

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire matériaux de
génie civil et environnement



Thèse de Doctorat en Science
en Génie Civil

Présentée par :
ABADOU Yacine

Intitulée

**Influence de l'ajout de déchets de
céramique broyés sur les performances
des mortiers à base de sable de dune**

Soutenue publiquement le 08/03/2018 devant le jury :

Président de jury :	Mr. BALI Abderrahim	Professeur à l'ENP d'Alger
Directeur de thèse :	Mme. MITICHE-KETTAB. Ratiba	Professeur à l'ENP d'Alger
Examineurs :	Mr. BELKACEMI. Smail	Professeur à l'ENP d'Alger
	Mr. BENCHEIKH. Boubaker	Maitre de conférences (A) à l'U. Djelfa
	Mr. HADDADI Smail	Professeur à l' USTHB
	Mr. ABDESSEMED Mouloud	Maitre de conférences (A) à l'U. Blida 1

ENP 2018

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire matériaux de
génie civil et environnement

LMGCE

Thèse de Doctorat en Science
en Génie Civil

Présentée par :
ABADOU Yacine

Intitulée

**Influence de l'ajout de déchets de
céramique broyés sur les performances
des mortiers à base de sable de dune**

Soutenue publiquement le 08/03/2018 devant le jury :

Président de jury	: Mr. BALI Abderrahim	Professeur à l'ENP d'Alger
Directeur de thèse	: Mme. MITICHE-KETTAB. Ratiba	Professeur à l'ENP d'Alger
Examineurs :	Mr. BELKACEMI. Smail	Professeur à l'ENP d'Alger
	Mr. BENCHEIKH. Boubaker	Maitre de conférences (A) à l'U. Djelfa
	Mr. HADDADI Smail	Professeur à l' USTHB
	Mr. ABDESSEMED Mouloud	Maitre de conférences (A) à l'U. Blida 1

ENP 2018

Remerciements

Je tiens à exprimer en premier toute ma reconnaissance au Professeur R. MITICHE-KETTAB pour avoir accepté d'être directrice de ma thèse et pour l'aide considérable qu'elle m'a apportée pour diriger ce travail de recherche.

Je tiens à remercier Professeur BALI Abderrahim d'avoir accepté d'être président du jury de la thèse

Mes remerciements s'adressent ensuite aux membres de jury:

Monsieur S. BELKACEMI	Professeur à l'ENP d'Alger
Monsieur B. BENCHEIKH	Maitre de conférences (A) à l'U. Djelfa
Monsieur HADDADI Smail	Professeur à l' USTHB
Monsieur Mr.ABDESSEMED Mouloud	Maitre de conférences (A) à l'U.Blida 1

qui ont bien voulu consacrer du temps pour examiner ma thèse;
Je remercie également toute ma famille, qui m'a toujours soutenue.

الملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير نفايات السيراميك على أداء الملاط المشكل من الرمل، في حالته الصلبة واللينة، للحصول على ملاط يمتاز بخصائص فيزيو ميكانيكية دائمة في أوساط مختلفة. يعتبر الآن إعادة التدوير واستعادة النفايات حلاً للمستقبل من أجل مواجهة العجز بين الإنتاج والاستهلاك وحماية البيئة. ويمكن لعملية دمج نوعين من نفايات السيراميك، بنسبة مئوية تتراوح ما بين 10 و 50، وإضافتهما إلى الملاط المشكل من الرمال الكثبانية أن تقدم مزيجاً يتمتع بأداء جيد على المستويين الفيزيو-كيميائي و الميكانيكي، سواء في حالته الصلبة أو اللينة، مقارنة بالملاط المشكل من الرمال الكثبانية فقط. من خلال مراحل تحضيرنا لهذا الخليط الملاط المشكل من الرمال الكثبانية مع نفايات السيراميك، قمنا بتجارب عديدة لتوضيح نوعيته و الارتقاء باستعماله آخذين بعين الاعتبار عدة ظواهر. و في الأخير نجحنا في توضيح إمكانية إستعمال خليط تشكيلية غير متوافق عليها غير تقليدية أساسها الرمل في ضل التنمية المستدامة. يحتوي الملاط الذي تم الحصول عليه على أداء ميكانيكي عالٍ للغاية، تصل قوة الضغط إلى 22 MPa، و قوة شد الانحناء تبلغ 0.8 MPa، كما أنها تظهر سلوكاً جيداً جداً تجاه تأثير الكربونات، فضلاً عن مؤشرات ممتازة للمتانة. تظهر النتائج أن الالتصاق يعتمد على كل من نوع وكمية النفايات المستخدمة وبيئة المعالجة من الإصلاح. هو الأمثل من 30 ٪ من النفايات والضغط على التصاق قذائف الملاط الذي يحتوي على نفايات السيراميك أعلى من قذائف الملاط على أساس الكثبان الرملية.

كلمات المفاتيح: الكثبان الرملية، الملاط المعدل بنفايات السيراميك، الأداء، الأداء الميكانيكي، قوة التحمل، الالتصاق

ABSTRACT: this work aims to study the effect of waste ceramic on the performance on state fresh and hardened dune sand mortar to make it durable and with good physico-mechanical properties and in different environments. Recycling and waste recovery are now considered as a solution for the future in order to meet the deficit between production and consumption and to protect the environment. The incorporation of the two types of ceramic waste in the form of a substitution of 10% to 50% for dune sand mortars makes it possible to obtain a new variety of compound mortar having physico-chemical and mechanical performance, Fresh and hardened, superior to those of dune mortar. Through the characterization phase of our dune sand mortar modified by the ceramic waste, several test protocols have been established to highlight the qualities of the material and to promote its current use. This study, finally, succeeded in illustrating the potential for the use of unconventional aggregates in a sustainable development perspective in a wider range of dune sand mortars. The mortars obtained develop very high mechanical performances, reaching 22 MPa compressive strength, 0.8 MPa flexural strength. They also present a very good long-term behaviour towards the carbonation, as well as excellent indicators of durability. The results show that the adhesion depends on both the type and the amount of the waste used and the cure that is applied. It is optimized from 30% of the waste and mortar with ceramic waste adhesive strengths are higher than dune sand mortar.

Keyword: Dune sand, modified mortars by ceramic waste, performance, mechanical behavior, durability, adhesion.

Résumé: Le présent travail a pour but d'étudier l'effet des déchets de céramique sur les performances à l'état frais et durci des mortiers à base de sable de dune. Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement. L'incorporation des deux types de déchets céramiques en substitution de 10% à 50% aux mortiers à base de sable de dunes permet d'obtenir une nouvelle variété de mortier composé ayant des performances physico-chimiques et mécaniques, tant à l'état frais que durci, supérieures à celles du mortier dunaire. A travers la phase de caractérisation de notre mortier, plusieurs protocoles d'essais ont été mis en place afin de mettre en évidence les qualités de ce matériau et de promouvoir son usage courant. Cette étude a finalement réussi à illustrer le potentiel d'utilisation de granulats non conventionnels dans une optique de développement durable dans une gamme élargie de mortiers à base de sable de dune. Les mortiers obtenus présentent des performances mécaniques très élevées, allant jusqu'à une résistance en compression de 22 MPa, une résistance en traction par flexion de 0.8 MPa. Ils présentent aussi un très bon comportement vis à vis de la carbonatation, ainsi que d'excellents indicateurs de durabilité. Les résultats montrent que l'adhérence dépend à la fois du type et de la quantité de déchets utilisé et de l'environnement de cure de la réparation. Elle est optimale à partir 30% de déchets et la contrainte d'adhérence des mortiers contenant de déchets céramiques est plus élevée que celle des mortiers à base de sable de dune.

Mots clé: Sable de dune, Mortiers modifiés par des déchets céramiques, performance, comportement mécanique, durabilité, adhésion.

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	15
Chapitre I Etude bibliographique	19
I.1 Introduction.....	19
I.2 Les déchets céramiques.....	20
I.2.1. Introduction	20
I.2.2. Les briques, tuiles et céramiques	21
I.2.3. Réaction pouzzolanique des céramiques	23
I.2.4. Incorporation de granulats recyclés dans les mortiers et les bétons	24
I.2.5. Influence de l'incorporation des déchets céramiques sur les caractéristiques des matériaux cimentaires	25
I.2.5.1. Propriétés physiques et utilisation des matériaux céramiques	25
I.2.5.2. Propriétés à l'état frais	30
I.2.5.3. Propriétés générales à l'état durci	32
I.2.5.4. Influence sur la durabilité	36
I.2.5.5. Porosité ouverte et absorption d'eau par capillarité des mortiers durcis	37
I.2.6. Interface substrats - mortier	42
I.2.6.1 L'adhérence entre les substrats et les mortiers	42
I.7 Sable de dune	46
I.7.1 Définition	46
I.7.2. Effet des constituants sur les propriétés d'un Béton à base de sable de dune	46
I.8 Conclusion.....	48
Chapitre II Caractérisation des matériaux utilisé	50
II.1 Introduction	50
II.2 Méthodes et essais de caractérisations physico-chimiques	50
II.2.1 Analyse granulométrique des granulats	50
II.2.2 Propreté	51
II.2.3 Coefficient d'absorption d'eau	51
II.2.4 Masse volumique	51
II.2.5 Détermination des phases cristallines par diffraction aux rayons X.....	52
II.2.6 Analyse chimique par Fluorescence aux rayons X.....	53

II.2.7	Microscopie électronique à balayage « MEB »	53
II.2.8	Analyse thermogravimétrique « ATG »	53
II.3	Résultats de caractérisation des matériaux utilisés	54
II.3.1	Analyse granulométrique	54
II.3.2	Valeur au bleu de méthylène (VBS)	55
II.3.3	Composition chimique et minéralogique.....	56
II.3.4	Ciment	57
II.3.5.	Eau	58
II.3.6.	Conclusion	58
Chapitre III: Formulation des mélanges et propriétés du mortier frais.....		60
III.1.	Introduction	60
III.2.	Choix des paramètres.....	60
III.3.	Formulation des mélanges	60
III.3.1.	Préparation des mélanges	61
III.4	Méthodes expérimentales.....	63
III. 4.1	Essais réalisés	63
III.5	Caractérisation à l'état frais	64
III.5.1	Essais de maniabilité	64
III.5.2	Mesure de la masse volumique à l'état frais.....	66
III.6.	Conclusion.....	67
Chapitre IV: Propriétés du mortier durci.....		69
IV.1	Introduction	69
IV.2	Méthodes expérimentales.....	69
IV.2.1	Essais réalisés	69
IV.2.1.1	Mesure de la masse volumique à l'état durci.....	69
IV.2.1.2	Essais de caractérisation mécanique	69
IV.2.1.2.1	Essais de traction par flexion et compression	69
IV.2.1.2.2	Module de déformation dynamique E_{dyn}	70
IV.2.1.3	Durabilité	71
IV.2.1.3.1	Introduction.....	71
IV.2.1.3.2:	La porosité	71
IV.2.1.3.3	Absorption d'eau par capillarité.....	73
IV.2.1.3.4	La Carbonatation	74

IV.2.1.3.4.1	Méthodes de caractérisation expérimentale de la carbonatation accélérée – Diffusion de CO ₂	74
IV.2.1.3.4.2	Détection par pulvérisation à la phénolphthaléine.....	75
IV.2.1.3.5	Durabilité vis à vis à l'action des acides: Attaque par les acides	76
IV.3	Etude des propriétés d'adhérence des mortiers.....	77
IV.3.1	Généralités	77
IV.3.2	Conditions expérimentales du test d'adhérence	78
IV.3.2.1	Test d'adhérence par flexion trois points	78
IV.3.2.2	Paramètres étudiés.....	79
IV.3.2.3	Contrainte d'adhérence et Modes de rupture.....	79
IV.4	Résultats et discussions	80
IV.4.1	Masse volumique des mortiers durci.....	80
IV.4.2	Résistances mécaniques.....	80
IV.4.2.1	Résistance à la compression	81
IV.4.2.1.1	Mortiers conservés dans l'eau	81
IV.4.2.1.2	Mortiers conservés à l'air libre	82
IV.4.2.1.3	Mortiers conservés au climat chaud.....	82
IV.4.2.2	Résistance à la flexion.....	83
IV.4.2.2.1	Mortiers conservés dans l'eau	83
IV.4.2.2.2	Mortiers conservés à l'air libre	84
IV.4.2.2.3	Mortiers conservés au climat chaud.....	85
IV.4.2.3	Discussions.....	86
IV.4.2.4	Gains de la résistance.....	87
IV.4.2.5	Module de déformation dynamique	88
IV.4.3	Durabilité.....	89
IV.4.3.1	Absorption d'eau par capillarité	89
IV.4.3.2	Porosité ouverte.....	91
IV.4.3.3	Microstructure.....	91
IV.4.3.4	Carbonatation accélérée.....	93
IV.4.3.5	Analyse thermogravimétrique.....	95
IV.4.3.6	Durabilité vis à vis de l'action des acides	98
IV.4.3.7	Étude des propriétés d'adhérence des mortiers	100
IV.4.3.7.1	Conditions expérimentales du test d'adhérence.....	100
IV.4.3.7.2	Influence des déchets céramiques et de l'état de surface sur l'adhérence.....	101

IV.4.3.7.3 Influence de la rugosité de la surface du support sur l'adhérence	104
IV.5 Conclusion.....	105
Conclusion générale.....	109
Références bibliographiques	111

Liste des figures

Figure I.1: Microphotographie en MEB d'une céramique	22
Figure I.2: Classification des déchets céramiques par type et procédé de fabrication.....	23
Figure I.3: Diagrammes XRD des tuiles T, E et N en poudre q: quartz, a:anorthite, h:hématite, illite et s: spinelle). (I) tuiles non émaillées, (E) vitrées naturelles et (N) noires	24
Figure I.4: Densité apparente du sable et des déchets sanitaires.....	26
Figure I.5: Densité apparente moyenne du béton frais.....	27
Figure I.6: Masse volumique apparente du mortier frais pour les différents taux de remplacement étudiés	27
Figure I.7: L'effet de remplacement des déchets céramiques comme agrégats fins sur la densité des mortiers et des bétons	28
Figure I.8: Comparaison de la densité apparente des mortiers testés avec ceux de Silva et al. 2010, Braga et al. 2012 et Oliveira et al. 2013	29
Figure I.9: L'effet du remplacement des déchets céramiques en tant qu'agrégats grossiers sur l'ouvrabilité du béton	31
Figure I.10: L'effet du remplacement des déchets céramiques comme agrégats fins sur la maniabilité du mortier avec et sans FA	31
Figure I.11: Maniabilité relative des mortiers sans FA (cendres volantes).....	32
Figure I.12: Module d'élasticité dynamique des mortiers testés	33
Figure I.13: L'effet des déchets céramiques en tant qu'agrégats grossiers sur la résistance à la compression relative du béton	34
Figure I.14: Résistance à la flexion des mortiers	35
Figure I.15: Résistance à la compression des mortiers	35
Figure I.17: Absorption d'eau des bétons avec de la poudre céramique (Béton de référence, Béton CB avec poudre de brique céramique, Béton WSTF avec poudre céramiques en grès bicusson, Béton SW avec céramique en poudre de sanitaires, Béton WSOF avec poudre de céramique en grès.....	37
Figure I.18: Relation entre le rapport eau-ciment et l'absorption d'eau	38
Figure I.19: Absorption d'eau par capillarité des mortiers testés	38
Figure I.20: Porosité ouverte des mortiers avec céramique sanitaire testé	38
Figure I.21: Absorption d'eau due à l'action capillaire du mortier durci pour les différents rapports d'incorporation étudiés (brique)	39

Figure I.22: Chlorure ion coefficient de pénétration des bétons avec de la poudre de céramique	40
Figure I.23: Résistance à la compression des bétons avec poudre céramique: Avant et après le test de durabilité	40
Figure I.24: Résistance à l'acide de différents types de bétons lorsqu'il est immergé dans l'acide sulfurique	41
Figure I.25: Résistance à l'acide de différents types de béton lorsqu'il est immergé dans l'acide chlorhydrique	41
Figure I.26: (a) Cube avant l'immersion dans l'acide, (b) Cube après immersion dans H ₂ SO ₄ (c) Cubes après immersion dans HCl	42
Figure I.27: Comparaison de l'adhérence du substrat des mortiers testés avec ceux de Silva et al., Braga et al. et Oliveira et al	43
Figure I.28: Profondeur de pénétration et taux de carbonatation par rapport au taux de remplacement des granulats recyclés	44
Figure I.29: Taux de pénétration en fonction du volume (%) de pores > 0,067 μm	45
Figure II.1: Diffractomètre « X'PERT PRO MPD » de Philips	52
Figure II.2: Vue d'ensemble et schéma de la SHIMADZU TGA-51	54
Figure II.3: Analyse granulométrique des matériaux utilisés	54
Figure II.4: Propreté des sables étudiés	56
Figure II.5: Diagramme DRX des matériaux	57
Figure III.1: Malaxeur normalisé pour pâte et mortier	62
Figure III.2: Appareil à chocs	63
Figure III.3: Essais sur la consistance du mortier.....	65
Figure III.4: Principe de fonctionnement du maniabilimètre	65
Figure III.5: Variation de l'écoulement en fonction du taux de substitution	66
Figure III.6: Masse volumique des mortiers à l'état frais.....	67
Figure IV.1: Appareil Controls essai de résistance à la flexion	70
Figure IV.2: Appareil Controls essai de résistance de compression	70
Figure IV.3: Dispositif de mesure de la capillarité.....	74
Figure IV.4: Schéma de l'enceinte de carbonatation accélérée	75
Figure IV.5: Détection par pulvérisation à la phénolphthaléine.....	76
Figure IV.6: Mortier immergé dans la solution de concentration 5%.....	76
Figure IV.7: Teste d'adhérence des mortiers.....	78
Figure IV.8: Étapes de fabrication des éprouvettes bicomposées	78

Figure IV.9: État de surface du support	79
Figure IV. 10: Masse volumique des mortiers durcis	80
Figure IV.11: Influence de la teneur en céramique sur la résistance en compression des différents mortiers Ms (conservés dans l'eau)	81
Figure IV.12: Influence de la teneur en céramique sur la résistance en compression des différents mortiers M _f (conservés dans l'eau)	81
Figure IV.13: Influence de la teneur en céramique sur la résistance en compression des différents mortiers Ms(conservés à l'air libre)	82
Figure IV.14: Influence de la teneur en céramique sur la résistance en compression des différents mortiers M _f (conservés à l'air libre)	82
Figure IV.15: Influence de la teneur en céramique sur la résistance en compression des différents mortiers Ms(conservés au climat chaud)	83
Figure IV.16: Influence de la teneur en céramique sur la résistance en compression des différents mortiers M _f (conservés au climat chaud)	83
Figure IV.17: Influence de la teneur en céramique sur la résistance à la flexion des différents mortiers M _s (conservés dans l'eau)	84
Figure IV.18: Influence de la teneur en céramique sur la résistance à la flexion des différents mortiers M _f (conservés dans l'eau)	84
Figure IV.19: Influence de la teneur en céramique sur la résistance à la flexion des différents mortiers M _s (conservé à l'air libre)	84
Figure IV.20: Influence de la teneur en céramique sur la résistance à la flexion des différents mortiers M _f (conservé à l'air libre)	84
Figure IV.21: Influence de la teneur en céramique sur la résistance à la flexion des différents mortiers M _s (conservé au climat chaud)	85
Figure IV.22: Influence de la teneur en céramique sur la résistance à la flexion des différents mortiers M _f (conservé au climat chaud)	85
Figure IV.23: Variation de la résistance à la flexion / compression en fonction de taux de substitution(conservation dans l'eau)	87
Figure IV.24: Variation de la résistance à la flexion / compression en fonction de taux de substitution (conservation au climat chaud)	87
Figure IV.25: Variation de la résistance à la flexion / compression en fonction de taux de substitution(conservation à l'air libre)	88
Figure IV.26: Module d'élasticité dynamique des mortiers	89
Figure IV.27: L'absorption capillaire des mortiers	90

Figure IV.28: Courbe absorption d'eau des mortiers-céramique blanc.....	90
Figure IV.29: Courbe absorption d'eau des mortiers-rouge	90
Figure IV.30: Porosité des mortiers en fonction des déchets incorporés	91
Figure IV.31: Photographies par microscope optique des échantillons	92
Figure IV.32: Vue globale de la microstructure des différents mortiers étudiés	92
Figure IV.33: Morphologie des surfaces des mortiers	92
Figure IV.34: Spectre de diffraction des rayons X des mortiers	93
Figure IV.35: Profondeur de carbonatation du mortier après 28 jours	94
Figure IV.36: Aspect visuel des échantillons exposés à la carbonatation naturelle pendant 28 jours	94
Figure IV.37: Analyses ATG et DTG des mortiers (M_s)	95
Figure IV.38: Analyses ATG et DTG des mortiers (M_F)	96
Figure IV.39: Analyses ATG et DTG de mortier (M_D)	96
Figure IV.40: Les fractions massiques de portlandite et de carbonate de calcium dans tous les mortiers.....	97
Figure IV.41: Etat et variation de perte de masse en fonction de la période d'immersion(HCl) ..	98
Figure IV.42: Etat et variation de perte de masse en fonction de la période d'immersion(HCl) ..	98
Figure IV.43: Etat et variation de perte de masse en fonction de la période d'immersion (H_2SO_4)	99
Figure IV.44: Etat et variation de perte de masse en fonction de la période d'immersion (H_2SO_4)	99
Figure IV.45: Adhérence des mortiers (M_F) après 28 jours dans les différents milieux.....	102
Figure IV.46: Adhérence des mortiers (M_s) après 28 jours dans les différents milieux.....	102
Figure IV.47: Evolution de l'adhérence des mortiers coulés sur une surface rugueuse.....	104
Figure IV.48: Mode de rupture des mortiers.....	104

Liste des tableaux

Tableau. I.1: Propriétés physiques et mécaniques des mélanges de béton	30
Tableau. I.2: Résistance à la compression et module d'élasticité.....	33
Tableau. I.3: Résultats de la détermination du module d'élasticité.....	34
Tableau. I.4: Résultats (moyenne \pm écart-type) des essais sur béton durci: résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité.....	36
Tableau. I.5 : Résultats du test de résistance à l'adhérence	43
Tableau. II.1 : Propriétés physiques des matériaux	55
Tableau. II.2 : Valeurs au bleu des sables et des déchets céramiques étudiés	56
Tableau. II.3 : Composition chimique des matériaux	56
Tableau. III.1: Composition des mortiers.....	61
Tableau. III.2: Opérations de malaxage du mortier normal	62
Tableau. IV.1: Définition des différents types de porosité d'un matériau	72

Liste des abréviations

- C-S-H: Silicates de calcium hydratés
DRX: Diffraction des rayons X
MEB: Microscopie électronique à balayage
ATG: Analyse thermogravimétrique
ATD: Analyse thermique différentielle
VBS: Valeur au bleu de méthylène
E/C: Rapport eau/ciment
C/S: Rapport céramique/sable
SD: Sable de dune
SA: Sable alluvionnaire
CF: Céramique faïence
CS: Céramique sanitaire
M_A: Mortier à base de sable alluvionnaire.
M_S: Mortier avec déchets céramique sanitaire (CS).
M_F: Mortier avec déchets céramique faïence (CF).
M_D: Mortier à base de sable de dune
 ρ : Masse volumique apparente
R_f: Résistance à la flexion
R_c: Résistance à la compression
Edyn: Module de déformation dynamique
P : Porosité
E/L_{equiv} : Rapport eau/liant
C_a: Coefficient d'absorption capillaire

Introduction Générale

INTRODUCTION

La protection de l'environnement et l'économie des ressources naturelles sont devenues un enjeu socio-économique majeur. Devant les besoins croissants des ressources en matériaux et les exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et de sous-produits industriels notamment dans le domaine de génie civil.

