tous les mortiers sont moins affectées par les cycles de mouillage-séchage sauf pour les composites de type M0, ou on observe une augmentation des résistances. On note également l'effet positif de l'amélioration de la pâte à tous les taux de substitution.



(a) (b)

Figure 42: Résistance en traction en fonction de la teneur en mâchefer

4. CONCLUSION PARTIELLE

Suite aux différentes études auxquelles ont été soumis les composites, on note une augmentation des résistances mécaniques liées au confinement des composites sous l'effet du séchage. Cependant, on a observé une augmentation de la porosité et de l'absorption d'eau des composites. On retiendra que les différentes études ont conduit à la détérioration de la microstructure des composites. Néanmoins, on relève l'effet bénéfique du mâchefer qui a largement contribué à la conservation de la microstructure des composites. Ainsi, on pourra dire que la diminution des résistances mécaniques en fonction du taux d'incorporation du mâchefer est due à la fragilité des granulats de mâchefer.

Quel que soit le taux de substitution et l'étude à laquelle ont été soumis les composites, l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment a largement contribué à réduire la porosité et l'absorption d'eau des composites, et par conséquent on assiste à une augmentation significative des résistances mécaniques.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Notre travail avait pour objectif les études de durabilité sur le mortier contenant le sable de mâchefer afin de proposer un matériau durable à l'industrie du béton. Ces études sont entre autres l'étude sur le vieillissement accéléré, du cycle thermique et du séchage.

Dans notre premier chapitre, nous avons fait une synthèse bibliographique qui présente un bref résumé des matériaux cimentaires et aussi la synthèse des principaux travaux bibliographiques scientifiques correspondant à notre thème.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les matériaux utilisés dans cette étude, leurs caractéristiques essentielles et les principaux dispositifs de caractérisation mis en place. Nous avons pu élaborer plusieurs formulations de mortiers composites contenant essentiellement du ciment, du sable et des mâchefers. Le processus de formulation consiste à élaborer le mortier normal qui constitue la référence. Ensuite les granulats de mâchefer sont introduits en substitution volumique du sable à des proportions bien définies : 0%, 50% et 100%. Dans ce chapitre, nous avons également présenté les techniques expérimentales (porosité, vitesse ultrason, absorption capillaire, traction, compression etc.) mises en œuvre au cours de l'étude. Pour terminer nous avons effectué aussi les études de durabilité des mâchefers à travers des études de vieillissement accéléré, de cycle thermique et du séchage.

Dans le troisième et dernier chapitre nous avons présenté les résultats et commenté les résultats des différentes études. A l'observation générale de toutes les études nous avons constaté que l'ajout de granulats de mâchefer dans les composites provoque une augmentation de la porosité accessible à l'eau et de l'absorption capillaire. On constate également dans ces mortiers une diminution des vitesses de propagation des ondes ultrasonores au mortier de référence.

Les résultats montrent également que le cycle thermique (15°C /71°C), l'endommagement dû à la dessiccation (71°C), le vieillissement accéléré (20°C/71°C) entrainent tous une augmentation des résistances résiduelles (compression). Cela pourrait être liée au confinement des composites sous l'effet du séchage. On retiendra que les différentes études ont conduit à la détérioration de la microstructure des composites. Néanmoins on relève l'effet bénéfique du mâchefer qui a largement contribué à la conservation de la microstructure des composites. Ainsi, on pourra dire que la diminution des résistances mécaniques en fonction du taux d'incorporation du mâchefer n'est due qu'à la fragilité des granulats de mâchefer.

Suites aux résultats de ce travail, comme perspectives nous proposons ce qui suit:

- Une étude sur la conductivité thermique afin de conclure que le mâchefer peut être exploité pour limiter les nuisances sonores et justifier l'utilisation du béton de granulats de mâchefer comme isolant thermique.
- Il faudrait aussi tester les composites à des températures plus élevées (>71°C) pour voir si celles-ci améliorent toujours les résistances résiduelles.

BIBLIOGRAPHIE

Aggarwal and Gupta SM. 2007. Effect of bottom ash as replacement of fine aggregates in concrete. *Asian Journal of Civil Engieering (Building and Housing).* 2007. pp. 49-62.

Andrade L.B, Rocha J.C and Cheriaf M. 2006. Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement. *Waste Management.* 2006. 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. 2006. pp. 1-5.

Ariffin K.S. 2007. Fly ash - coal combustion residue. In Université des sciences de Malaysie. Minéraux industriels. [ed.] http://mineral.eng.usm.my/web%20halaman%20mineral/Components%20of%20coal%20ash. 2007.

Arumugam K, Ilangovan R and MD, James. 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 and 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. *Special issue new materials and new uses of for old materials.* 2003. pp. 156,85-92.

Bai, Darcy F et Basheer PAM. 2005. Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. Construction and Building Materials. *Construction and Building Materials.* 2005. pp. 961-7.

Berthelon. 2002. Les déchets solides de l'incinération des ordures ménagères. Mémoire de Maîtrise Sciences de l'Environnement, Milieux Urbains et Industriels, Université de Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise, 28 p. 2002.

Brundtland. 1987. Développement durable, rapport brundtland. 1987.

Bucholc and Ghafoori. 1996. Investigation of lignite based bottom ash for structural concrete. *Journal of Materials in Civl Engineering.* 1996. p. 37.

Cai and Ghafoori. 1998. Laboratory-made roller compacted concretes containing dry bottom ash: part-II-long term durability. *ACI Materials Journal.* 1998. p. 51.