La gestion des déchets solides est une des principales préoccupations environnementales dans le monde. Avec la rareté de l'espace de décharge et en raison de son coût de plus en plus élevé, l'utilisation des déchets est devenue une alternative intéressante pour leur élimination. Cette recherche est menée sur l'utilisation des déchets de produits dans le béton. Ces produits comprennent, d'une façon générale, le béton de démolition, les usagers pneus, plastique, verre, acier, sable de fonderie brûlée, charbon, sous-produits de combustion et déchets de brique et de marbre. Chacun de ces déchets a un effet spécifique sur les propriétés du béton frais et durci. Cette utilisation est non seulement économique, mais elle aide aussi à réduire les problèmes d'élimination; la réutilisation des déchets encombrants est considérée comme la meilleure alternative environnementale pour résoudre le problème de l'élimination. [N.Bourmatte. 2013]

Les matrices cimentaires confectionnées avec une addition ont fait l'objet de nombreuses études. Toutefois aucune règle générale n'a été dégagée pour quantifier les effets de telles additions, vis-à-vis des performances des mortiers, à cause de la difficulté de mélanger des matériaux différents et de l'incompatibilité qui peut exister entre eux.

Par ailleurs, le mélange de matériaux compatibles ne conduit pas toujours aux mêmes résultats; des interactions pouvaient exister entre les différents types de matériaux. Ces interactions peuvent se manifester par des synergismes ou des antagonismes entre les constituants, elles sont difficiles à détecter [A. Benaissa. 1992].

Le mortier à base de sable dune a une résistance à la compression relativement faible et une résistance à la traction très faible. Pour cette raison, il est généralement renforcé avec des matériaux (souvent fibres métalliques, pouzolaniques, du marbre fin, etc.). Face à l'augmentation des besoins en ressources matériaux et des exigences de la conservation environnementale et au développement durable, il devient nécessaire et pertinent de prospecter et d'explorer toutes les possibilités de réutiliser et de récupérer les déchets et les produits industriels, particulièrement dans le domaine du génie civil.

L'incorporation des déchets céramiques est une technique importante pour améliorer les propriétés du béton et du mortier telle que la fluidité, la résistance et la durabilité, etc. Ces additions affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires (directement reliée avec le développement de la résistance) et la durabilité des matériaux durcis.

L'étude effectuée s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et des déchets céramiques. L'incorporation des déchets céramiques, sous forme de substitution de 10% à 50% du poids de sable de dune, aux mortiers à base de sable de dunes permet d'obtenir une nouvelle variété de mortier composé ayant des performances physico-chimiques et mécaniques, tant à l'état frais que durci, supérieures à celles du mortier à base de sable de dune seul ce qui permet d'éliminer les déchets par recyclage et réutilisation afin de protéger l'environnement et d'aider à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats particulièrement l'utilisation des granulats alluvionnaires (disponibilité, coût...).

L'objectif de ce travail est de faire d'une part, une étude sur le comportement mécanique du mortier à court terme et de mettre en évidence l'influence de l'environnement, le taux d'incorporation des déchets et le type des déchets céramique sur les performances du mortier à base de sable de dune. Ainsi, la durabilité du mortier essentiellement vis-à-vis des agressions chimiques et la carbonatation, et d'autre part, d'étudier l'influence des déchets céramiques présents dans les mortiers à base de sable de dune sur la qualité des réparations de surfaces en béton ou comme mortiers de joints pour la fixation et la liaison de petits éléments de revêtements de sol et de parois intérieures et extérieures. La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierres de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche, notamment sur les propriétés d'adhérence des mortiers modifiés à un support dont la rugosité est utilisée pour appliquer le mortier au cours de réparation et dont l'état de saturation en eau.

Pour présenter les résultats obtenus, le manuscrit est composé de quatre chapitres :

Nous présentons tout d'abord une synthèse bibliographique regroupant le recyclage des déchets céramiques. La première étape a été consacrée à une caractérisation physique minéralogique des déchets céramiques pour mieux connaître le comportement général des deux types de déchets. Nous citons, ensuite, quelques résultats à travers les travaux qui ont été déjà réalisés sur les propriétés des bétons et de mortiers incorporant des granulats en céramique.

Le deuxième chapitre décrit les caractéristiques des matériaux utilisés, les méthodes et les procédures d'essais nécessaires pour la réalisation du programme expérimental dans le cadre de cette thèse.

Le troisième chapitre présente la méthodologie de valorisation des céramiques par la mise au point d'une formulation en laboratoire. nous décrirons plus particulièrement leur composition, leurs propriétés à l'état frais et l'influence du taux de substitution des déchets céramiques sur ces propriétés. Il s'agit d'analyser le remplacement partiel du sable de dune par les déchets céramiques.

Une étude du comportement mécanique et environnemental a été réalisée afin d'évaluer la durabilité du matériau dans le chapitre quatre, il a été nécessaire de réaliser des analyses d'identification microstructurale telles que l'utilisation de la diffraction aux rayons X, la microscopie électronique à balayage (MEB), la microscopie optique, l'analyse thermique différentielle ATD ainsi que l'analyse thermogravimétrique (ATG). Selon les analyses effectuées sur le comportement mécanique de nos matériaux et afin d'améliorer la durabilité de ces composites, on a évalué , d'une part, l'influence de l'ajout des déchets céramiques sur les caractéristiques de ces derniers vis-à-vis des milieux agressifs; et d'une autre part, l'influence de la présence des déchets céramiques sur l'adhérence des mortiers à base de sable de dune à un support dont la rugosité et l'état de saturation en eau varient.

Finalement, ce mémoire s'achève sur une conclusion générale des travaux réalisés et présente les perspectives d'études de ces nouveaux mortiers fabriqués à partir de sable de dune et de déchets céramiques.

CHAPITRE I

Etude Bibliographique

I.1 Introduction

Des contraintes d'ordre écologique et économique imposent de plus en plus la nécessité de remplacement partiel des matériaux classiques utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics par des matériaux locaux de substitution. Dans ce contexte, les granulats issus de produits de démolition, déchets et sous produits industriels (granulats recyclés) présentent un intérêt particulier, car leur valorisation est l'un des moyens qui permet de résoudre une grande partie des problèmes environnementaux: celui du stockage des déchets et simultanément celui de la préservation des gisements de granulats naturels [N.Bourmatte, H.Houari, 2013].

Dans les pays en développement, avec l'accroissement de la population, l'économie et l'environnement sans pollution dans l'industrie de la construction sont d'une importance primordiale pour répondre aux besoins humains inévitables des formes multiples. Ainsi, l'utilisation d'agrégats de déchets dans la production de nouveaux types de béton, qui joue un rôle essentiel dans l'activité de construction, est nécessaire pour répondre à la demande d'agrégats. La plupart des déchets sont générés à partir de déchets industriels et de déchets de démolition.

On s'intéresse à l'utilisation des déchets en tant qu'agrégats alternatifs. Importantes recherches ont été effectuées sur l'utilisation de divers matériaux tels que les déchets de fibre de verre, les déchets de plastique, les déchets de caoutchouc. Les agrégats de déchets peuvent être utilisés ainsi que dans le mortier et le béton. Ces déchets peuvent résoudre quelques problèmes comme le manque d'agrégats dans les chantiers de construction et les problèmes environnementaux. Par conséquent, le recyclage, la réutilisation et la substitution de ces déchets semblent être une solution efficace et la décision la plus appropriée. En substituant les déchets à la préparation du béton ou mortier est un nouveau concept proposé pour la diminution des déchets.

L'incorporation des déchets est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton et mortier telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. Ces déchets affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance et la durabilité des matériaux durcis.

Le sud Algérien dispose des réserves naturelles importantes en sable de dune, caractérisées par une granulométrie fine mais de composition chimique et minéralogique riche en silicium. Les mortiers à base de sable de dune font partie des matériaux de construction permettant de valoriser des ressources naturelles en sable. Afin de les exploiter dans différents domaines de construction, on doit améliorer leurs caractéristiques mécaniques et physiques. la grande teneur

en grains fins qui donne une grande surface spécifique, ce qui conduit à la difficulté d'assurer une bonne enveloppe de pâte de ciment pour les grains de sable. Ceci entraîne l'augmentation du dosage en ciment (non économique), qui dégage beaucoup plus de chaleur d'hydratation et cause des dégâts aux ouvrages massifs. En outre, les grains très fins du sable peuvent abaisser l'activité du ciment, ce qui diminue sensiblement la résistance mécanique du béton. D'autre part à cause de la grande surface spécifique du ciment, l'absorption capillaire augmente, ce qui diminue l'imperméabilité du béton durci et augmente le retrait [Benaïssa A. et al. 1992] .

L'incorporation d'autres matériaux, en particulier industriels, est non seulement meilleure pour l'environnement mais peut également conduire à des améliorations de certaines propriétés. Certaines études montrent le potentiel de différents types d'agrégats de déchets: brique, béton, caoutchouc, verre et plastique, plus précisément PET. Vu leur effet positif sur certains propriétés, on a pensé à utiliser les déchets de céramique comme ajout dans la formulation des mortiers à base de sable de dune afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques (compression, traction, flexion) et voir l'effet de ces paramètres sur la durabilité à long terme.

I.2. Les déchets céramiques

I.2.1 Introduction

Le terme «céramique» (produit en céramique) désigne en règle générale des matériaux inorganiques (pouvant avoir un certain contenu organique), transformés de façon permanente par cuisson. Outre les matériaux à base d'argile, les céramiques englobent aujourd'hui une multitude de produits renfermant une faible proportion d'argile ou totalement exempts d'argile. Les céramiques peuvent être vernissées ou mates, poreuses ou vitrifiées. La cuisson des pâtes céramiques produit une transformation "temps-température" des minéraux qui les constituent, pour donner généralement un mélange de nouveaux minéraux et de phases vitreuses.

Le terme «céramique» s'applique désormais de façon plus large aux solides inorganiques à liaisons iono-covalentes préparés par des techniques similaires. D'un point de vue chimique, les céramiques sont principalement des oxydes (notamment des aluminosilicates pour les céramiques traditionnelles), des nitrures et des carbures.

Les propriétés caractéristiques des céramiques sont leur grande résistance mécanique, leur résistance à l'usure et leur longévité; chimiquement inertes, elles sont non toxiques, résistantes à la chaleur et au feu, et ont généralement des propriétés isolantes et parfois une porosité spécifique.

Les liaisons chimiques de type iono-covalent sont des liaisons fortes qui confèrent une grande énergie de cohésion. Les céramiques ont de ce fait un point de fusion élevé, une grande inertie chimique, elles résistent bien à la corrosion. Ces propriétés leur assurent une durée de vie pratiquement infinie et permettent aussi l'usage de certaines céramiques dans des milieux agressifs même à des températures élevées.

Les déchets de construction et de démolition contribuent le plus fort pourcentage de déchets dans le monde. De plus, les matériaux céramiques, qui comprennent les murs de briques, les carreaux de céramique et tous les autres produits céramiques, contribuent le plus fort pourcentage de déchets [Juan A. et al. 2012]. L'option actuelle d'élimination pour ce type de déchets est la mise en décharge. L'absence de normes, l'évitement des risques, le manque de connaissances et d'expérience ont conduit à l'absence d'utilisation active des déchets de céramique dans la construction.

La valorisation des déchets inertes issus du BTP (bâtiment et travaux publics) l'objectif de la valorisation des déchets inertes est d'optimiser l'utilisation des ressources premières (minéraux dans ce cas). Le concept repose sur la réutilisation des déchets inertes dans les activités de BTP afin de limiter l'extraction de nouvelles ressources vierges. De nombreuses recherches ont été menées dans le monde (Espagne, France, Portugals...) sur l'utilisation des déchets de céramique comme additif dans le béton structural et non structuré. L'étude a également été réalisée en béton comme le béton à haute performance, les bétons ordinaire, le béton résistant aux sulfates et les mortiers. Des résultats positifs ont été obtenus à partir de ces études.

2.2 Les briques, tuiles et céramiques

Les céramiques sont aussi des matériaux inorganiques, composés d'oxydes, de carbures, de nitrures et de borures. Les céramiques présentent des liaisons chimiques fortes de nature ionique ou covalente. Elles sont mises en forme à partir d'une poudre de granulométrie adaptée qui est agglomérée. Dans une deuxième étape la densification et la consolidation de cet agglomérat sont obtenues par un traitement thermique appelé frittage. A la différence des verres les céramiques, en tous cas dans les matériaux les plus anciens, sont constituée de 2 phases distinctes : une phase vitreuse, la matrice (désordonnée) et une phase cristalline dispersée (ordonnée).

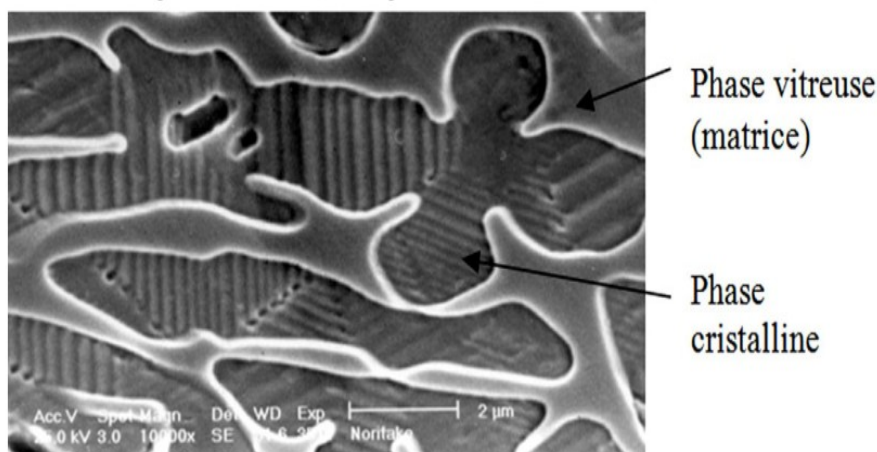


Figure I.1 : Microphotographie en MEB d'une céramique [Symonds, 1999]

L'incorporation de cette phase cristalline dans la matrice vitreuse a permis une amélioration significative de la dureté et de la résistance des céramiques par rapport à celles des verres.

En raison de la robustesse des liaisons chimiques, les céramiques possèdent une grande rigidité et dureté. En contrepartie, les céramiques sont des matériaux fragiles car il est difficile de déformer la structure d'un composé dont les liaisons chimiques sont fortes et dirigées. En conséquence, les céramiques ne possèdent pratiquement aucune plasticité et cassent avant de pouvoir se déformer. Leur mode de fracture est radicalement différent de celui d'un métal ductile. La contrainte en tête de fissure reste toujours très élevée dans une céramique alors que des zones de déformation plastique se forment en avant d'une fissure et s'opposent à sa propagation dans un métal

Les briques, tuile et céramiques ont la possibilité d'être recyclées sous forme de granulats dans les sous-couches des routes, technique la plus commune [Symonds, 1999]. L'association "Tiles and Bricks Europe recense de nombreuse issues pour les matériaux recyclés. Les granulats peuvent se révéler comme substitut pour le remplissage des tranchées de tuyaux in situ. Les granulats les plus fins peuvent remplacer les matériaux naturels tels que le sable. Les briques, tuile et autre céramiques peuvent aussi être utilisés comme granulats pour la production de béton. Finement broyés, ils remplacent d'autres matières telles que du sable. Le broyage des briques rouges et des tuiles peut produire du sable réutilisable sur les terrains de tennis en terre battue [Tiles and Bricks Europe, 2011].

Les déchets céramiques peuvent être séparés en deux catégories en fonction de la source des matières premières. Le premier concerne tous les déchets cuits générés par les usines de céramique structurelle qui n'utilisent que des pâtes rouges pour fabriquer leurs produits, tels que

les briques, les blocs et les tuiles. Le second concerne tous les déchets cuits produits dans la céramique de grès, tels que les murs, les carrelages et les appareils sanitaires. Ces producteurs utilisent des pâtes rouges et blanches, néanmoins, l'utilisation de la pâte blanche est plus fréquente et beaucoup plus élevée en volume. Dans chaque catégorie, les déchets céramiques cuits ont été classés en fonction du processus de production. Cette classification est indiquée dans le diagramme suivant (figure I.1).

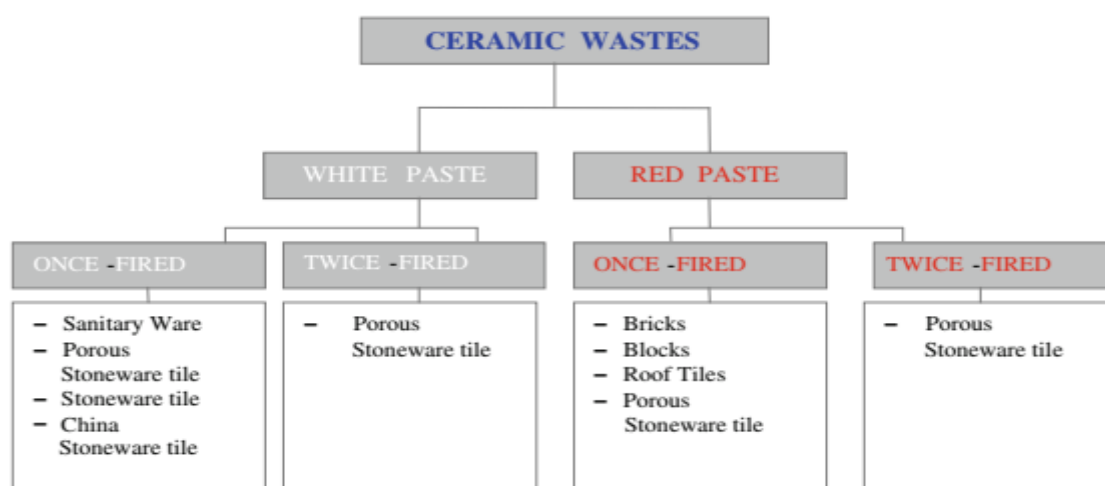


Figure. I. 2: Classification des déchets céramiques par type et procédé de fabrication [P .Fernando; S.Jalali 2010]

I.2.3 Réaction pouzzolanique des céramiques

L'une des solutions alternatives proposées est l'utilisation de ces déchets comme pouzzolanes dans le domaine de construction [B. Ahmadi, W. Al-Khaja, 2001]. Afin de conserver les ressources naturelles, il s'avère intéressant de se soucier de certaines additions présentant des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire une attitude à fixer la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) issue de l'hydratation du ciment en formant, à la température ambiante, des composés ayant des propriétés liante [Franck C., 2007]. Comme exemple de ces additions minérales, nous citons les argiles de type kaolin, illite et montmorillonite sous forme de déchets de brique, déchets de céramique, etc. Les pouzzolanes, selon la norme [ASTM C125, 2007], sont des matériaux siliceux et alumineux dépourvus de propriétés hydrauliques propres mais qui peuvent réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés possédant des propriétés cimentaires. Ces pouzzolanes peuvent être d'origine naturelle ou obtenues à partir de sous-produits industriels. L'un des objectifs de ce travail est d'élaborer une nouvelle pouzzolane artificielle à partir d'une boue industrielle provenant d'une industrie de fabrication des produits céramiques (sanitaires et faïences).

La réaction pouzzolanique est une réaction de dissolution-précipitation en milieu aqueux entre l'hydroxyde de calcium (portlandite) et un matériau pouzzolanique. Les produits néoformés qui résultent de ces réactions sont similaires aux silicates de calcium hydratés (C-S-H) formés lors de l'hydratation du ciment. Ils conduisent de ce fait à une densification de la matrice cimentaire.

Plusieurs chercheurs ont déjà confirmé la réactivité pouzzolanique des déchets céramiques. Diverses études faites sur l'analyse des différents produits céramiques confirment que les déchets de céramique calcinés autour de 950 ° C et broyées à une finesse appropriée peuvent être très efficaces comme les pouzzolanes. L'activation a été discutée sur la base des changements cristallographiques produits lors de la cuisson. La calcination provoque une perturbation suffisante de la structure cristalline des constituants argileux pour provoquer l'amélioration de la réaction avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La consommation de portlandite a été observée après 28 jours d'hydratation par mesures DRX [Lavati A., 2009, Puertas F. et al. 2008].

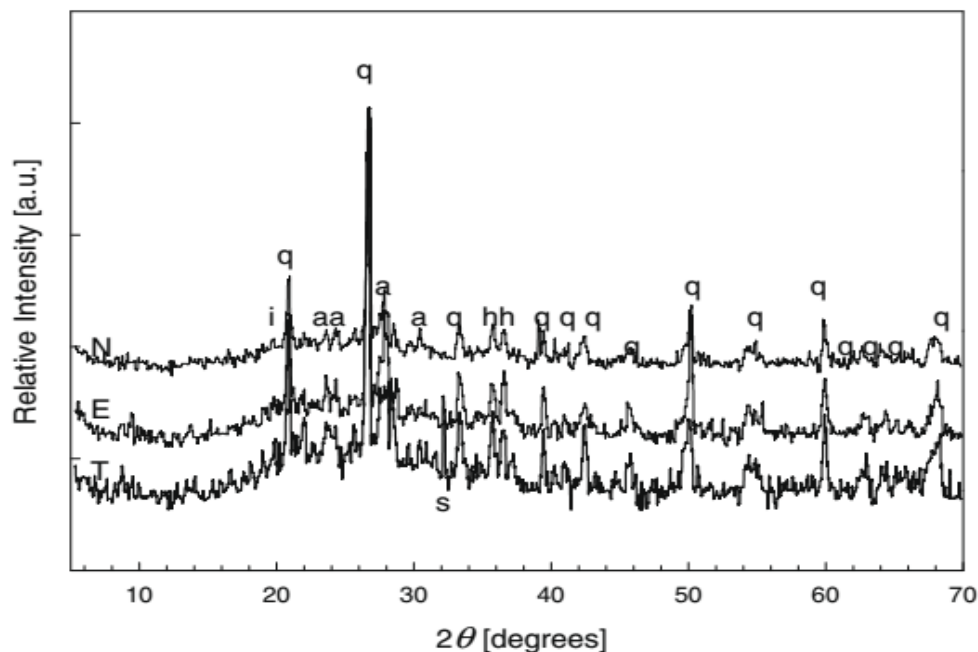


Figure I.3: Diagrammes XRD des tuiles T, E et N en poudre q: quartz, a: anorthite, h: hématite, i: illite et s: spinelle). (T) tuiles non émaillées, (E) vitrées naturelles et (N) noires [Puertas F. et al. 2008].

I.2.4 Incorporation de granulats recyclés dans les mortiers et les bétons

Les granulats recyclés sont incorporés dans la formulation de béton en remplacement des granulats naturels dans des proportions variant de 0 à 100 %. Des bétons témoins sont toujours fabriqués pour établir un point de comparaison. Ainsi, les approches pour formuler un béton

sont nombreuses, chacun fixant les paramètres utiles pour comparer et observer l'effet des granulats recyclés sur le comportement physique des bétons. Certains choisissent de travailler à ouvrabilité constante [Debieb, Farid et al. 2010, Levy S.M. Helene P. 2004], tandis que d'autres auteurs s'intéressent aux temps de malaxage, au degré d'humidité des granulats recyclés et à la quantité d'eau globale et effective à mettre en œuvre [Gomez-Soberon J. 2002]. Pour certaines études le remplacement est massique ou volumique sans modifier les autres paramètres de composition (quantité de ciment, rapport E/C, etc) [Olorunsogo F.T., Padayachee, N. 2002]. Enfin, certains chercheurs travaillent avec une méthode de mortier équivalent. Dans cette méthode, on considère que la matrice cimentaire présente dans les granulats recyclés rentre en ligne de compte dans la matrice cimentaire du nouveau béton [Abbas A. Carcassès M. Ollivier J.P 2009].

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires. Cependant, une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton qui respecte le cahier des charges [Serifou Mamery, 2013].

I.2.5 Influence de l'incorporation des déchets céramiques sur les caractéristiques des matériaux cimentaires

I.2.5.1 Propriétés physiques et utilisation des matériaux céramiques

Les céramiques peuvent être définies comme des solides inorganiques, non métalliques, résistants à la chaleur, constitués de composés formés à partir d'éléments métalliques et non métalliques [Mohd Mustafa et al. 2006, Correia, J.R. et al. 2006, Senthamarai, R.M. and Devadas M. 2005]. Bien que, différents types de céramiques peuvent avoir des propriétés différentes, en général, la céramique est résistante à la corrosion et dure mais fragile. La plupart des céramiques sont de bons isolateurs, il peut supporter des températures élevées et avoir une structure cristalline. Ces propriétés ont conduit à leur utilisation dans pratiquement tous les aspects de la vie moderne.

Les déchets de céramique sont générés en deux catégories différentes selon la disponibilité des matières premières. Le premier est développé par les usines de céramique structurelle, dans cette seule pâte rouge est censé utiliser dans la fabrication de leurs produits tels que les briques et les tuiles. La deuxième est produite à partir de céramique de grès tels que carreaux de mur, carreaux de sol et articles sanitaires. Utilisation de produits céramiques usés dans le béton

Composition a réduit le coût de production du béton [Vieira J.P.B. et al. 2011, Silva J, de Brito J, Veiga R. 2009, Cabral, A.E.B. et al. 2009].

La plupart des céramiques sont dures, chimiquement inertes et réfractaires et ces propriétés rendent la céramique attrayante pour de nombreuses applications. Les céramiques sont utilisées comme réfractaires dans les fours et comme matériaux de construction durables comme les briques, les tuiles, les blocs de cendres et d'autres solides et durs. Plusieurs recherches ont montré que pour les mortiers formulés à partir de granulats recyclés des déchets céramique sanitaire, la valeur est clairement inférieure (aux alentours de 1084kg/m^3) et ce quel que soit la dimension des agrégats recyclés utilisé [Lucas, J. de Brito et al. 2016, J. Silva et al. 2010, C. Neno et al. 2014, P. Penacho et al. 2014].

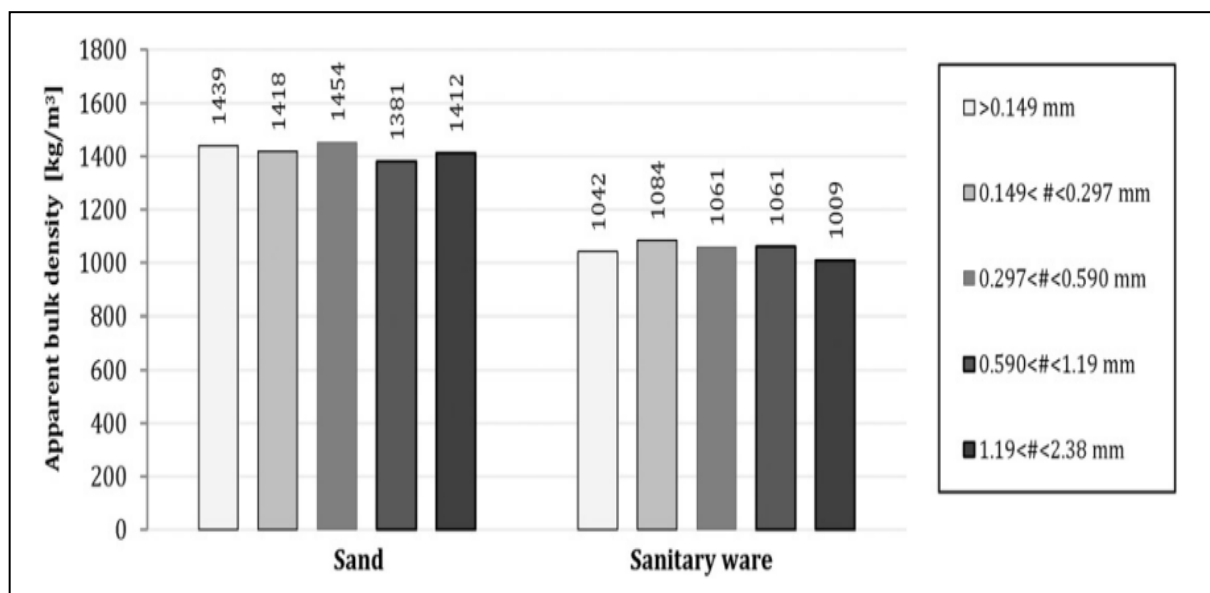


Figure I.4: Densité apparente du sable et des déchets sanitaires [Lucas, J. de Brito et al. 2016].

C. Medina et al. 2012 ont étudié la réutilisation des déchets de céramique dans le béton recyclé et la densité de l'échantillon sec de gravier et de déchets de céramique était respectivement de $2,63$ et $2,39\text{ kg/m}^3$. Densité de matières recyclées. Le béton a été sensiblement réduit avec la substitution des déchets de céramique dans la production de béton. La réduction de densité a été montrée linéairement avec le facteur de corrélation de $0,9143$.

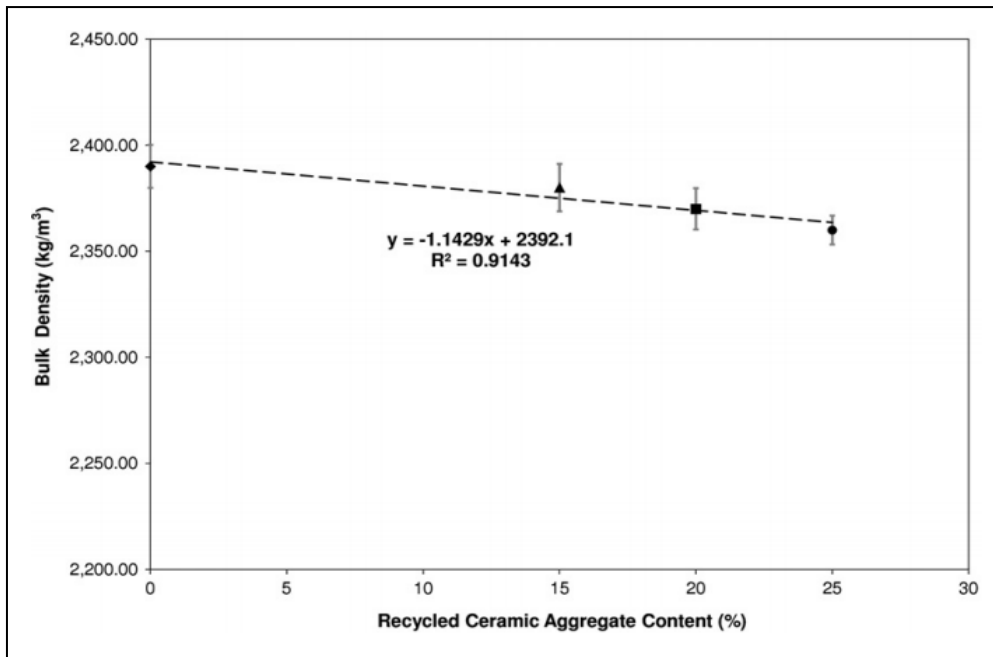


Figure I.5: Densité apparente moyenne du béton frais [C. Medina et al. 2012].

J. Silva et al. 2010 ont étudié la viabilité de l'amélioration de la performance des mortiers de ciment par l'addition d'agrégats très fins de céramique d'argile broyée. Il est conclu que la densité apparente diminue de façon significative proportionnellement au pourcentage d'amendes incorporées. Cela semble être dû essentiellement à la plus faible densité des fines de déchets de briques par rapport au sable (mesuré pendant Campagne expérimentale).

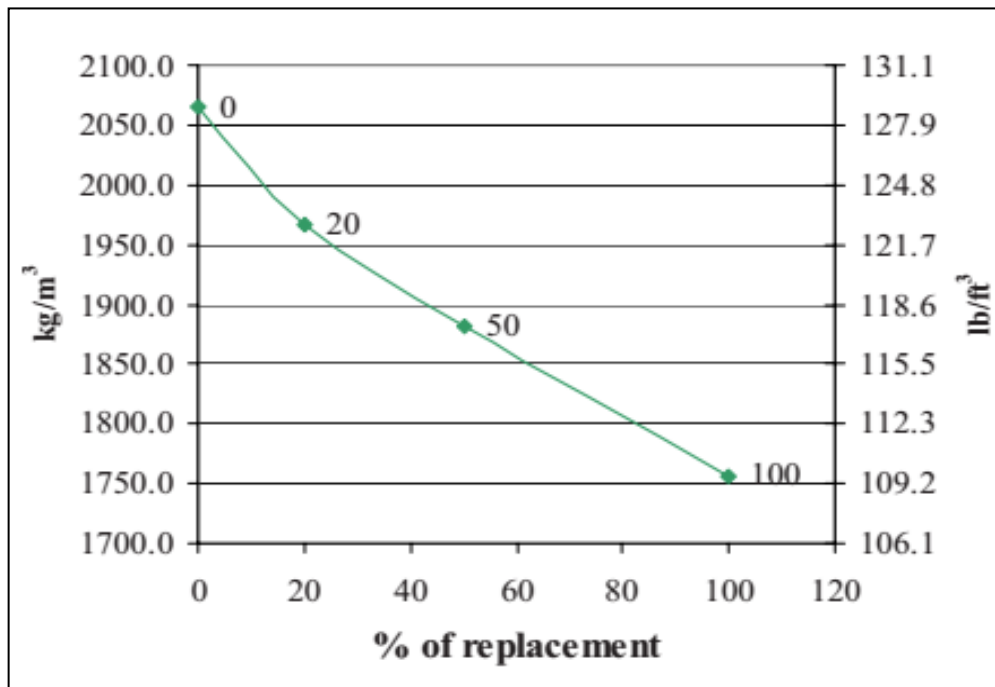


Figure I.6: Masse volumique apparente du mortier frais pour les différents taux de remplacement étudiés [J. Silva et al. 2010].

Cabral et al. 2010 ont constaté que la densité apparente de béton naturel, de béton recyclé, de mortier recyclé et de céramique de briques recyclées était respectivement de 1,44, 1,54, 1,44 et 1,46 kg/m³. Les valeurs les plus faibles ont été obtenus avec le remplacement de l'agrégat grossier naturel par la céramique de brique grossière en raison de sa gravité spécifique.

Pincha T. et Arnon Ch. 2010 ont étudié l'utilisation de déchets de céramique comme agrégats fins dans la composition du béton. La densité du béton avec 100% d'agrégats de déchets de céramique (CWA) était de 2,31 g / cm³, ce qui était inférieur de 0,07 g/cm³ au béton contrôlé. Ces résultats sont obtenus en raison de la faible densité de CWA.

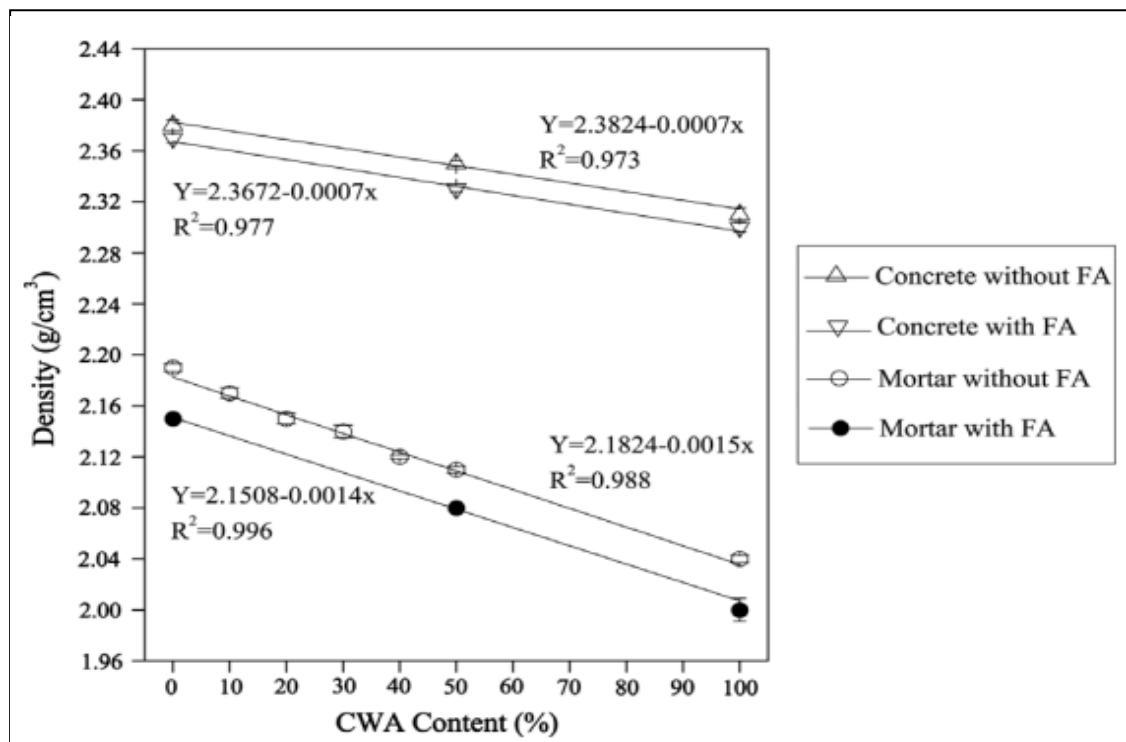


Figure I.7: L'effet de remplacement des déchets céramiques comme agrégats fins sur la densité des mortiers et des bétons [Pincha T. et Arnon Ch. 2010].

Paulo Cachim 2009 a étudié le béton produit avec des briques concassées comme agrégats dans la nouvelle construction du béton. L'agrégat recyclé a été collecté à partir des déchets industriels en céramique. Les résultats ont clairement montré que la densité du béton recyclé était inférieure à celle du béton naturel, en raison de la densité plus faible des agrégats de briques concassées.

Bazaz et al. 2006 ont rapporté les performances du béton préparé avec des briques concassées sous forme d'agrégats grossiers et d'agrégats fins. Le pourcentage de céramiques dans les déchets collectés était de 9 %. La densité sèche de la brique concassée et de l'agrégat naturel était

respectivement de $950-1050 \text{ g/cm}^3$ et $1500-1700 \text{ g/cm}^3$, ce qui influence les propriétés mécaniques du béton.

Marcio et al. 2004 ont expérimenté sur le stress compressé, l'absorption d'eau et le module d'élasticité du béton réalisé avec des agrégats recyclés. Des blocs de céramique écrasés ont été utilisés comme agrégats grossiers recyclés dans la fabrication du béton. La densité spécifique de l'agrégat était de 2630 à 2310 kg/m^3 pour un remplacement de 0 à 100% . Jusqu'au remplacement de 20% , la résistance à la compression et le module d'élasticité étaient équivalents au béton conventionnel.

Padmini et al. 2001 ont étudié le comportement du béton avec des briques de faible densité comme un agrégat grossier léger. La densité sèche des spécimens de béton était inférieure de 7 à 9% au béton contrôlé. La densité du béton durci diminue en raison de la teneur en eau d'évaporation dans les granulats de briques.

En effet, [C.Farinha et al. 2015] ont travaillé avec trois différents pourcentages de remplacement des agrégats par trois différents pourcentages des déchets céramiques. Ces auteurs ont conclu que quelque soit le pourcentage de déchets utilisé, la densité des mortiers sont augmente avec la croissance de la teneur du céramique dans les mortiers (figure I.8). Même tendance pour les travaux de Braga et al. [35]. Les auteurs expliquent ce phénomène par le verre qui devait réagir avec la chaux pour former des silicates de calcium hydratés avec de faibles rapport C/S qui retiennent les alcalins.

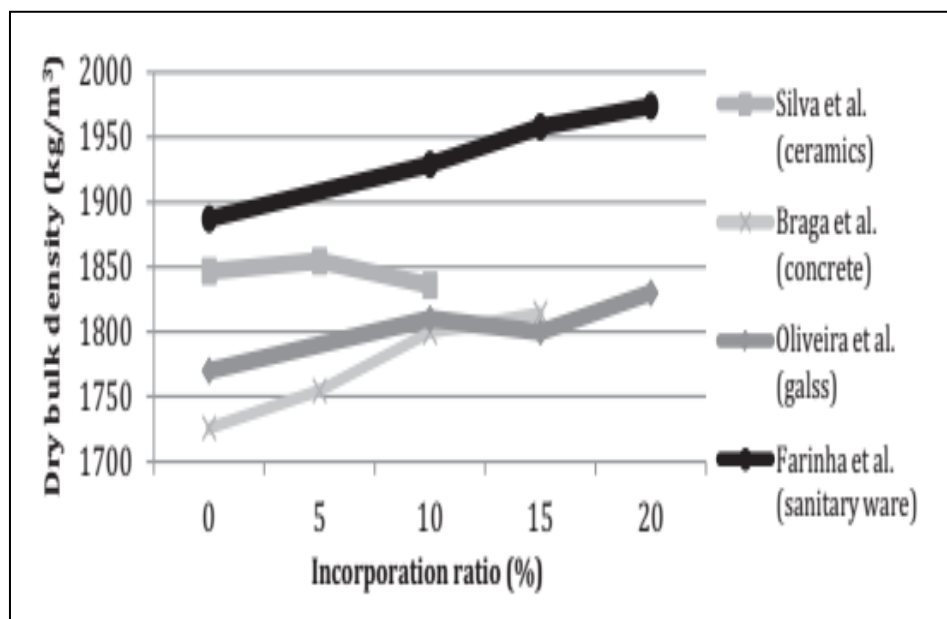


Figure I.8: Comparaison de la densité apparente des mortiers testés avec ceux de [Silva et al. 2010, Braga et al. 2012 et Oliveira et al. 2013].

I.2.5.2 Propriétés à l'état frais

Les mortiers et le béton contenant du ciment, sable de dune et des déchets céramiques blancs (sanitaire) sont plus visqueux que des mortiers ou bétons contenant uniquement du ciment et sable de dune lorsqu'ils sont formulés avec un rapport eau/liant identique. Par contre, l'utilisation de gros granulats recyclés de briques donne une ouvrabilité toujours plus faible que le mélange correspondant avec des agrégats naturels. Ce résultat est attribué à la surface rugueuse des granulats recyclés [Braga et al. 2012].

La maniabilité du mortier est une combinaison de propriétés qui déterminent la facilité et l'efficacité de l'utilisation en maçonnerie [Hendrickx R. 2009]. La maniabilité s'améliore avec l'incorporation de matériaux fins tels que la céramique rouge [Silva J. et al. 2009], le béton [Khatib JM.2005] et le verre [Oliveira et al. 2013], en pourcentages maximum de 10%, 15% et 20% respectivement. Ainsi, l'eau nécessaire pour maintenir la consistance est plus faible. En effet, les fines, dues à un effet de remplissage, remplissent les vides entre les agrégats de sable, en diminuant la quantité d'eau nécessaire pour hydrater et lubrifier les agrégats.

RM. Senthamarai et al. 2011 ont obtenu des valeurs d'affaissement plus élevées pour les mélanges de béton avec le remplacement complet d'agrégats naturels par des agrégats de céramique sanitaire recyclés. Les auteurs ont déclaré que ce résultat est dû à la faible absorption d'eau et à la texture lisse des agrégats céramiques.