CIMbéton. 2005. *Les constituants des bétons et des mortiers.* s.l. : Amprincipe Paris, 2005.

Da CHEN. 2005. Modélisation du comportement hydromécanique d'un mortier sous compression et déssication. *Thèse de doctorat.* s.l. : Université des Scineces et Technologies de Lille, 2005. pp. 13-15.

EMSE. 2001. Quel devenir pour les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères? In École des mines nationale de Saint-Étienne. Gestion intégrée des ordures ménagères. *Cercle National de Récyclage.* 2001. p. 9.

Environnement Canada. 2010. Document technique sur l'incinération en discontinu de matières résiduelles. Environnement Canada. L'environnement et déchets solides municipaux. 2010.

Ghafoori and Bucholc. 1997. Properties of high-calcium dry bottom ash concrete. *ACI Mater.* 1997. pp. 90-101.

Ghafoori and Cai. 1998. Laboratory-made roller compacted concretes containing dry bottom ash: part-I-mechanical properties. ACI Material Journal. *ACI Materials Journal.* 1998. p. 30.

Guilbault Olivier. 2013. Gestion Comparée de Mâchefers au QUEBEC et dans d'autres Juridictions. *Essai présenté au centre universitaire de formation en environnement.* 2013. pp. 3-11.

Gupta Sakshi. 2013. Sustainable Utilization Of Bottom Ash And Foundry Sand In Cementations Composition: REVIEW. *Gupta Sakshi - Research in Civil and Environmental Engineering 2013 1 (05) 275-287.* 2013.

Kim H.K and Lee. 2010. Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete. *Construction and Building Materials.* 2010. pp. 1115-22.

Kim H.K, Jeon J.K and Lee. 2011. Flow, water absorption, and mechanical characteristics of normal and high-strength mortar incorporating fine bottom ash aggregates. *Construction and Building Materials.* 2011. pp. 249-256.

Lam. 2010. Use of Incineration MSW Ash. [ed.] http://www.mdpi.com/2071-1050/2/7/1943. *A review. Sustainability.* 2010. Vol. 2.

Li. 2004. Characterization of solid residues from municipal solid waste incinerator. Environnement technical information service. Waste Management. 2004.

Malkit Singh and Rafat Siddique. 2012. Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. *Resources, Conservation and Recycling* . 2012. pp. 20-32.

Mokhtari A, M, Brahimi K and R, Benziada. 2008. Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar. *Revue des Energies Renouvelables.* 2008. Vol. 2, pp. 307 – 315.

Naik and al. 2001. Performance and Leaching Assessment of Flow able Slurry, Journal of Environmental Engineering,. 2001.

Norme ASTM 559-57.

Norme EN 1097-7.

Norme EN 196-1.

Norme EN 197-1.

Norme ISO 5017.

Norme NF 18-598.

Norme NF P 18-540.

Norme NF P 18-554-1.

Norme NF P 18-555.

Norme NF P 18-560.

Norme NF P 18-573.

OFFRIR. 2006. Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères. Observatoire Français du Recyclage dans les Infrastructures Routières. 2006.

Ömer, Özkan, Isa, Yüksel and Özgü, Muratoglu. 2006. Strength properties of concrete incorporating coal bottom. *Construction and Building Materials.* 2006. pp. 961-972.

Ömer, Özkan, Isa, Yüksel and Özgur, Muratoglu. 2007. Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag, Waste Management, 27, 161–167. 2007. pp. 961-972.

Sarazin M. 2003. Les mâchefers d'incinérateurs. In Association Pour la Protection de l'Environnement du Lunellois.Documentation technique. 2003.

Serpell A and Alarcon LF. 1998. *Construction process improvement methodology for construction projects, Int J Project Manag, 16(4):215–21.* 1998.

Shii-Cong, Kou and Poon Chi-Shun. 2009. Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine reclycled aggregate as fine aggregates. *Construction and Building Materials.* 2009. Vols. 2877-86.

Siddique R and Singh, Malkit. 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.

Siddique, R. 2013. Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self compacting concrete containing coal bottom ash. *Construction and Building.* 2013. pp. 1444-1450.

Siddique, Rafat. 2010. Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials. *Resources, Conservation and Recycling.* 2010. pp. 1-7.

Targan S, et al. 2003. Ilfluence of natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash, and fly ash on the properties of Portland cement. [ed.] 1175-1182 33. *Cement and Concrete Research.* 2003.

Topcu and Bilir. 2010. Effect of bottom ash as fine aggreagte 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.

We Energies. 2012. Coal combustion products and electric power generation. In Wisconsin Energy Corporation. Environnement. 2012.

Yuksel and al. 2011. *Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-product as fine aggregate replacement.* 2011.

Yuksel and Genc A. 2007. Properties of concrete containing non ground ash and slag as fine aggregate. *ACI Materials Journal.* 2007. pp. 397-403.

ANNEXES

Annexe I : Tableau d'analyse granulométrique du sable.....I

Annexe II : Tableau d'analyse granulométrique du mâchefer..... II

Annexe III: Calcul des masses volumiques apparents des matériaux.....III

annexe IV : Calcul des masses volumiques spécifiques des matériaux III

Annexe V: Equivalent de sable III

Annexe VI: Equation de formulation du mortier IV

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 APPARENTS 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 moyennes	Valeur lue V_{lu} (cm^3)	Υ_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: 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 $\rho_e = 1\ t/m^3$, $\rho_c = 3{,}15\ t/m^3$ et $\rho_s = 2{,}63\ t/m^3$

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 :

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

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