Tableau I.1: Propriétés physiques et mécaniques des mélanges de béton [RM. Senthamarai et al. 2011]

Concrete mix	Water-cement ratio w/c	Slump (mm)	Bulk density (kg/m ³)
Ceramic electrical insulator waste coarse aggregate concrete	0.35	13	2281
	0.4	24	2258
	0.45	45	2240
	0.5	64	2230
	0.55	99	2220
	0.6	155	2215
Conventional concrete	0.35	10	2480
	0.4	18	2438
	0.45	35	2415
	0.5	48	2404
	0.55	80	2395
	0.6	148	2383

La réduction linéaire de la maniabilité a été observée par un coefficient de 0,9878, ce qui a été observé au cours de l'expérimentation en raison de l'absorption d'eau, de la forme, de la texture et de la porosité des agrégats recyclés en céramique [C. Medina et al. 2012].

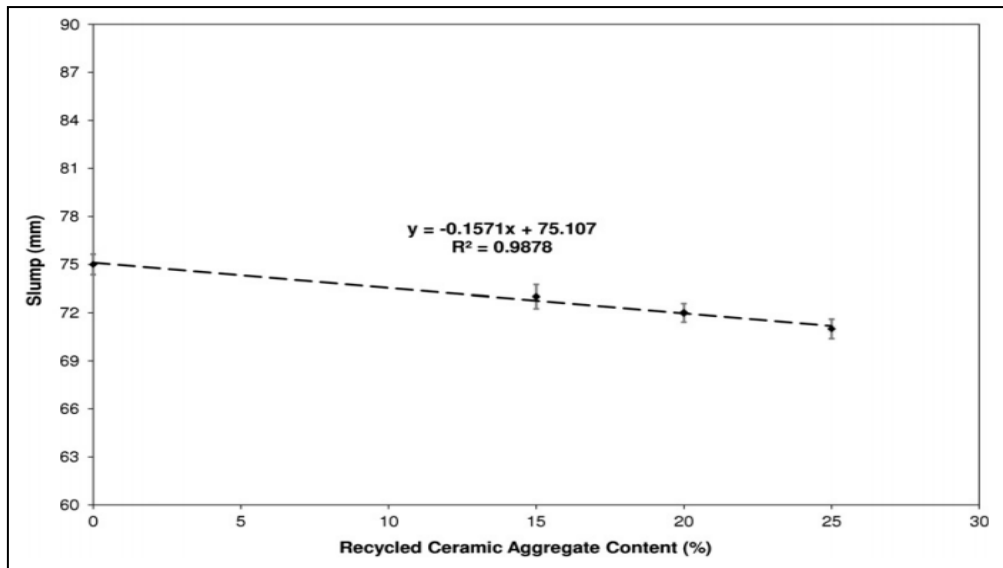


Figure I.9: L'effet du remplacement des déchets céramiques en tant qu'agrégats grossiers sur l'ouvrabilité du béton [C. Medina et al. 2012].

Selon [Pincha T. et al. 2010], l'effet du remplacement de CWA sous forme de granulats fins à 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% et 100% en poids sur l'ouvrabilité des mortiers de ciment Portland est présenté sur la figure I.10. La maniabilité relative du ciment Portland des mortiers est représentée sur la figure I.11. La maniabilité des mortiers a été évaluée sur la base de l'écoulement mesuré du mortier frais.

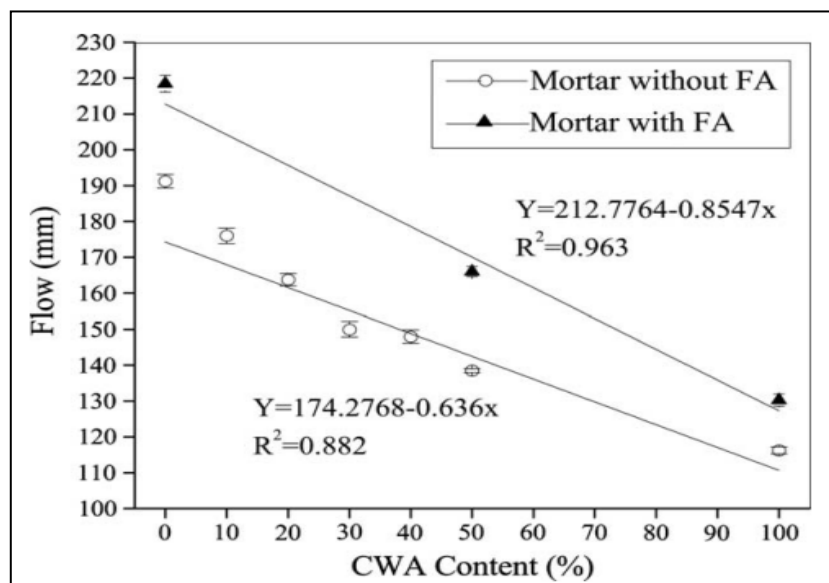


Figure I.10: L'effet du remplacement des déchets céramiques comme agrégats fins sur la maniabilité du mortier avec et sans FA

Les résultats montrent que la maniabilité du mortier diminue significativement avec l'augmentation de la teneur en CWA. La maniabilité du mortier $M_{100}CWA_0FA$ en utilisant du CWA à 100% en poids était d'environ 116 mm, ce qui représente une diminution de 39,2% par rapport au mélange témoin (M_0CWA_0FA) (figure I.11). Cela était dû à la forme angulaire de CWA, qui a causé une réduction de l'ouvrabilité des mortiers et était donc plus difficile à compacter.

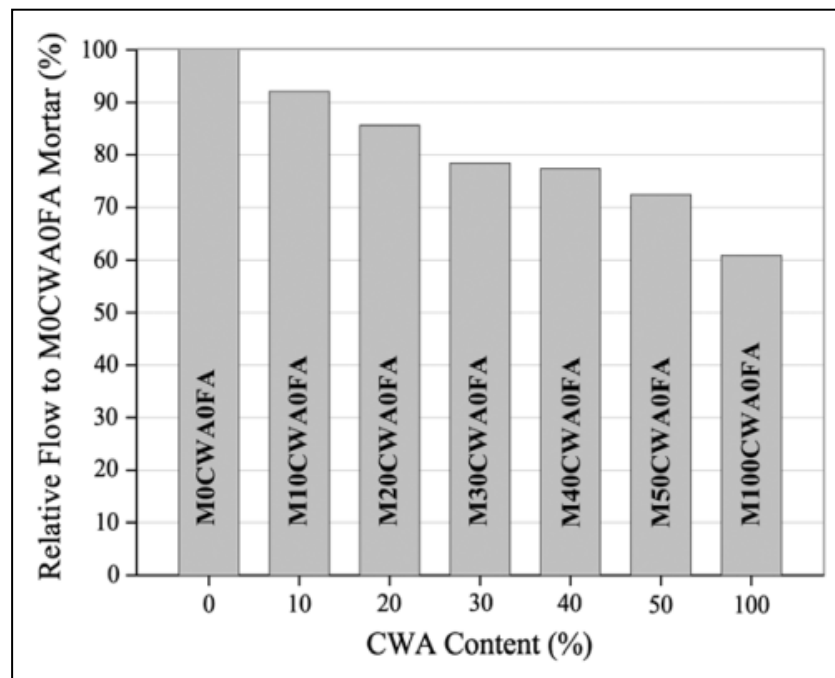


Figure I.11: Maniabilité relative des mortiers sans FA (cendres volantes)

I.2.5.3 Propriétés générales à l'état durci

L'incorporation des déchets céramiques dans les mortiers donne une meilleure hydratation des anhydres du ciment. Elle provoque l'apparition d'une porosité fermée favorable à la résistance mécanique et à la durabilité des matrices cimentaires, due à la formation d'une plus grande quantité de C-S-H et à l'absence de connexion des pores. A ce titre, les déchets céramiques, utilisés en substitution partielle du sable de dune, permettent d'améliorer les performances mécaniques des bétons et des mortiers.

Sur la base des résultats expérimentaux, le module d'élasticité dynamique, quel que soit l'âge du test, a été augmenté avec l'incorporation plus élevée des déchets céramiques sanitaires (Figure I.12). Ceci est dû aux particules fines qui occupent les vides entre les agrégats du sable. Ainsi, les mortiers deviennent plus compacts et par conséquent, le module d'élasticité augmente.

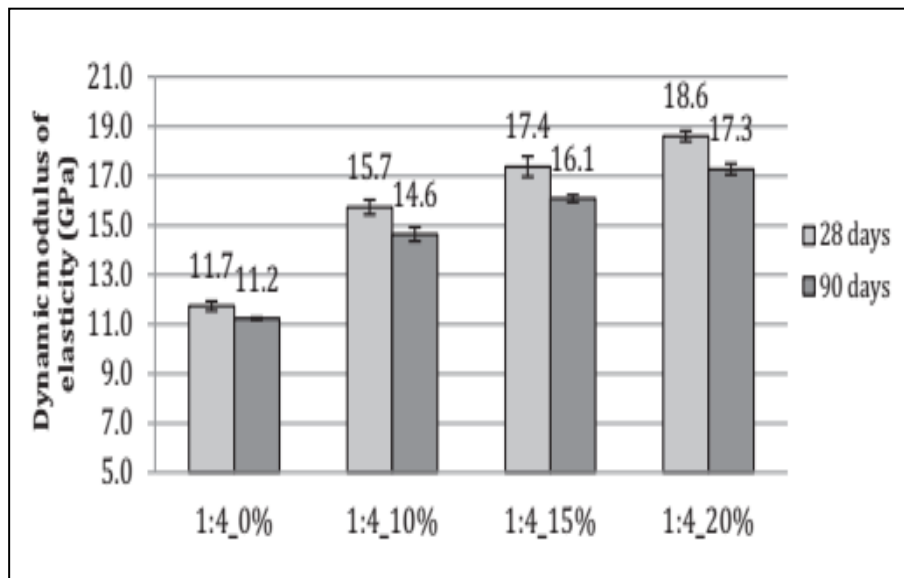


Figure I.12: Module d'élasticité dynamique des mortiers testés [C. Farinha et al. 2015]

Le mortier avec la plus grande incorporation des déchets sanitaires avait un module d'élasticité 54% supérieur à celui du mortier de référence. Ce qui indique une plus grande compacité du mortier modifié par rapport au mortier de référence, ceci est également compatible avec une résistance mécanique plus élevée et une absorption d'eau plus faible [C. Farinha et al. 2015, Braga et al. 2012 et Oliveira et al. 2013, Higashiyama H. et al. 2012].

Tableau I.2: Résistance à la compression et module d'élasticité [Higashiyama H. et al. 2012]

Specimen	Compressive strength (N/mm ²)			Elastic modulus (kN/mm ²)
	7 days	28 days	91 days	28 days
S-1	31.8	51.6	58.0	26.4
G-1	38.3	58.7	70.3	30.1
GI-1	34.7	57.2	71.4	30.8
GI-2	33.3	53.1	66.5	31.7
GI-3	25.9	32.6	62.3	28.2
GE-1	34.8	61.5	77.1	34.8
GE-2	34.4	62.8	81.5	34.5
GE-3	36.3	67.4	83.7	35.7

L'étude réalisée par [J. Silva et al. 2009] ont indiqué qu'il existe une certaine proximité entre les résultats du module d'élasticité des mortiers I (0) et I (10) (Tableau 3). Ceci est probablement dû à leur similitude en termes de composition puisque seulement 10% de la masse totale des agrégats ont été remplacés.

Tableau I.3: Résultats de la détermination du module d'élasticité [J. Silva et al. 2009]

Mortar	I(0)		I(10)	
	Average of 3 specimens	SD	Average of 3 specimens	SD
Modulus of elasticity (GPa) (after 2 months)	14.6	0.13	12.2	0.10
Modulus of elasticity (GPa) (after 5 months)	13.9	0.10	15.6	0.08

Dans les travaux de [C. Medina et al. 2012], l'augmentation des résistances est obtenue lorsqu'une substitution partielle de 15%, de 20% et de 25% des agrégats sont remplacée par des déchets céramiques sanitaires dans la fabrication du béton. La figure I.13 présente l'évolution de la résistance en fonction du taux de substitutions des déchets céramique. Le maximum de résistance relative est obtenu à 25% avec l'augmentation de 21,12%, de 11,04% et de 6,70% à 7, 28 et 90 jours respectivement.

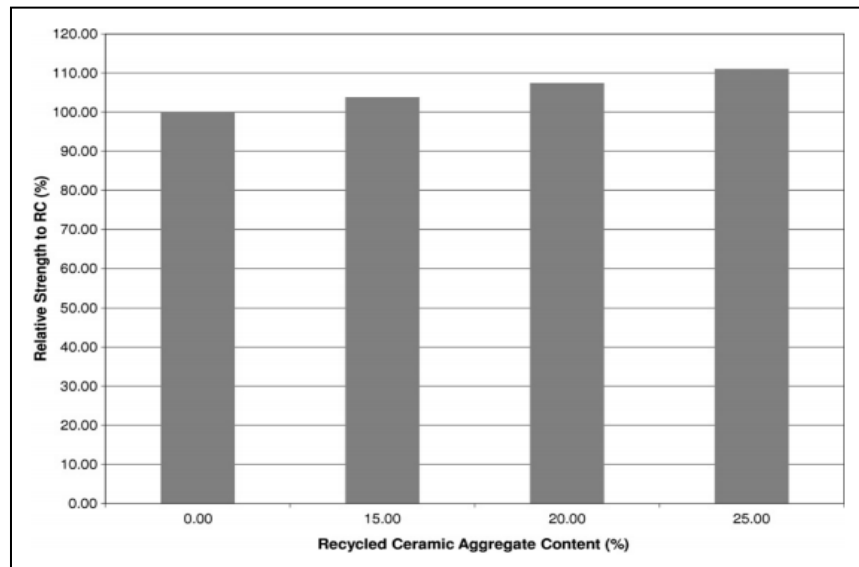


Figure I.13: L'effet des déchets céramiques en tant qu'agrégats grossiers sur la résistance à la compression relative du béton. [C. Medina et al. 2012]

Les résultats des essais de la résistance à la flexion et à la compression, enregistrés pour les différents mortiers testés sont résumés sur les figures I.14 et I.15. L'incorporation d'agrégats de déchets céramiques conduit à une amélioration systématique des propriétés mécaniques, les avantages augmentant avec le taux d'addition. À 2 jours, l'utilisation d'agrégats céramiques a

entraîné une augmentation de la résistance à la flexion jusqu'à 50% et de la résistance à la compression jusqu'à 42%.

Néanmoins, l'influence devient moins significative avec le temps, et après 56 jours, les augmentations maximales correspondantes ont été trouvées égales à 12% et 11% pour la résistance à la flexion et à la compression, respectivement [Mohd Mustafa et al. 2006]. Ces résultats à plus long terme sont conformes à ceux obtenus par d'autre étude, qui ont montrés une augmentation de 12% de la résistance à la compression lors du remplacement de 25% de gravier par des déchets céramiques sanitaires concassés de 4/12,5 mm [Wioletta Jackiewicz-Reka et al. 2015].

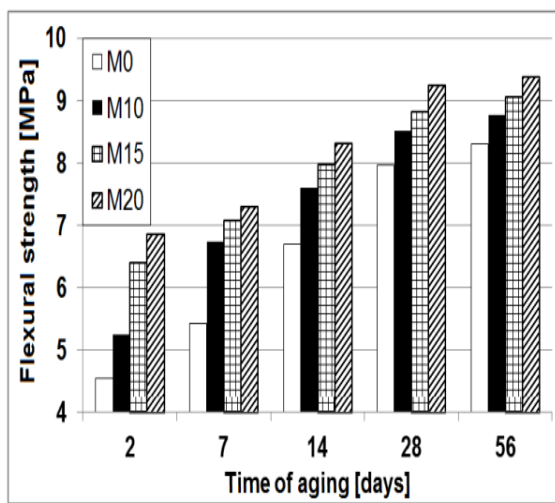


Figure I.14: Résistance à la flexion des mortiers

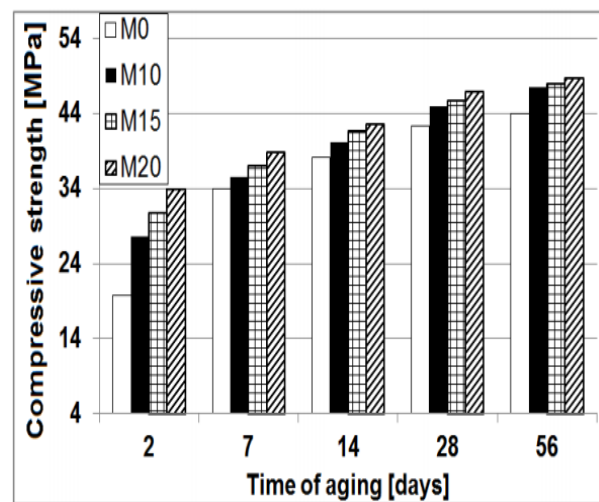


Figure I.15: Résistance à la compression des mortier

Excepter [R.M. Senthamarai et al.2005 A.V. Alves et al. 2014] dont les études ont montré que la résistance à la compression et la résistance à la traction ne semblent pas être significativement affectées par l'incorporation de granulats de brique fine, par rapport au béton conventionnel, mais ces deux propriétés diminuent considérablement avec l'incorporation de granulats sanitaires recyclés.

Tableau I.4: Résultats (moyenne \pm écart-type) des essais sur béton durci: résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité

Composition	Compressive strength						Tensile strength		Elasticity modulus	
	$f_{cm,7}$ (MPa)	Δ (%)	$f_{cm,28}$ (MPa)	Δ (%)	$f_{cm,56}$ (MPa)	Δ (%)	f_{ctm} (MPa)	Δ (%)	E_{cm} (GPa)	Δ (%)
RC	39.0 \pm 2.1	-	46.2 \pm 0.9	-	47.6 \pm 1.5	-	3.60 \pm 0.2	-	38.3 \pm 1.1	-
BC20	33.4 \pm 0.3	-14.5	42.9 \pm 0.4	-7.0	46.8 \pm 0.4	-1.7	3.53 \pm 0.1	-2.0	32.4 \pm 0.3	-2.0
BC50	29.3 \pm 0.9	-24.9	41.8 \pm 0.6	-9.5	45.5 \pm 1.0	-4.4	3.40 \pm 0.0	-5.7	31.6 \pm 0.3	-5.7
BC100	30.2 \pm 2.1	-22.5	41.7 \pm 2.0	-9.6	44.2 \pm 2.4	-7.1	3.42 \pm 0.4	-5.2	27.2 \pm 0.5	-5.2
SWC20	25.1 \pm 1.2	-35.7	31.2 \pm 1.1	-32.5	34.0 \pm 0.4	-28.5	2.71 \pm 0.2	-24.8	31.3 \pm 0.1	-24.8
SWC50	23.6 \pm 0.7	-39.6	30.7 \pm 0.3	-33.5	33.5 \pm 1.5	-29.7	2.60 \pm 0.3	-27.7	31.0 \pm 0.4	-27.7
SWC100	19.6 \pm 0.9	-49.8	26.6 \pm 1.5	-42.5	31.0 \pm 1.5	-34.9	2.38 \pm 0.4	-33.8	28.3 \pm 0.6	-33.8

Ainsi, le module d'élasticité diminue avec une augmentation du taux de remplacement des deux granulats fins de briques recyclées et de granulat fins céramiques sanitaires recyclés, malgré la variation des conditions de travail, c'est-à-dire la résistance des mortiers et bétons augmente au fur et à mesure que leur teneur en déchets céramique augmente [J. Silva et al. 2010, C. Farinha et al. 2015, Guerra I. et al. 2009, Lopez V. et al. 2007]. La divergence entre les conclusions des deux groupes doit fort probablement venir du fait que dans le cas du premier groupe, le premier auteur a travaillé sur les substitutions des agrégats au lieu de ciment et le second a fait une substitution de sable en travaillant sur des pâtes.

I.2.5.4 Influence sur la durabilité

La durabilité du béton est liée à la facilité de pénétration des substances chimiques telles que le dioxyde de carbone, les chlorures, l'oxygène et l'eau. Les problèmes liés à la compacité du matériau influent sur l'altération des composants du béton. De nombreuses recherches montrent que l'eau est un des constituants les plus sensibles affectant les propriétés du béton. Ceci est confirmé physiquement par plusieurs rôles importants joués par l'eau: l'hydratation des grains de ciment, plasticité du béton à l'état frais et cohésion interne du béton frais [Charonnat Y. et al. 2001, De Larrard F. 2000]. La durabilité du béton est liée à sa capacité de résister aux attaques physiques et chimiques perpétuées par son environnement [Erdogan TY. 2002]. Les attaques les plus fréquentes sont la lixiviation et l'efflorescence, la carbonatation, l'alcali-réaction, les cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage, l'abrasion, les sulfates et les acides. Les facteurs clés responsables des attaques physiques et chimiques sont liés aux conditions environnementales (humidité et température par exemple) et aux mécanismes de diffusion au sein de la matrice cimentaire [Baradan B. 2002].

I.2.5.5 Porosité ouverte et absorption d'eau par capillarité des mortiers durcis.

En ce qui concerne l'absorption d'eau par capillarité, les mortiers contenant 100% de latérite comme agrégat fin présentent des valeurs plus élevées, à tous les types de poudre céramique. Il a été observé que les échantillons ayant la densité la plus faible apparente sèche présentent également une absorption d'eau appréciable par capillarité. Ceci a été attribué à la propriété d'absorption de l'eau de la latérite, qui était l'agrégat dominant dans ces mélanges.

Le remplacement du sable traditionnel par du sable céramique est une bonne option car il n'implique pas de perte de résistance et a une performance de durabilité supérieure. En ce qui concerne le remplacement des granulats grossiers traditionnels par des granulats grossiers céramiques, les résultats sont très prometteurs mais sous-performés dans l'absorption d'eau sous vide (figure I.17). Ces bétons possèdent un très bon comportement notamment en ce qui concerne l'absorption d'eau capillaire [Fernando Pacheco-Torgal • Said Jalali 2010].

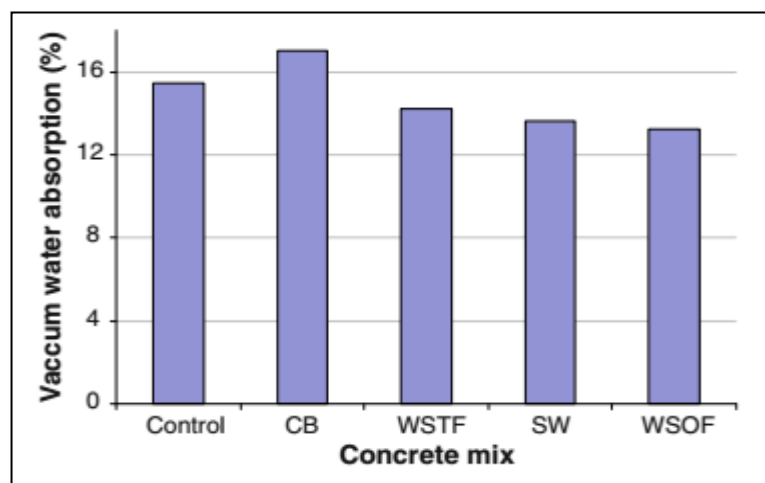


Figure I.17: Absorption d'eau des bétons avec de la poudre céramique (Béton de référence, Béton CB avec poudre de brique céramique, Béton WSTF avec poudre céramiques en grès bicuisson, Béton SW avec céramique en poudre de sanitaires, Béton WSOF avec poudre de céramique en grès, [Fernando Pacheco-Torgal • Said Jalali 2010]).

R.M. Senthamarai et al. 2011 ont étudié les propriétés de durabilité des déchets de l'industrie céramique en tant que granulats grossiers dans le béton. Des rapports de ciment à l'eau de 0,35 à 0,60 ont été utilisés et des propriétés telles que le volume des vides, l'absorption d'eau, la pénétration du chlorure et la sorption ont été étudiées. L'absorption d'eau varie de 3,74 à 7,21% alors que celle du béton conventionnel est de 3,1 à 6,52% béton avec céramique montre des résultats plus élevés dans tous les tests.

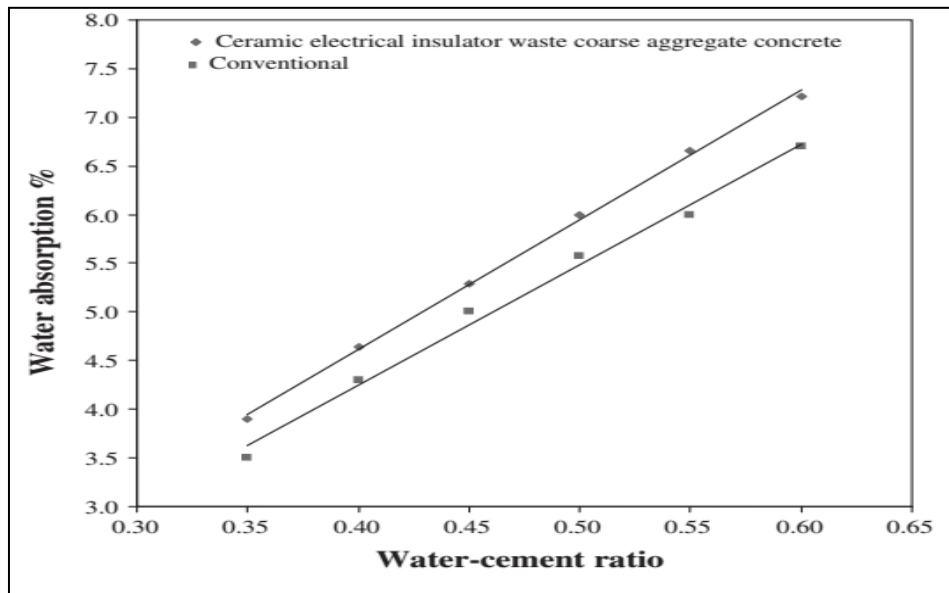


Figure I.18: Relation entre le rapport eau-ciment et l'absorption d'eau [R.M. Senthamarai et al. 2011].

Le coefficient capillaire, qui est donné par la masse d'eau absorbée entre 10 min et 90 min, par unité de surface et la racine carrée de temps, a été calculé. Un coefficient plus petit indique un moindre taux d'absorption d'eau par capillarité. L'incorporation des déchets céramiques sanitaires diminue le coefficient capillaire et aussi l'absorption totale d'eau, par rapport au mortier de référence (figure I.19, figure I.20). Le coefficient capillaire du mortier modifié est inférieur de 30% à celui du mortier de référence, ce qui signifie que l'absorption du mortier est plus lente dans les premières minutes et la porosité ouverte soit inférieure dans les mortiers avec l'incorporation de déchets céramiques sanitaires. En fait, la porosité ouverte devient plus faible avec la plus haute incorporation de déchets céramiques sanitaires [C. Farinha et al. 2015].

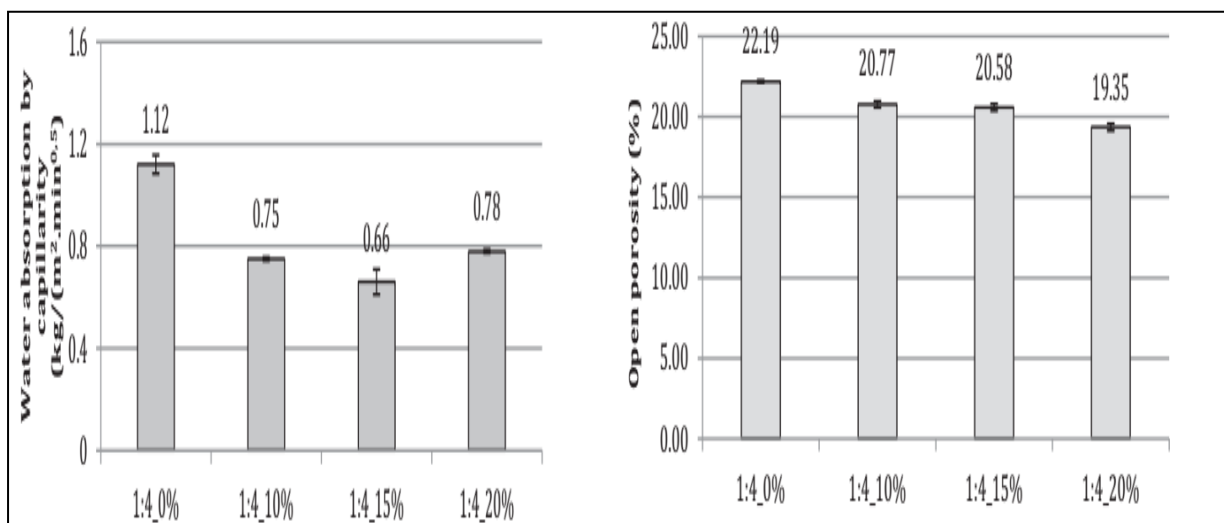


Figure I.19: Absorption d'eau par capillarité des mortiers testés

Figure I.20: Porosité ouverte des mortiers avec céramique sanitaire testé

Silva.J et al. ont étudié la possibilité d'utiliser l'ajout de granulats très fins à partir de céramique d'argile rouge concassée dans la gamme de 0-10%. Les résultats sont présentés sur la figure I.21

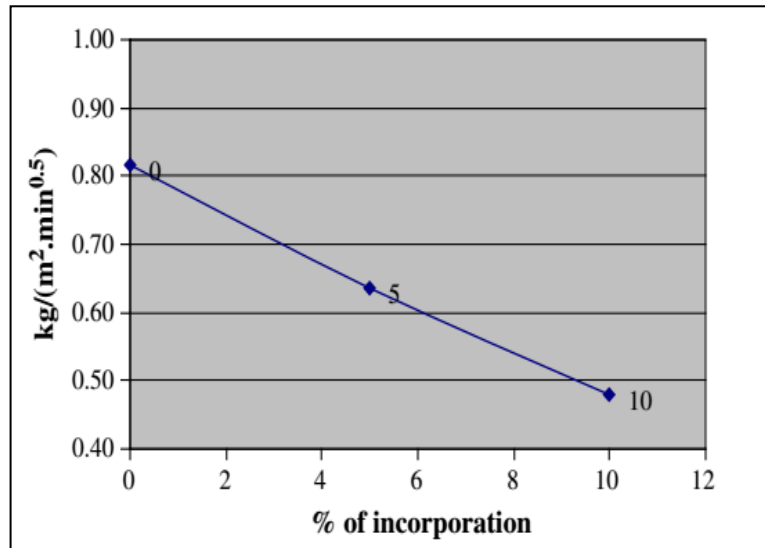


Figure I.21: Absorption d'eau due à l'action capillaire du mortier durci pour les différents rapports d'incorporation étudiés (brique)

Les résultats présentent une tendance presque linéaire du coefficient d'absorption avec le taux de fines incorporées, qui peut s'expliquer par l'existence de moins de vides internes dans les mortiers durcis en raison de l'addition de fines, fournissant ainsi des vaisseaux capillaires plus minces et un flux d'eau plus faible dans le mortier. Par conséquent, cette propriété montre une amélioration nette au fur et à mesure que des fines sont ajoutées jusqu'à, au moins, le rapport maximal testé (10% de l'agrégat global).

La référence [Higashiyama H. et al. 2012] a conduit des recherches sur la résistance à la pénétration des chlorures des mortiers utilisant des déchets céramiques comme agrégats fins. Dans leur recherche, ils ont procédé à une substitution partielle du ciment Portland avec une poudre de déchets céramiques inférieure à 0,075 mm. Ils ont observé une résistance à la compression améliorée pour une substitution allant jusqu'à 20%.

La pénétration du chlorure dans les échantillons de mortier en céramique a été considérablement réduite. En outre, ils ont découvert que le volume des pores et le diamètre des pores sur les échantillons durcis fabriqués à partir de déchets céramiques étaient considérablement inférieurs à ceux du mortier témoin. Une diffusion réduite du chlorure, une

résistance à la compression plus élevée et un volume réduit des pores contribueront à une plus grande durabilité des mortiers fabriqués avec des déchets céramiques.

La diffusion des ions chlorures est représentée sur la figure I.22. Tous les mélanges contenant des déchets céramiques ont donné de meilleurs résultats que les témoins, bien que le mélange SW ait presque le même coefficient de diffusion que le témoin. En ce qui concerne le test de vieillissement de durabilité, les résultats indiquent que tous les mélanges sans exception ont des performances de durabilité supérieures, ce qui confirme l'impact positif des additions céramiques [Fernando Pacheco-Torgal • Said Jalali 2010].

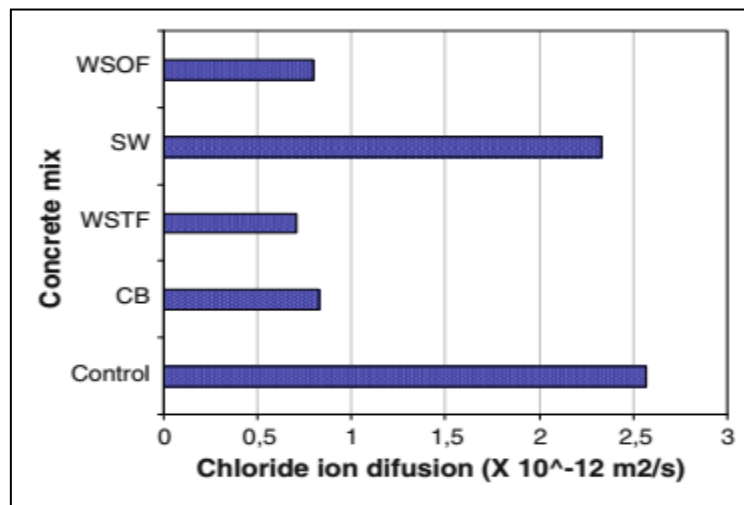


Figure I.22: Chlorure ion coefficient de pénétration des bétons avec de la poudre de céramique

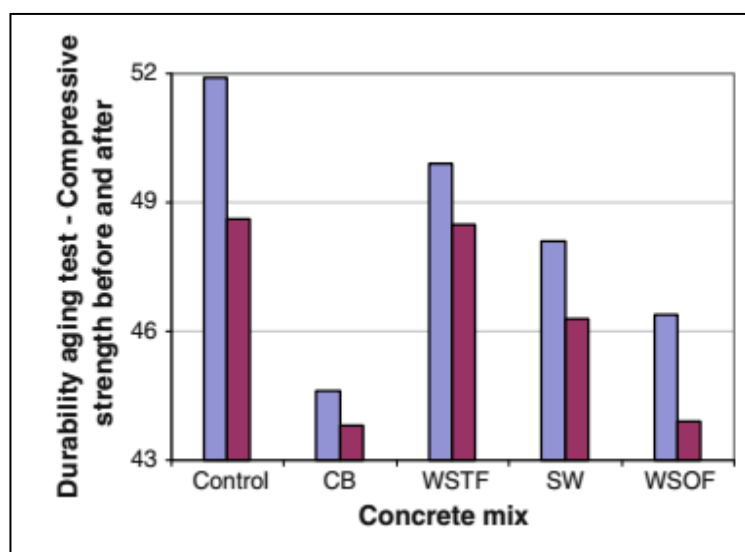


Figure I.23: Résistance à la compression des bétons avec poudre céramique: avant et après le test de durabilité

Les caractéristiques de perméabilité de différents types de béton peuvent être trouvées en immergeant les spécimens durcis pendant 28 jours dans l'acide. Les acides utilisés ici sont l'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide chlorhydrique (HCl). La perte de poids du cube lorsqu'il est immergé dans H_2SO_4 et HCl pour tous les types de béton est montrée sur les figure I.24 et I.25.

Par rapport à l'acide chlorhydrique, la perte de poids est plus importante lorsqu'on plonge dans l'acide sulfurique, car le taux de déshydratation est élevé dans l'acide sulfurique. La quantité de gel CSH formé par le processus d'hydratation, lorsqu'il est immergé dans l'acide sulfurique sera comparativement plus faible que celle formé par l'immersion dans HCl. Donc, au point de vue de la durabilité, SSCC (A) semble bon. La surface extérieure des cubes immergés dans H_2SO_4 a été érodée par rapport aux cubes immergés dans HCl, comme le montre la figure I.26. En effet, les céramiques ont généralement une bonne résistance chimique aux acides faibles et aux bases faibles. Cependant, des acides très forts ou des bases fortes ont tendance à produire des réactions d'échange d'ions et à dissoudre les structures. Par conséquent SSCC (A & B) montre une meilleure résistance à l'acide que SSC [Subathra Devi.V et al.].

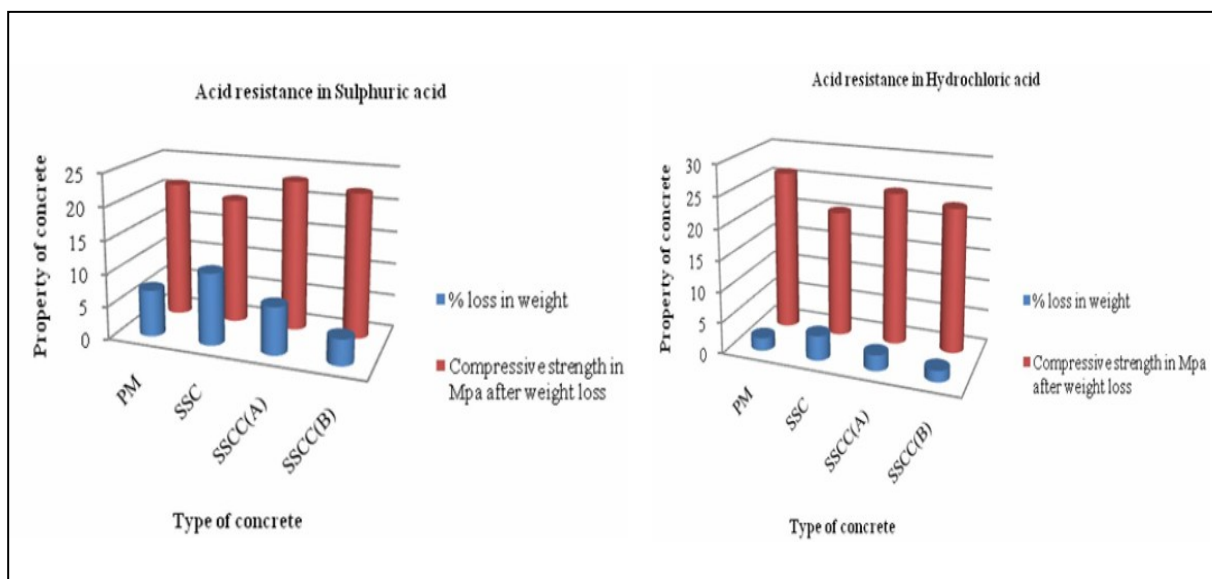


Figure I.24: Résistance à l'acide de différents types de béton lorsqu'il est immergé dans l'acide sulfurique de béton lorsqu'il est immergé dans l'acide chlorhydrique. **Figure I.25:** Résistance à l'acide de différents types de béton lorsqu'il est immergé dans l'acide sulfurique de béton lorsqu'il est immergé dans l'acide chlorhydrique.



Figure I.26: (a) Cube avant l'immersion dans l'acide, (b) Cube après immersion dans H₂SO₄ (c) Cubes après immersion dans HCl.

D'après [Sayamipuk S. 1999], l'incorporation des additions minérales augmente la résistance chimique des mortiers dans les milieux agressifs, notamment en milieu acide. En effet, les ciments avec ajouts diminue la quantité de Ca(OH)₂ de manière significative par rapport au ciments sans ajout, cela est dû à la réaction pouzzolanique qui fixe la chaux.

I.2.6 Interface substrats - mortier

I.2.6.1 L'adhérence entre les substrats et les mortiers

L'objectif de la réparation est de prolonger la durée de vie utile d'une structure existante en rétablissant ses qualités d'origine (protection de l'armature, qualités esthétiques), sa capacité portante et/ou sa rigidité. L'une des conditions préalables pour obtenir une action composite satisfaisante est la durabilité de l'adhérence entre le substrat existant et le nouveau matériau mis en place. À cet égard, la préparation de la surface de l'élément en béton avant la mise en place du matériau de réparation est cruciale. En effet, quelque soit le matériau de réparation et la méthode d'application utilisées, la qualité de la surface préparée fera souvent foi du succès ou de l'échec d'un projet de réparation, ainsi que de la durabilité de la structure réparée [B.Bissonnette et al].

On peut définir l'adhérence comme la force qu'il faut fournir au système adhérent pour séparer deux constituants. Il faut distinguer l'adhérence et l'adhésion. En effet, l'adhésion est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui sont responsables de la formation et de la cohésion des interfaces entre deux corps [E. Darque-Ceretti et E. Felder 2003].

Dans le domaine des mortiers appliqués sur un support, l'adhésion est liée à plusieurs facteurs :

- l'adhésivité qui est l'aptitude à créer des forces d'interactions entre le support et le mortier,
- l'état de surface et la nature du support (porosité, rugosité, absorptivité, état de propreté),

- la mouillabilité qui réside dans l'aptitude du mortier à créer un contact avec le support sur lequel il est appliqué. L'adhésion peut être divisée en deux types:

- l'adhésion chimique qui est la capacité à créer des liaisons chimiques fortes ou « physiques » faibles,

- l'adhésion mécanique (ancrage mécanique) qui est la capacité du mortier à « pénétrer » dans le support au travers de la porosité ou de la rugosité par exemple [M. Nicot Pierre 2008].

Les études réalisées pour observer l'effet de l'augmentation de la quantité de déchets céramique (brique) sur les propriétés d'adhérences montrent que celle-ci augmente avec le taux de déchets céramique [Silva J et al. 2009, Amorim LV. et al. 2003]. Par exemple, le Tableau I.5 indique que l'incorporation de 10% de poudre de brique au lieu de sable a amélioré la force d'adhésion d'environ 30% par rapport au mortier de référence.

Tableau I.5: Résultats du test de résistance à l'adhérence

Mortar	I(0)	I(10)
	Average of 5 determinations SD	Average of 5 determinations SD
Adhesive strength (MPa)	0.34 0.07	0.43 0.11

Dans le cas de mortiers formulés avec un déchet céramique sanitaire [C. Farinha et al. 2015], l'incorporation de céramique sanitaire fine jusqu'à 20% augmente l'adhérence avant et après le vieillissement. La même chose a été vérifiée par d'autres auteurs (figure I. 27), traitant de l'incorporation des autres déchets, comme la céramique rouge, le béton et le verre, respectivement à 10%, 15% et 20% d'incorporation.

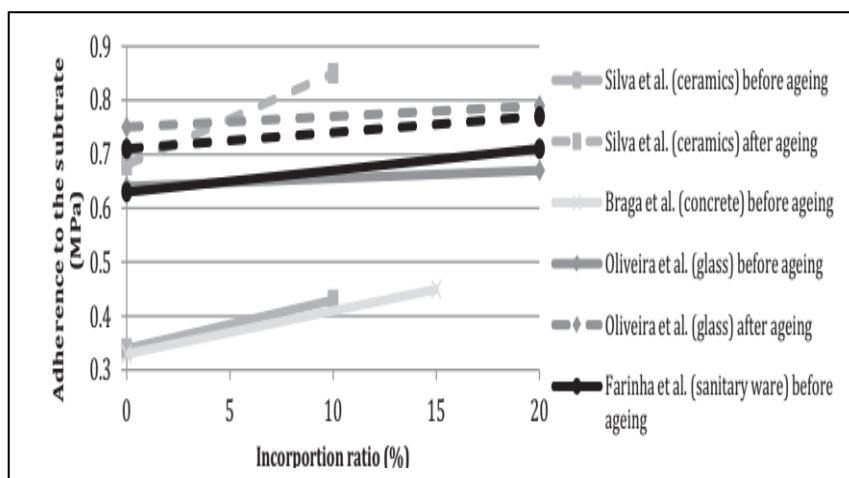


Figure I.27: Comparaison de l'adhérence du substrat des mortiers testés avec ceux de Silva et al., Braga et al. et Oliveira et al..

Par Contre, le remplacement de 40% en volume du sable naturel par du sable recyclé de parois de céramique n'affectait pas les valeurs moyennes de la force d'adhérence des mortiers, qui se situaient entre 0,37 MPa et 0,45 MPa . Ces résultats étaient proches des valeurs obtenues par d'autres auteurs [J.R. Jiménez et al. 2013].

C. Medina et al.2012 ont montré que l'inclusion d'agrégat céramique sanitaire recyclé modifie la distribution de la taille des pores, ce qui augmente le volume de capillaire pores et en abaissant le volume des macropores et les mélanges avec l'ajout des déchets sanitaires sont plus économiques en raison de la réduction du ciment. Le remplacement des agrégats céramiques conventionnels en céramique recyclée n'a pas d'effet négatif sur la perméabilité au béton en oxygène. Mais, le contraire a été observé pour la carbonatation naturelle, qui était constante avec l'inclusion de l'agrégat recyclé sanitaire. Les effets de la carbonatation naturelle ont été analysés dans les bétons après 90 jours d'exposition. Selon les profondeurs de pénétration et le taux de carbonatation indiqués sur la figure I.28, aucune diminution de la résistance à la pénétration du CO₂ n'a été observée avec l'utilisation de céramique agrégat. En fait, la résistance elle même augmente légèrement, de 2,89% et de 3,00% dans les CC-20 et CC-25, respectivement, par rapport à RC.

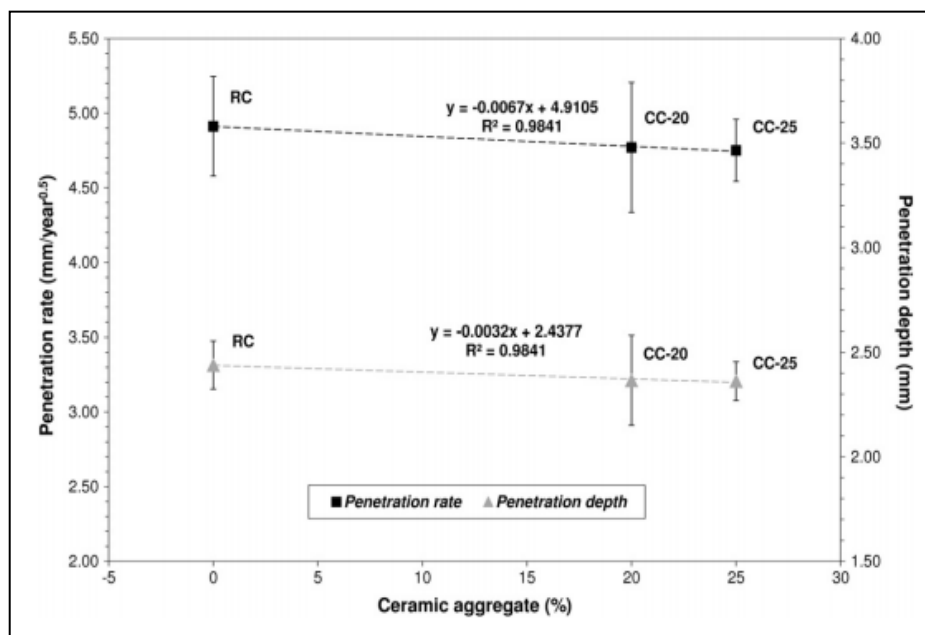


Figure I.28: Profondeur de pénétration et taux de carbonatation par rapport au taux de remplacement des granulats recyclés [C. Medina et al. 2012].

Selon ces deux paramètres, la microporosité et la perméabilité aux gaz, la perméabilité à l'O₂ et au CO₂ étaient similaires dans le béton de référence et les bétons contenant des appareils sanitaires recyclés en remplacement partiel des granulats conventionnels. A la lumière de ces

découvertes, le remplacement des agrégats naturels par des déchets de l'industrie sanitaire recyclée est réalisable du point de vue de la perméabilité aux gaz.

Les résultats se situaient dans la fourchette des valeurs normales pour les bétons classiques ($>4\text{mm} / \text{an}^{0,5}$) [Neville AM. 2008] et correspondent à la tendance observée lorsque moins de 50% de l'agrégat a été remplacé par CDW [Levy SM, Helene P. 2004 et Paine KA, Dhir RK. 2010]. Ce comportement amélioré était étroitement lié à l'effet de l'inclusion d'agrégats céramiques sur la distribution de taille des pores, ce qui induisait une diminution du volume des pores mesurant plus de $0,067\ \mu\text{m}$ (figure I.29). De tels diamètres de pores favorisent la diffusion du CO_2 [Song HW, Kwon SJ. 2007 et Valcuende M, Parra C. 2010], car la molécule circule moins facilement à travers les petits pores et les systèmes de pores les plus longs et les plus sinueux [Houst YF, Wittmann FH. 1994].

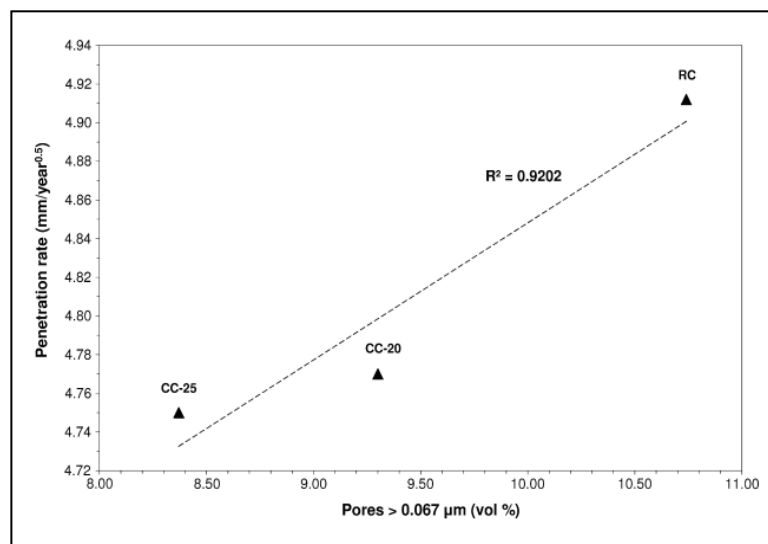


Figure I.29: Taux de pénétration en fonction du volume (%) de pores $> 0,067\ \mu\text{m}$ [C. Medina 2012].

[Debieb et Kenai] ont testé des rapports de remplacement de 25%, 50%, 75% et 100% d'agrégats naturels par des agrégats céramiques (fins, gros) et les deux simultanément, recyclés (briques broyées) pour déterminer les résistances en compression et en traction, le module de l'élasticité, de l'absorption de l'eau par capillarité, de la perméabilité et de retrait du béton. Ils ont déclaré que plus le taux de remplacement des agrégats naturels par les agrégats de briques recyclés (gros et fins) est élevé, plus la résistance à la compression est faible. Cette chute de résistance est due principalement à la valeur élevée de l'absorption d'eau de ces granulats fins recyclés. Les auteurs ont signalé une densité apparente inférieure pour les agrégats de briques recyclés fins ($2496\text{kg}/\text{m}^3$) par rapport aux granulats naturels fins ($2978\text{kg}/\text{m}^3$). Ils ont rapporté une absorption d'eau de

14,0% pour les granulats céramiques fins recyclés et de 1,0% pour les granulats naturels. Ces résultats montrent que l'absorption d'eau plus élevée des agrégats de brique concassée est due à leur grande porosité.

I.7 Sable de dune

I.7.1 Définition

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier [197]. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs. Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, et la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire. Les grands ergs coïncident avec des zones où des vents saisonniers de directions variées se compensent.[Tarfaoui].

1.7.2. Effet des constituants sur les propriétés d'un Béton à base de sable de dune

Les bétons à base de sable dune qui ont fait l'objet de plusieurs études [KETTAB, R 2007, A. BENAÏSSA 1993 - BENMALEK.L 1992] sont très utilisés malgré leurs inconvénients tels que la grande teneur en grains fins qui donne une grande surface spécifique, ce qui conduit à la difficulté d'assurer une bonne enveloppe de pâte de ciment pour les grains de sable. Ceci entraîne à l'augmentation du dosage en ciment (non économique), qui dégage beaucoup plus de chaleur d'hydratation et cause des dégâts aux ouvrages massifs. En outre, les grains très fins du sable peuvent abaisser l'activité du ciment, ce qui diminue sensiblement la résistance mécanique du béton. De plus, à cause de la grande surface spécifique du ciment, l'absorption capillaire augmente, ce qui diminue l'imperméabilité du béton durci et augmente le retrait. Néanmoins, plusieurs recherches ont été réalisées en Algérie afin d'éliminer les inconvénients du béton de sable pour lui assurer sa valeur économique surtout dans les régions riches en sable comme le sud. Le but principal de ces recherches est d'avoir une maniabilité correcte et d'atteindre une bonne résistance mécanique en visant plusieurs solutions [Benchaa.B 2005] :

* la correction granulaire par le mélange d'un sable gros avec un sable fin atteint une performance mécanique satisfaisante. Les grains fins du sable se logent dans les vides créés par l'empilement des grains grossiers, et par conséquent la compacité du mélange s'améliore. Une étude sur la valorisation des sables locaux de la région de Laghouat (sable de dunes et sable alluvionnaire), [Bédérina. 2005] a montré que l'utilisation de sable de dunes (DS) avec une classe

de 0.4/5 mm du sable alluvionnaire (RS), à un rapport RS/SD = 1.7 améliore la compacité du sable mélange (RDS).

Les mortiers M_{SAD} du sable mélange (alluvionnaire- dunaire) présentent des meilleures performances mécaniques que celles des mortiers M_{SDP} et M_{SD} . On note une résistance en compression à 28 jours de l'ordre 37 MPa pour le mortier M_{SAD} , et ses mortiers à base de sable mélange sont plus durables vis-à-vis de l'attaque des sulfates que les mortiers de sable dunaire. Les mortiers de sable de dunes sont plus poreux, ce qui facilite la pénétration des agents agressifs, en diminuant les propriétés liantes et les caractéristiques mécaniques des mortiers à un rapport RS/SD = 2 [Benchaa B 2012].

La procédure expérimentale, suivie par [A. Bouaziz. 2013] pour la correction de la formulation du béton du sable de dune, montre que le rapport optimal (filler/sable) vis à vis de la résistance en compression est égal à 0.4. L'utilisation du sable alluvionnaire dans la formulation du béton donne des résistances supérieures par rapport à ceux obtenues dans le cas de l'utilisation du sable de dune. Un gain de 30% en résistance à la compression a été observé et même le dosage en ciment dans la formulation du béton du sable 0/5 est inférieur de 34%.

* L'ajout de filler pour améliorer la compacité et la résistance mécanique des bétons de sable. L'ajout de fines entraîne une amélioration de la compacité du squelette granulaire et améliore par conséquence la maniabilité du béton à base de sable. [Bédérina, 2005] On remarque qu'il existe un dosage optimal de fillers calcaires où la compacité est maximale. L'amélioration de la compacité par l'ajout de fillers calcaires devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité.

De nombreuses études se sont intéressées à l'évolution des déformations de retrait du béton de sable (Benaïssa et al., 1992). Il a été remarqué que la cinétique du retrait de dessiccation du BS est extrêmement rapide et le retrait de dessiccation du BS est deux fois plus important que celui du béton ordinaire. Généralement, pour contrecarrer l'effet du retrait, engendré par l'importante volume du ciment, on utilise des fibres organiques (fibres polypropylènes) ; et pour améliorer la ductilité, on fait recours aux fibres de fonte amorphe ou aux fibres métalliques [Bouziane.T 2013]. Dans une étude plus récente sur l'effet de l'incorporation des fibres métalliques et les fibres de polypropylène sur le phénomène de fissuration causé par le retrait important et les caractéristique mécaniques faible enregistré dans le cas des bétons de sable de dune,[M. Hadjoudja.2011, MELAIS.F.2011] ont montré que l'incorporation des fibres dans les bétons de sable est bénéfique pour l'amélioration de la ductilité et le retrait de ces matériaux.

Une nouvelle technique peut être appliquée pour tenter de remédier les aspects négatifs de l'utilisation du sable de dune, cela consiste à l'ajout des déchets céramiques au sein de la matrice, où le recyclage tient une place importante. Ainsi, les granulats recyclés issus de déchets de démolition, de rebuts de fabrication de produits en béton et de déchets divers ne sont pas (ou très peu) utilisés dans l'industrie du béton voire du Génie Civil. Toutefois, leur perspective d'utilisation dans des produits de résistance mécanique peu élevée est grande moyennant quelques précautions d'emploi. C'est pourquoi le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production, consommation et de protection de l'environnement et, en même temps, de recycler un déchet qui n'a pas d'application pratique jusqu'à présent.

I.8 Conclusion

L'incorporation des déchets céramiques conduit à une réduction importante de la taille des pores comparativement à la même matrice sans céramique. La diminution de la porosité induite par la présence des déchets céramiques contribue à l'amélioration de la durabilité du béton et du mortier. Une résistance élevée dans le mortier correspond généralement à une compacité plus élevée et donc à un coefficient d'absorption plus faible. Lorsqu'une partie du sable est remplacée par de fines particules, celles-ci rempliront certains des vides, laissant la plupart de très petits pores de mortier durci entravent la circulation d'eau, ce qui rend le débit d'eau capillaire plus petit. La réduction de la porosité entraîne une diminution de l'absorption totale d'eau par capillarité, tandis que la plus petite taille des pores conduit à une diminution du taux d'absorption (coefficient de capillarité plus faible).

Les agressions chimiques externes sont dues essentiellement aux acides, bases, sulfates et aux solutions salines, qui dissolvent la chaux hydratée du ciment en formant de nouveaux composés entraînant l'érosion, le gonflement et l'éclatement des ouvrages en béton. Plusieurs recherches ont confirmé que la pouzzolane améliore la résistance du ciment aux sulfates. Pour palier aux insuffisances des ciments Portlands, l'utilisation de pouzzolanes favorise la durabilité du mortier et le béton exposé à l'eau sulfatée. Ceci est attribué à l'effet pouzzolanique qui réduit la perméabilité et augmente la compacité du mortier et du béton, ainsi que la transformation de l'hydroxyde de calcium en C-S-H de faible rapport CaO/SiO_2 dans la pâte de ciment pouzzolanique. Une diffusion réduite du chlorure, une résistance à la compression plus élevée et un volume réduit des pores contribuent à une plus grande durabilité des mortiers fabriqués avec des déchets céramiques.

CHAPITRE II

Caractérisation des matériaux utilisés

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser dans la confection des mortiers à étudier ainsi que les essais à effectuer selon les différentes normes et les modes opératoires en vigueur. Nous allons dans un premier temps caractériser les matériaux employés dans cette étude en présentant leurs propriétés chimiques et physiques à savoir, la masse volumique des matériaux, l'analyse granulométrique, la propreté, l'analyse élémentaire par fluorescence en X et diffraction des rayons X (DRX).

II.2. Méthodes et essais de caractérisations physico-chimiques

L'étude et la caractérisation des matières premières utilisées ainsi que celles des matériaux élaborés nécessitent l'utilisation de plusieurs techniques à savoir :

- une étude physique pour déterminer la granulométrie et la forme des grains de ce type de matériau;
- une analyse par diffraction des rayons X (DRX) permettant d'identifier la nature des phases cristallisées.
- une analyse chimique par fluorescence au rayon X. Le spectromètre de fluorescence X utilisé a permis de déterminer la composition chimique des matériaux. L'analyse à la fluorescence X est une méthode complémentaire à celle de DRX.
- La microscopie électronique à balayage permet la réalisation d'une analyse élémentaire par détection de l'énergie des rayons X émis. Le fort grandissement et la profondeur de champ très importante de cette technique d'analyse permettent de former des images des surfaces rugueuses ou lisses avec un grand pouvoir de résolution.

L'ensemble des essais et les analyses a été réalisé au niveau de :

- Laboratoire de caractérisation (Centre de Recherche Nucléaire de Birine (Djelfa)).
- Laboratoire de L.N.H.C (Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction) antenne de Djelfa.
- Centre de recherche scientifique et technique en analyse physico-chimique (CRAPC).
- Laboratoire de caractérisation (Centre de développement des technologies avancées).
- Laboratoire de chimie inorganique (université de M'sila)

II.2.1 Analyse granulométrique des granulats

L'analyse granulométrique par tamisage et la sédimentométrie constituent deux techniques d'analyse complémentaires pour caractériser la distribution granulaire des particules fines à grossière du matériau.

La dimension d'un élément granulaire est donnée par l'ouverture de la maille carrée d'un tamis, exprimée en millimètres, à travers laquelle il passe facilement. La granulométrie est caractérisée par la distribution dimensionnelle des éléments. Elle est déterminée par l'analyse granulométrique par tamisage. L'essai est réalisé selon la norme NF P 18-560.

Pour les particules fines, une analyse granulométrique par sédimentation a été effectuée, le principe de cet essai consiste à analyser le passant à 80 μ m par sédimentation suivant la norme NF P 94-057 dans laquelle, on détermine la quantité de matériaux utilisés entre chacun des tamis d'une série et par lecture des graduations présentes sur un aréomètre à différents intervalles de temps.

II.2.2 Propreté

La propreté d'un sable est mesurée par l'essai d'équivalent de sable; le degré de propreté du granulat en général à une influence directe sur la qualité du béton ou mortier, le retrait et la qualité d'eau de gâchage. Les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte cimentaire. Les résultats sont obtenus par l'essai d'équivalent de sable selon la norme NF P 18-598. Dans les sables concassés ou broyés, le pourcentage des fines peut être important. Les fines peuvent avoir une nocivité grande lorsqu'elles sont argileuses d'où la nécessité de vérifier au moyen de l'essai au bleu de méthylène si elles sont nocives ou non. [Dreux G 1998]. L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de matériau maintenue en agitation. On prélève périodiquement, à l'aide d'une baguette de verre, une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleutée apparaît autour de la tâche, on considère que l'absorption du bleu de méthylène sur les particules d'argiles est terminée.

II.2.3 Coefficient d'absorption d'eau

C'est une mesure des pores accessibles à l'eau. Le coefficient d'absorption d'eau est le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon suite à une immersion partielle en eau à sa masse sèche initiale. L'imbibition partielle consiste à immerger l'échantillon dans l'eau pendant 24h à 20°C sous la pression atmosphérique. Ce coefficient a été mesuré conformément à la norme NF P 18-554.

II.2.4 Masse volumique

La masse volumique absolue d'un granulat est le rapport de sa masse sèche par le volume de matière solide sans aucun vide contenu dans les grains « volume absolu » [Maillet R. 2001].

La masse volumique apparente est la masse des grains secs occupant un volume apparent. Les masses volumiques apparentes et absolues des différents granulats étudiés sont mesurées d'après la norme NF P 18-555

II.2.5 Détermination des phases cristallines par diffraction aux rayons X

* Diffraction aux rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique d'analyse structurale non destructive. Elle présente une grande sensibilité aux paramètres cristallins des échantillons; sa longueur d'onde étant de l'ordre de la grandeur des distances interatomique. Le principe de cette méthode consiste à envoyer un faisceau de rayons X sur l'échantillon et à enregistrer l'intensité du faisceau des rayons réfléchis par les plans réticulaires des premiers plans de l'échantillon. Les rayons réfléchis sont en phase et donnent lieu à un pic sur le diffractogramme enregistré.

Les analyses minéralogiques consistent à déterminer les minéraux d'un matériau par diffraction aux rayons X. Cette méthode consiste à utiliser la propriété diffraction d'un faisceau monochromatique de rayons X par les plans réticulaires.

L'analyse par DRX a été réalisée avec le diffractomètre « X'PERT PRO MPD » de Philips en mode θ - θ (configuration Bragg-Brentano), équipé d'un goniomètre vertical de rayon 240 mm et muni d'un tube à rayons X à anticathode de cuivre. Le détecteur interfacé est de type PIXcel-1D (Figure II.1)



Figure II.1: Diffractomètre « X'PERT PRO MPD » de Philips.

II.2.6 Analyse chimique par Fluorescence aux rayons X

La spectrométrie de fluorescence X est une méthode d'analyse chimique élémentaire utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X. Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon. En analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.

II.2.7 Microscopie électronique à balayage « MEB »

Parmi toutes les techniques de caractérisation des matériaux, la microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique d'observation capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon.

La microscopie électronique à balayage permet la réalisation d'une analyse élémentaire par détection de l'énergie des rayons X émis. Le fort agrandissement et la profondeur de champ très importante de cette technique d'analyse permettent de former des images des surfaces rugueuses ou lisses avec un grand pouvoir de résolution. L'observation d'échantillons isolants nécessite une métallisation de l'échantillon qui permet de le relier à la masse avec une colle conductrice qui permet d'évacuer les charges et de la fixer sur le porte échantillon. A l'échelle la plus faible, on observe le défaut dit de microporosité du béton. Il s'agit de pores, dits capillaires, issus des espaces inter granulaires initialement présents dans la pâte fraîche. Leur taille varie entre 50 nm et quelques μm [Cullity B.D. 1978].

II.2.8 Analyse thermogravimétrique « ATG ».

L'analyse thermique désigne un ensemble de techniques permettant la mesure de caractéristiques d'un matériau en fonction de la montée en température. Le principe de cette analyse consiste à suivre l'évolution de la masse d'un échantillon de matériau soumis à une élévation de température dans un four. Cette température peut aller jusqu'à 1000°C. La perte de masse est suivie par une mesure continue à l'aide d'une balance. A la fin de l'essai, on obtient une courbe donnant l'évolution de la masse en fonction de la température. La représentation de la perte de masse sous la forme de sa dérivée par rapport au temps (DTG), met en évidence les différents pics de décomposition des phases constituants le matériau. Cette méthode est généralement employée pour les matériaux cimentaires afin de déterminer le degré d'hydratation et la proportion massique des différentes phases de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et de calcite (CaCO_3).

Dans notre cas, cette technique a été utilisée pour estimer la quantité de déchets céramiques et de calcite dans les mortiers modifiés avant hydratation. L'appareil utilisé est de marque SHIMADZU TGA-51 (Figure II.2).



Figure II.2: Vue d'ensemble et schéma de la SHIMADZU TGA-51

II.3 Résultats de caractérisation des matériaux utilisés

Toute technique de valorisation nécessite une phase de caractérisation afin de mieux identifier le matériaux et ses constituants, son potentiel polluant ainsi que son comportement mécanique s'il y a lieu. Le déchet céramique utilisé dans notre étude expérimentale est récolté d'une unité de fabrication de deux types de céramiques blanche et rouge (sanitaire et faïence). Dans ce travail de recherche, l'expérimentation a été entreprise sur le sable de dune de la région de Djelfa (Zaafrane). Leurs granulométries sont présentées sur la Figure II-3 et leurs caractéristiques chimiques et physiques sont présentées respectivement dans la Figure II.5 et les Tableaux II.1 et II.3.

II.3.1 Analyse granulométrique

La figure II.3 représente l'analyse granulométrique réalisée sur les sables et les déchets céramiques obtenus après le broyage utilisés dans les formulations des différents mélanges.

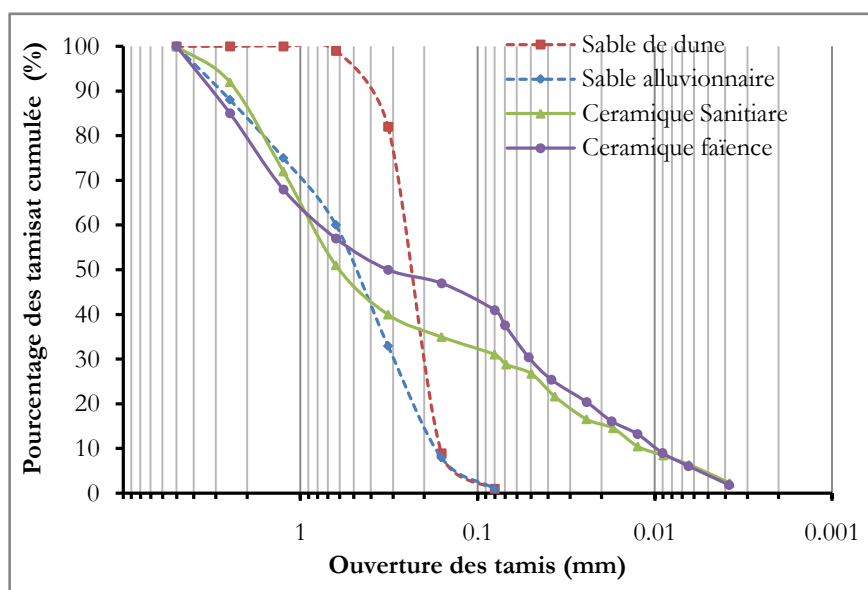


Figure II.3 : Analyse granulométrique des matériaux utilisés

L'analyse granulométrique du sable de dune utilisé montre que la granulométrie est serrée, son coefficient d'uniformité et le coefficient de courbure sont de l'ordre de 1.53 et 0.91 respectivement, ce qui indique que le matériau est mal gradué. Le coefficient d'uniformité et celui de courbure des déchets céramiques sanitaire et faïence recyclés sont de l'ordre de (67.7, 6.12) et (68.9, 0.45) respectivement, ce qui traduit une granulométrie étalée et mal gradué. Les paramètres physiques du sable de dune naturel (SD) et des déchets céramiques sont représentés dans le tableau II.1.

Tableau II.1: Propriétés physiques des matériaux.

Propriétés	Sable de dune	Sable alluvionnaire	Déchets Ceramiques	
			Sanitaire	faïence
Masse volumique absolue (Kg/m ³)	2525	2500	2288	2242
Masse volumique apparente(Kg/m ³)	1434	1471	1212	1288
Absorption d'eau (%) NF P 18-554	/	/	30.00	71.87
Module de Finesse	1.07	2.35	2.12	01.97
Coefficient de uniformité (C _u)	1.53	3.38	67.7	68.90
Coefficient de courbure (C _c) NF P 18-560	0.91	0.82	06.12	0.45
Equivalent de sable (%) NF P 18-598	87.00	81.02	/	/

Le module de finesse du sable de dune est de 1.07. Il indique un sable fin, qui est caractérisé par une facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance et une demande en eau élevée. Les modules de finesse des déchets de céramique sanitaire et faïence ont respectivement les valeurs 2.12 et 1.97. Il s'agit des matériaux fins. La propriété marquée par l'essai de l'équivalent de sable est supérieure à 80%, d'après la norme P18-598 les sables utilisés sont très propres (Tableau II.1).

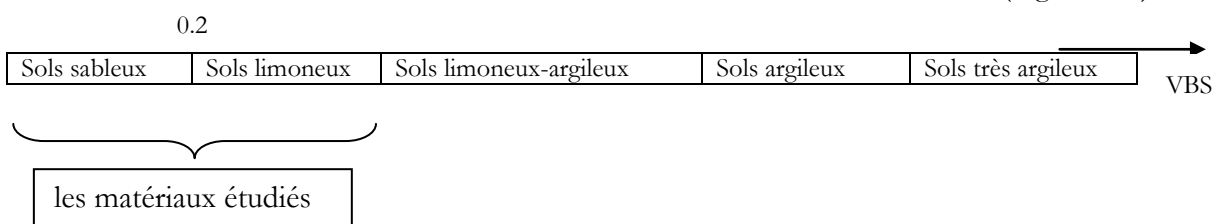
II.3.2 Valeur au bleu de méthylène (VBS)

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier l'activité argileuse. Dans cette étude, l'essai est réalisé suivant la norme NF P 94-068. Le Tableau II.2 présente les valeurs au bleu de méthylène des différents matériaux exprimées en g/100g de matière sèche.

Tableau II.2. Valeurs au bleu des sables et des déchets céramiques étudiés.

Matériau	Valeurs de bleu méthylène
Sable de dune	0.05
Sable alluvionnaire	0.05
Céramique sanitaire	0.6
Céramique faïence	0.8

Selon le [GTR 2000] et en fonction de la valeur au bleu de méthylène trouvée, les deux sables sont placés dans le groupe des sols sableux et les deux déchets sont des sols limoneux (Figure II.4).

**Figure II.4.** Propreté des sables étudiés

II.3.3 Composition chimique et minéralogique

a) L'analyse par FX

Des analyses de FX ont été réalisées également pour détecter les principaux éléments chimiques qui constituent les différents matériaux. Les résultats sont récapitulés dans le tableau II.3.

Tableau II. 3. Composition chimique des matériaux

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO
Sable de dune	92.601	2.92	2.52	0.417	0.855	0.433	0.068	0.06	0.126	/
Céramique Sanitaire	62.80	29.5	2.21	1.44	1.55	0.468	0.973	0.04	1.01	0.009
Céramique Faïence	65.4	17.2	6.35	3.142	4.22	1.40	1.82	0.034	0.388	0.046

Les constituant principaux sont : Le dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium. Nous remarquons une prédominance de la silice dans tous les matériaux (> à 92% pour le sable de dune) et (> à 60% pour les déchets céramiques). On trouve ensuite, par ordre décroissant des pourcentages d'oxydes, l'aluminium (Al₂O₃), le calcium (CaO) ou le fer (Fe₂O₃), le potassium (K₂O), les autres éléments (Ti₂O, MnO, SO₃, Na₂O) étant sous forme de traces (< 1 %).

b) L'analyse par DRX

Les résultats d'analyse élémentaire par DRX menée sur le sable de dune et les déchets céramiques sont présentés graphiquement sur la figure II- 5. Nous remarquons un pic d'environ 100 % de silice qui traduit la dominance du SiO_2 dans le sable analysé. Ces phases cristallisées sont couramment présentés dans les spectres et l'illite est présente à de faibles pourcentages.

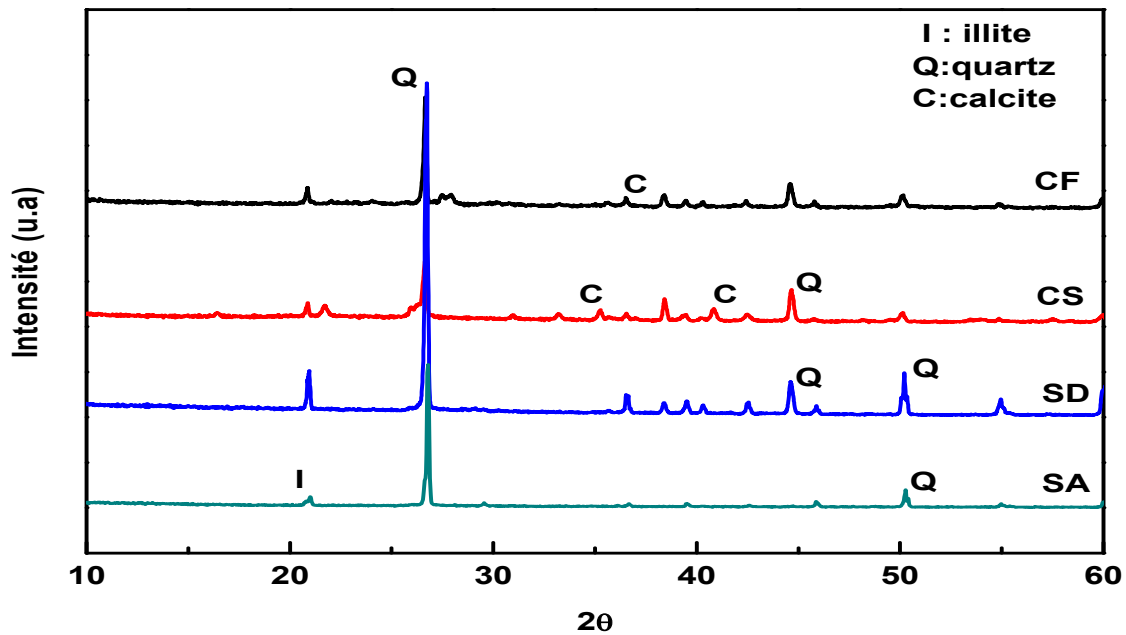


Figure II.5. Diagramme DRX des matériaux

L'analyse des diffractogrammes obtenus pour les deux déchets céramiques CS, CF met en évidence la présence de quartz (SiO_2) comme une phase principale. L'analyse a également révélé l'identification de certaines phases minoritaires comme l'illite ($\text{K}(\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_9(\text{OH})_3)$) et la calcite (CaCO_3).

II.3.4 Ciment

Le ciment choisi dans cette étude est du type CEM II/B 42,5 provenant de la cimenterie de Lafarge (M'sila). Il répond à la norme Algérienne (NA 442) et européenne (EN 197-1); il est destiné principalement aux travaux de bâtiment et de génie civil nécessitant de fortes résistances à court et à long terme. L'objectif du choix de ce type de ciment est de développer des résistances élevées. Les constituants du ciment, selon la formule de Bogue, sont: le C_3S (81.10 1%), le C_2S (2.79%), le C_3A (6.86%) et le C_4AF (9.18%). La masse volumique du ciment anhydre est de $3,1 \text{ g/cm}^3$. La surface spécifique de Blaine du ciment utilisé est de $3918 \text{ cm}^2/\text{g}$.

II.3.5. Eau

L'eau utilisée pour la confection des mortiers est de l'eau potable du réseau. L'eau introduite dans le mélange remplit deux fonctions essentielles :

- une fonction physique qui confère au mortier frais les propriétés rhéologiques d'un liquide ;
- une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation et donc des résistances mécaniques [Serifou M 20013].

II.3.6. Conclusion

Cette étude nous a permis de mener une caractérisation physico-chimique des différents matériaux utilisés pour la confection des mortiers. L'analyse granulométrique de sable de dune et les deux déchets céramiques montre que la majorité d'éléments ont des dimensions comprises entre 0,05 mm et 2.0 mm, ce qui indique qu'ils peuvent être classés d'un point de vue granulaire comme des matériaux fins.

Nous remarquons une prédominance de la silice dans tous les matériaux (> à 62% pour les déchets céramiques et plus de 92% pour le sable de dune). On trouve ensuite, par ordre décroissant des pourcentages, l'aluminium (Al_2O_3), le calcium (CaO), le fer (Fe_2O_3), et le potassium (K_2O); les autres éléments (tels que TiO_2 , SO_3 , MnO) sont sous forme de traces (< 1 %). L'utilisation des fines des déchets céramiques en tant que correcteur granulaire est intéressante en raison de sa disponibilité. Après l'opération du broyage, le produit final contient une très forte proportion de fines ; ce qui lui permet d'assurer le rôle de remplissage des vides inter-grains de sable de dune.

CHAPITRE III

Formulation des mélanges et propriétés du mortier frais

III.1.Introduction

Formuler un mortier consiste à choisir des constituants et à les proportionner en vue d'obtenir des propriétés spécifiques répondant à des critères techniques et économiques. Dans ce chapitre, nous proposons une méthode de formulation expérimentale basée sur la réalisation de gâchées successives.

Les essais correspondant à la formulation et aux propriétés du mortier frais ont été réalisés au sein du laboratoire LNHC de Djelfa.

III.2. Choix des paramètres

Cette étude porte sur l'influence du taux de substitution et de la nature des déchets céramiques sur les résistances mécaniques des mortiers à base de sable de dune à l'état durci à différentes conservations, ainsi que sur les principales caractéristiques des mortiers frais. Ce qui explique notre choix des paramètres à savoir :

- Correcteur granulaire: l'amélioration du mortier à base de sable de dune a été faite par la correction de la granulométrie du sable de dune par addition des fines de déchets céramiques. L'utilisation des fines de déchets céramiques en tant que correcteur granulaire est intéressante en raison de sa disponibilité. Après l'opération de broyage, le produit final contient une très forte proportion de fines ; ce qui lui permettra d'assurer le rôle de remplissage des vides inter-grains de sable de dune.
- Type des additions: Les additions des déchets céramiques sont choisies, d'une part, en fonction de leur fréquence d'utilisation réelle dans l'industrie des bétons et mortiers et, d'autre part, en fonction de leurs propriétés physico-chimiques, supposées influencer les paramètres des mortiers.
- Pourcentage des additions substitué au sable de dune : cinq pourcentages de substitution ont été retenus : 10%, 20%, 30%, 40% et 50%. Il est à remarquer que les recherches antérieures ont utilisé des pourcentage de 0% à 20% en remplacement du sable et de 0% à 5% en remplacement du ciment. D'autre part, on a limité le dosage en fines à 50 %. Car, et pour des raisons économiques, le pourcentage de l'agent de correction doit rester inférieur au pourcentage du matériau à corriger (sable de dune).

III.3. Formulation des mélanges

Dans cette étude, on a adopté la méthode de formulation d'un mortier normal. La quantité de ciment est fixée à 450 g, et celle du sable et fines à 1350g, et un pourcentage de participation massique des déchets céramiques variant de 0% à 50% avec un pas de 10%. Ce qui nous permet d'étudier l'influence de l'addition d'agents sur les propriétés physiques et mécaniques des mélanges étudiés.

Deux types d'éprouvettes de mortiers (1/3 de ciment + 2/3 de sable) sont confectionnés selon la norme NF EN 196-1. Dans le premier, nous avons le mortier témoin, confectionné selon la norme NF EN 196-1. Il est constitué, en masse, d'une partie de ciment (450kg/m^3), de 3 parties de sable de dune et/ou alluvionnaire et d'une demi-partie d'eau. Dans le deuxième type, les mortiers avec additions des déchets céramiques sont obtenus dans les mêmes conditions en remplaçant une fraction massique (taux de substitution) de sable de dune par l'addition des déchets à différents dosages (10%, 20%, 30%, 40% et 50%); les quantités de ciment et d'eau restent inchangées.

En fixant la quantité d'eau, l'effet réducteur d'eau de certaines incorporations des déchets n'est pas mis à profit; Cette approche permet de réduire le nombre de paramètres variant simultanément. C'est la raison pour laquelle nous avons travaillé à un rapport E/C constant.

Les différentes proportions des formulations des mortiers sont présentées dans le Tableau III.1.

Tableau III.1: Composition des mortiers

N°	Identification		Taux de substitution (%)	Ciment (g)	Additions CS/CF (g)	Sable (g)	E/C	
1	M _D		0	450	0	1350	0.7	
2	M _A		0	450	0	1350	0.7	
3	M _{S10}	M _{F10}	10	450	135	1215	0.7	0.75
4	M _{S20}	M _{F20}	20	450	270	1080	0.7	0.75
5	M _{S30}	M _{F30}	30	450	405	945	0.7	0.75
6	M _{S40}	M _{F40}	40	450	540	810	0.7	0.75
7	M _{S50}	M _{F50}	50	450	675	675	0.7	0.75

Nomenclature:

M_D : Mortier à base de sable de dune.

M_A : Mortier à base de sable alluvionnaire.

M_S : Mortier avec déchets céramique sanitaire (CS).

M_F : Mortier avec déchets céramique faïence (CF).

III.3.1. Préparation des mélanges

Tous les mélanges sont préparés dans les mêmes conditions dans une salle maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%. Trois Essais seront effectués pour tous les mélanges formulés. Le mélange doit être effectué par malaxage pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1, au Moyen du malaxeur spécifié par la norme NF P 15-411 (Figure III.1).



Figure III.1: Malaxeur normalisé pour pâte et mortier

a) Malaxage :

Le malaxage a une influence essentielle sur les caractéristiques des mortiers et bétons; il est indispensable, pour que le sable soit régulièrement dispersé et que le ciment soit bien réparti entre et autour de tous les grains inertes. Il faut, en outre que le ciment ne soit pas regroupé en grumeaux, mais régulièrement entouré d'une particule d'eau. Le mode opératoire est le suivant:

- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur; y verser ensuite le ciment. Aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage, introduire régulièrement le sable déjà préparé (dans le cas de mortier) pendant les 30 s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30s. Pendant les 15 premières secondes, racler Les bords du récipient.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60s.
- Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau III.2 :

Tableau III .2: Opérations de malaxage du mortier normal

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée des Opérations			30s	30s	30s	15s	75s	60s
Etat du Malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse Rapide	Arrêt		Vitesse Rapide

Le mélange préparé est mis en place par coulage et serrage; le coulage se fait en deux temps. Le moule est rempli aux trois quarts et il est soumis à 60 chocs jusqu'à l'apparition d'un léger ressuage. Ensuite, le moule est rempli totalement et le serrage du mortier dans le moule reprend pendant 60 chocs environ assuré par une table à chocs pour prisme de moules de mortiers (NF P 15-413).



Figure III.2 : Appareil à chocs

III.4 Méthodes expérimentales

III. 4.1 Essais réalisés

Toutes les formulations des mortiers étudiées ont été confectionnées suivant le même mode opératoire, avec des moyens matériels identiques, et coulées dans les mêmes géométries de moules dans des conditions similaires.

Les méthodes utilisées dans chaque essai étaient les suivantes:

- * La maniabilité des mortiers est mesurée au maniabilimètre à mortier NF P 18-452; L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement d'un mortier frais soumis à des vibrations.
- * La Masse volumique du mortier frais - selon EN 1015-6, en utilisant trois échantillons par type de mortier.
- * La Masse volumique du mortier durci selon l'AFPC-AFREM, à l'aide de trois prismes de mortier ($40 \times 40 \times 160$) mm³, par formulation, après 28 jours de durcissement.
- * Les Résistances à la flexion et à la compression du mortier durci selon EN 1015-11, sur trois éprouvettes ($40 \times 40 \times 160$) mm³ pour la résistance à la flexion et six éprouvettes ($40 \times 40 \times 80$)mm³ pour la résistance à la compression par mortier, après 28 jours de durcissement dans différents environnements.

- à l'air libre à l'intérieur de laboratoire $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 50% HR".
- en immersion dans l'eau ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 100% HR)
- au climat chaud (conditions d'un climat chaud et sec " la température dans l'étuve est maintenue à $52 \pm 2^{\circ}\text{C}$, l'humidité à l'intérieur de l'étuve est très basse").

* Absorption d'eau par capillarité de mortier durci selon EN 1015-18: trois échantillons ($40 \times 40 \times 160$) mm³ par mortier, après 28 jours de durcissement.

* Porosité ouverte - selon la norme ASTM désignation C642, trois spécimens de 28 jours par type de mortier;

* Méthode de caractérisation expérimentale de la carbonatation accélérée – Diffusion du CO₂.

* Méthode de caractérisation thermique adaptée à l'étude des transformations qui se produisent avec une consommation ou une libération d'énergie (analyse thermique différentielle : ATD), (analyse thermogravimétrique : TG). Elle est utilisée dans notre étude pour quantifier la portlandite et les C-S-H formés lors de l'hydratation en déterminant la perte de masse liée à la déshydratation de la portlandite et la décarbonatation de la calcite lors de l'accroissement de la température.

* les performances de durabilité vis-à-vis des milieux acides des mortiers selon la norme ASTM C267-96

* Résistance à l'adhérence du mortier durci selon EN 1015-12. Un test d'adhérence a été développé, basé sur les essais de flexion 3 points. Les échantillons sont des éprouvettes bi-composantes ($40 \times 40 \times 160$) mm³. Une moitié de l'échantillon représente le support à réparer, et l'autre moitié laisser bi-composant est le mortier de réparation coulé dans le moule contenant la partie support.

III.5 Caractérisation à l'état frais

Lors de la fabrication, la caractérisation des mortiers est nécessaire. Elle consiste à connaître leur comportement à l'état frais à partir de tests simples et reproductibles. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier rapidement la fluidité du matériau.

III.5.1 Essais de maniabilité

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du mortier; elle se définit comme la facilité offerte à la mise en place. L'essai adopté pour déterminer l'ouvrabilité de mortier est l'essai mesurant le temps d'écoulement, par le maniabilimètre à mortier LCPC, conformément à la norme NFP 18-452.

Ce moyen de mesure est tout à fait convenable pour l'étude, puisqu'il permet de déterminer la maniabilité grâce à un appareil simple et ne nécessite pas une grande quantité de matériau (un litre par mesure).

L'essai a pour but de classer les mortiers d'après leur aptitude à être mis en œuvre dans des conditions données. L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement d'un mortier par l'intermédiaire du maniabilimètre à mortier LCPC.

La maniabilité des mortiers est mesurée au maniabilimètre à mortier [NF P 18-452](#). L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement d'un mortier frais soumis à des vibrations. Il s'agit du temps nécessaire à un volume de mortier pour atteindre un repère tracé sur le maniabilimètre sous l'effet des vibrations déclenchées par un moteur. Le principe de fonctionnement est illustré sur la Figure III.3 et III.4.



Figure III.3: Essai sur la consistance du mortier
(Maniabilimètre)

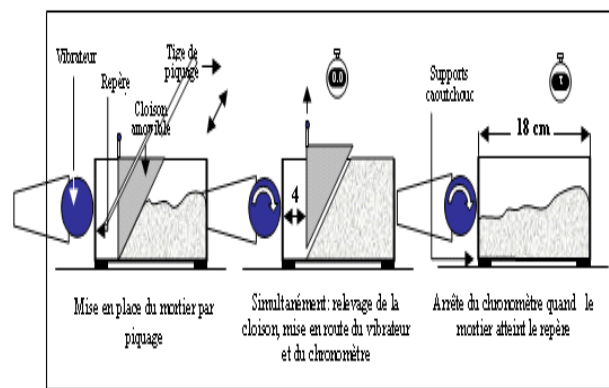


Figure III.4: Principe de fonctionnement du
maniabilimètre

La conduite de l'essai est comme suit : on introduit le béton dans la partie la plus grande délimitée par la cloison. Le béton est mis en place en 4 couches; chaque couche étant soumise à 6 coups au moyen de la tige de piquage. Quatre minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement du chronomètre. Sous l'effet de la vibration, le béton s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le béton atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier, le temps t mis par le béton pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le béton sera plus fluide et plus maniable. D'après la valeur du temps d'écoulement (t), on peut conclure que le mortier est :

- Ferme si $t \geq 40$ s,
- Très plastique si $20 \text{ s} < t \leq 30$ s,
- Plastique si $10 \text{ s} < t \leq 20$ s,
- Fluide si $t \leq 10$ s.

Les résultats présentés sur la figure III.5 montrent la variation du temps d'écoulement pour l'ensemble des compositions quel que soit le type et la teneur des déchets.

On remarque que la maniabilité pour les mortiers avec déchets céramiques est sensiblement identique à celle du mortier témoin (21s) pour un taux de substitution de 20% et 30% et un temps d'écoulement double pour le mortier contenant 40% et 50% de déchets (45s). Comme l'attestent les résultats de maniabilité, aucun mortier n'a posé de difficultés de mise en place lors de sa confection.

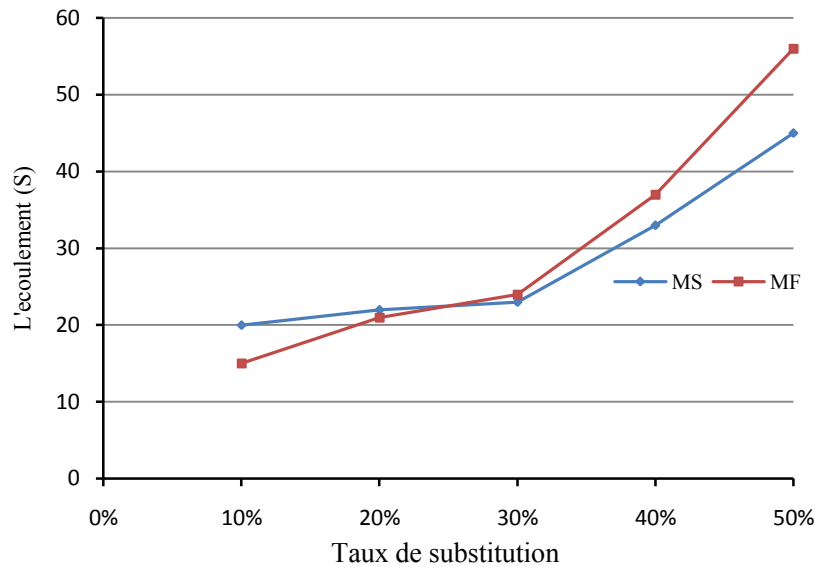


Figure III.5: Variation de l'écoulement en fonction du taux de substitution

Un léger abaissement de la fluidité des mortiers par l'addition des déchets céramiques faïence, a été observé. Ces résultats confortent ceux rapportés par [Khatib JM, 2005] et [Debieb.F.2008]. L'introduction spécifique de céramique sanitaire réduisait la quantité d'eau et augmentait la fluidité du mélange. Cela serait dû à la surface lisse ainsi qu'à l'absorption de ces agrégats.

III.5.2 Mesure de la masse volumique à l'état frais

Suivant la norme NF EN 1015-6, la masse volumique apparente du mortier est déterminée en calculant la masse de mortier contenue dans un volume connu, soit un échantillon de mortier frais avec un volume minimum de 3 litres (ou au moins 1,5 fois le volume nécessaire pour effectuer le test). Trois méthodes différentes de remplissage et de compactage du mortier à l'intérieur du récipient étalonné, qui doit avoir un volume d'environ 1 litre, sont indiquées dans la norme (le récipient utilisé pour déterminer la teneur en air du mortier frais convient).

La figure III.6 illustre les variations des masses volumiques des mortiers en fonction du type de l'addition de déchets qui est substituée au sable de dune.

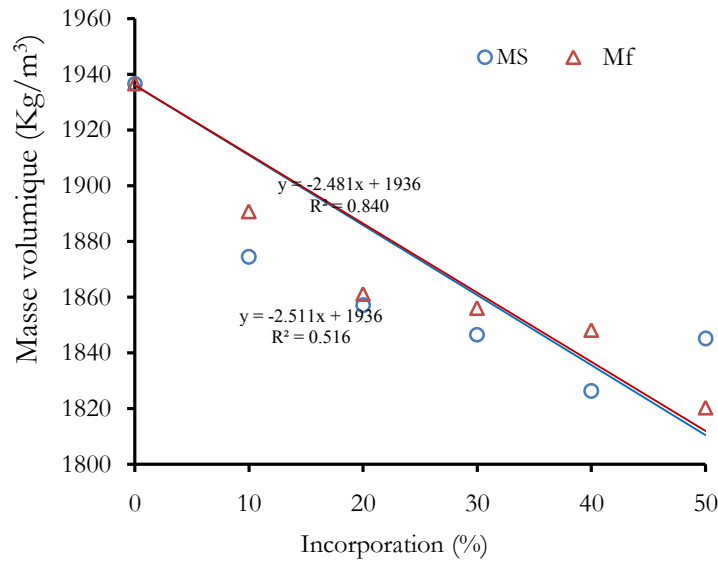


Figure III.6: Masse volumique des mortiers à l'état frais

D'une manière générale, les courbes dans la figure III.6 montrent que la masse volumique est décroissante avec le taux de substitution. Cette décroissance s'explique logiquement par le fait que les additions des déchets qui remplacent le sable ont une masse volumique réelle inférieure. Le remplacement du sable de dune par les déchets céramiques a entraîné une diminution de la masse volumique apparente.

III.6. Conclusion

Dans un mortier, les granulats apportent la consistance, le volume et la résistance. La nature des additions est souvent un critère fondamental de leur utilisation. Nous avons exposé dans ce chapitre les critères que doivent remplir les granulats par leur utilisation dans le mortier à base de sable de dune et les différentes formulations.

Nous avons utilisé les déchets de céramique dans le mortier en substitution d'une fraction massique du sable de dune, avec des taux de substitution de (10%, 20%, 30%, 40% et 50%). Dix compositions à base de sable de dune ont été mises au point, avec ou sans déchets céramiques, cinq incorporant de la céramique sanitaire et cinq autres avec des céramique faïence afin de réaliser une étude comparative entre ces deux mortiers modifiés et le mortier de référence.

Les essais de caractérisation à l'état frais réalisés montrant que l'augmentation de la fraction massique des déchets céramiques conduisent à une diminution de la masse volumique apparente et une maniabilité de l'ordre de 50s en fonction de l'augmentation des taux de substitutions.

Les résultats expérimentaux, présentés dans le quatrième chapitre, nous donneront des informations déterminantes quant à la possibilité de substitution des déchets céramiques et à la valorisation du sable de dune dans la formulation de mortiers performants vis-à-vis du comportement mécanique et de la durabilité.

CHAPITRE IV

Propriétés du mortier durci

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les différents résultats obtenus à partir des nombreux essais expérimentaux, réalisés sur les différentes formulations de mortiers à base de sable de dune. On comparera, ces résultats avec ceux de la bibliographie quand ils existent.

IV.2 Méthodes expérimentales

IV.2.1 Essais réalisés

IV.2.1.1 Mesure de la masse volumique à l'état durci

Les modes opératoires de détermination de la masse volumique apparente suivent la recommandation de l'AFPC-AFREM [AFREM, 1997].

Conduite de l'essai: On place les échantillons dans un dessiccateur étanche et on fait le vide pendant quatre heures. On introduit ensuite de l'eau dans le dessiccateur en trois périodes espacées d'une durée de quinze minutes. Au fur et à mesure, on fait le vide jusqu'à ce que les échantillons soient immergés d'environ 20 mm d'eau. On maintient les échantillons sous vide pendant $20 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$, à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Ensuite, on procède à une série de pesées des échantillons : une pesée dans l'eau (pesée hydrostatique) notée M_{eau} , ainsi qu'une pesée à l'air ambiant notée M_{air} . Enfin, on place les échantillons dans une étuve à $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que la différence entre deux pesées successives, avant et après un séjour de 24 h à l'étuve, ne diffère pas de plus de 0,05%.

La masse sèche après stabilisation est notée M_{sec} . La masse volumique apparente, exprimée en Kg/m^3 , est déterminée par la relation suivante :

$$\rho = \frac{M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \quad (\text{IV.1})$$

IV.2.1.2 Essais de caractérisation mécanique

IV.2.1.2.1 Essais de traction par flexion et compression

Le comportement mécanique de tous les mortiers a été étudié en flexion simple (3 points) et en compression uniaxiale sur des éprouvettes prismatiques ($40 \times 40 \times 160$) mm^3 . A chaque échéance, trois échantillons sont testés en flexion simple. La mesure de la résistance à la flexion a été effectuée sur une machine CONTROLS model L15, asservie en force, suivant une vitesse de chargement de 0,05 kN/s (figure IV.1).

La résistance à la flexion R_f (en N/mm^2) est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = \frac{1.5 L F_f}{b^3} \quad (\text{IV.2})$$

R_f : Résistance en flexion en $[\text{N}/\text{mm}^2]$ ou en $[\text{MPa}]$,

- b : Côté de la section carrée du prisme en [mm],
 F_f : Charge appliquée au milieu du prisme à la rupture en [N],
 l : Distance entre les appuis en [mm].

Les six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uniaxiale sur le bâti de compression, suivant une vitesse de chargement de 2,4 kN/s. (Figure IV.2).



Figure IV.1: Appareil Controls
essai de résistance à la flexion



Figure IV.2: Appareil Controls
essai de résistance de compression

On calcule la résistance à la compression comme suit:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (IV.3)$$

- R_c : Résistance à la compression en [MPa],
 F_c : Force maximale de compression en [N],
 A : Surface de l'éprouvette en [mm²].

IV.2.1.2.2 Module de déformation dynamique E_{dyn}

Le module dynamique est mesuré sur des éprouvettes ($4 \times 4 \times 16$) cm³ en faisant traverser l'échantillon par un train d'ondes ultrasonores. On mesure le temps nécessaire à l'onde pour se propager au travers le matériau. Connaissant sa longueur, on en déduit la vitesse du train d'onde traversant l'éprouvette.

Le module de déformation dynamique E_{dyn} est donné par l'Équation (IV.4):

$$E_{dyn} = V^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (IV.4)$$

Où

- V : Vitesse du train d'ondes (m/s),
 ρ : Masse volumique apparente de l'éprouvette (kg/m³),
 ν : Coefficient de poisson pris égal à 0,2.

IV.2.1.3 Durabilité

IV.2.1.3.1 Introduction

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...), 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... tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours du temps. Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton ou mortier 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 d'utilisation souhaitée. La durabilité du béton est en grande partie fonction de la difficulté des agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux du béton [Ollivier J-P. et Vichot A. 2008].

La durabilité est devenue une propriété primordiale pour développer la technologie du béton et construire des structures ayant une durée de service élevée, dans le but de réduire notre impact sur l'environnement tout en diminuant les coûts [Erdogan TY. 2002].

La durabilité du béton est liée à sa capacité de résister aux attaques physiques et chimiques perpétuées par son environnement [Mehta PK. 2001]. Les attaques les plus fréquentes sont la lixiviation et l'efflorescence, la carbonatation, l'alcali-réaction, les cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage, l'abrasion, les sulfates et les acides. Les facteurs clés responsables des attaques physiques et chimiques sont liés aux conditions environnementales (humidité et température par exemple) et aux mécanismes de diffusion au sein de la matrice cimentaire [Baradan B. 2002]. L'utilisation de sous-produits industriels en substitution du ciment ou des granulats (fumée de silice, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, verre broyé ou déchets non-organiques) semble être une bonne solution si leur tenue au sein du béton dans le temps n'est pas compromise. L'étude de la durabilité de tels bétons est donc un facteur clé afin de pouvoir réduire les coûts et l'impact sur l'environnement, et devient aussi importante que la résistance mécanique en compression [Muraz L. 2015].

IV.2.1.3.2: la porosité

La porosité est un paramètre essentiel qui caractérise la texture d'un béton ou d'un mortier. Il conditionne les propriétés mécaniques et physico-chimiques d'un matériau. La structure du mortier est caractérisée à l'aide de plusieurs paramètres tels que la porosité totale, le rayon moyen des pores et la distribution des tailles de pores. L'ensemble de ces paramètres conditionne non seulement les propriétés mécaniques, mais également celles liées à la durabilité du béton [Baroghel-Bouny, V., et Gawsewitch, 2000].

Les matériaux cimentaires sont constitués de phase solide et de pores vides généralement occupés par un fluide. La porosité est la fraction de volume total occupée par les vides.

La porosité d'un matériau poreux peut être composée de deux types de vide définis en fonction de leur position par rapport au milieu extérieur (Tableau V.1) on distingue ainsi:

- * les vides ouverts: les pores communiquent avec l'extérieur;
- * les vides fermés: les pores sont isolés, non accessibles et ne communiquent pas avec le milieu extérieur.

Tableau V.1 : Définition des différents types de porosité d'un matériau [Nicolas BUR.2012].

Porosité	Définition
Totale	Ensemble des vides fermés et ouverts
Résiduelle	Ensemble des vides fermés
Accessible	Ensemble des vides ouverts
Libre	Partie de la porosité accessible où les fluides peuvent librement circuler
Piégée	Partie de la porosité accessible ne permettant pas la récupération des fluides
Primaire	Ensemble des vides présents dès la mise en place du matériau (air occlus)
Secondaire	Ensemble des vides formés après la mise en place du matériau.

Les vides fermés n'intervenant pas dans les propriétés de transfert, nous nous intéresserons dans cette étude qu'aux vides ouverts.

La porosité primaire se forme au moment de la mise en place de la pâte: ce sont des vides quasi-sphériques dus à l'air occlus, c'est à dire entraînés dans la pâte au moment du malaxage.

La porosité secondaire se forme lors de la déshydratation du matériau, avec l'évaporation de l'eau interstitielle et l'apparition de fissures [Rougelot T. et all. 2010].

a) Porosité accessible à l'eau

Il est couramment admis que le comportement mécanique d'un matériau à matrice cimentaire dépend de sa porosité ; plus un matériau est compact, plus sa résistance attendue va être élevée.

Nous avons donc voulu suivre l'évolution de la porosité en fonction du dosage en déchets de céramique. Pour cela, nous avons mesuré la porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique suivant la procédure décrite dans ASTM désignation C642. Cette méthode consiste à mesurer la quantité d'eau nécessaire pour saturer un corps poreux.

L'essai consiste à déterminer par pesée les éléments suivants : la masse d'un corps d'épreuve sec, sa masse lorsqu'il est saturé en eau et son volume apparent par pesée hydrostatique.

Des éprouvettes (4×4×16) cm³ sont coulées et conservées pendant 28 jours à 20°C et 65 % d'humidité relative. Elles sont disposées dans un dessiccateur et sont saturées sous vide avec de l'eau. Par la suite.

M_{air} est déterminée par simple pesée et M_{eau} est mesurée par pesée hydrostatique. Au bout de ce temps, les éprouvettes sont placées dans l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. M_{sec} est alors déterminée par simple pesée. La porosité accessible à l'eau (P), exprimée en pourcentage en volume, est donnée par l'équation IV.5:

$$P(\%) = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (IV.5)$$

Avec :

M_{eau} : est la masse en g du corps d'épreuve immergé dans l'eau,

M_{air} : est la masse en g du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air,

M_{sec} : est la masse en g du corps d'épreuve sec.

Les valeurs de la porosité sont données avec une précision de 0,1 %.

IV.2.1.3.3 Absorption d'eau par capillarité

L'absorption par capillarité est le phénomène physique susceptible de faire pénétrer des substances agressives extérieures à l'intérieur du béton. En effet, le béton est un matériau qui possède des pores capillaires dont la dimension varie suivant ses caractéristiques de composition (rapport E/ L_{Equiv} , additions minérales, etc.). Lorsqu'un liquide se retrouve en contact avec ce type de pore, des tensions de surface font remonter ce liquide à l'intérieur du capillaire. Le liquide monte d'autant plus haut que le diamètre du capillaire est petit.

Les pores capillaires ouverts sur le milieu extérieur vont donc conduire, dans certaines conditions (principalement d'humidité), à laisser s'infiltrer par succion des liquides pouvant contenir des espèces chimiques potentiellement préjudiciables au bon fonctionnement et à la durée de vie du matériau [Tafraoui A. 2009].

Les mesures de capillarité sont réalisées selon les modalités de la norme NF EN 1015-18. Les mesures sont effectuées par immersion de la base carrée de 3 éprouvettes en position verticale sur une hauteur d'eau de 5 mm. La prise de masse est mesurée sur une durée de 24 heures par pesée sur une balance possédant une précision de 1 mg. Le coefficient d'absorption capillaire C_a est calculé sur la courbe de prise de masse en fonction de la racine carrée du temps, entre 10 et 90 minutes.

On calcule ainsi le coefficient C_a en $kg/m^2 \text{ min}^{1/2}$ par la formule IV.6 :

$$C_a = \frac{M}{S \cdot \sqrt{t}} \quad (IV.6)$$

M : prise de masse pendant le temps t

S : surface de la base carrée de l'éprouvette

t : période entre deux pesées

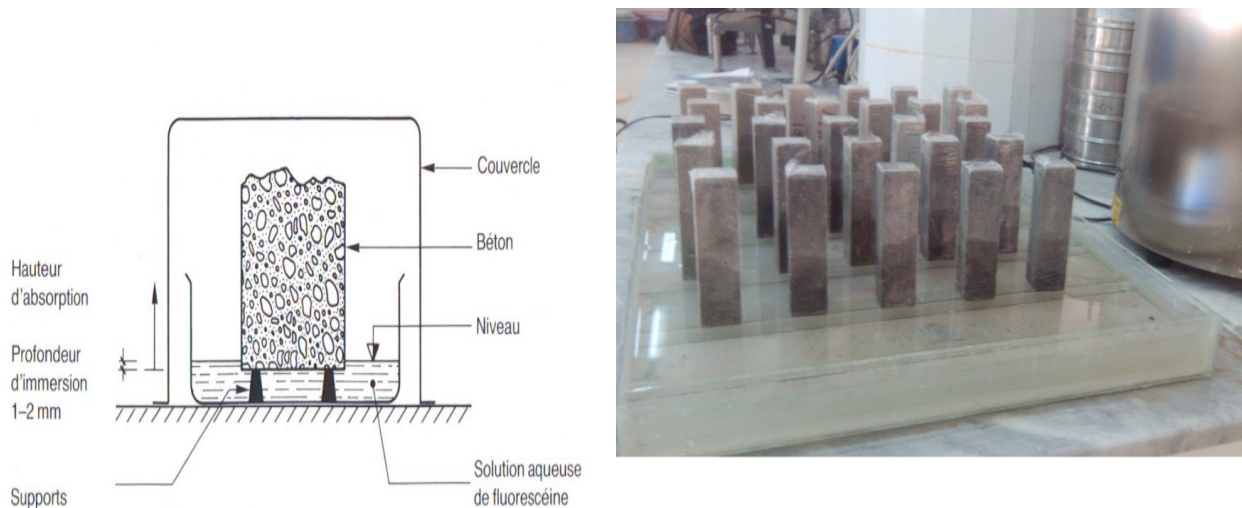


Figure IV.3: Dispositif de mesure de la capillarité

IV.2.1.3.4 La Carbonatation

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons. Elle correspond à la transformation progressive essentiellement d'un des composés du béton durci, la portlandite en calcite, au contact du dioxyde de carbone contenu dans l'air et en présence d'humidité. Le dioxyde de carbone CO_2 pénètre sous forme gazeuse dans le béton; il provoque une réaction, dite de carbonatation, avec l'eau interstitielle. Le front de carbonatation avance progressivement à partir du parement. Il transforme les hydroxydes [surtout, la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$] en carbonate (CaCO_3) et abaisse le PH de la solution interstitielle. Une des conséquences principales de la carbonatation est de favoriser la corrosion des armatures, lorsque le front de carbonatation les atteint.

IV.2.1.3.4.1 Méthodes de caractérisation expérimentale de la carbonatation accélérée – Diffusion de CO_2

La carbonatation est une source de dégradation des ouvrages en béton armé et nuit à leur durabilité. Dans l'atmosphère, la carbonatation est très lente et pour mieux évaluer ses conséquences à long terme, des essais accélérés sont réalisés en laboratoire. La diffusion désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe des différences de concentration entre deux points du milieu, il y aura un transport du constituant de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée [GAGNÉ R., GCI 714, 2000].

Les transports par diffusion peuvent se produire sous deux formes:

- En phase liquide (ions chlore, sulfates)
- En phase gazeuse (oxygène, CO_2).

Le transport en phase gazeuse concerne, par exemple, la diffusion de la vapeur d'eau dans un béton partiellement saturé ou la diffusion de l'oxygène ou du CO_2 . L'essai de carbonatation des bétons peut être effectué selon deux modes d'exposition :

a) Carbonatation naturelle

La carbonatation naturelle des éprouvettes est évidemment la méthode la plus proche de la réalité. Cet essai reflète davantage la réalité car il consiste à conserver des échantillons directement à l'air libre, en salle ou in situ. Mais, elle est très longue (il faut plusieurs d'années pour mettre en évidence le phénomène) et il est très difficile de maintenir pendant un tel temps des conditions constantes. Il faut donc disposer d'une méthode précise de carbonatation en laboratoire, permettant d'accélérer le phénomène et de maintenir des conditions aux limites stables.

b) Carbonatation accélérée

L'objectif de l'essai est de caractériser le comportement d'échantillons de mortier vis-à-vis de la carbonatation. Le principe des essais de carbonatation accélérée est de soumettre les échantillons à un environnement riche en CO_2 sous une humidité relative contrôlée. L'attaque au gaz carbonique est réalisée par un essai accéléré selon les recommandations françaises AFPC-AFREM (AFPC-AFREM, 1997). Pour cet essai, une teneur en CO_2 de 50% et une humidité relative de $60 \pm 10\%$ ont été utilisées.

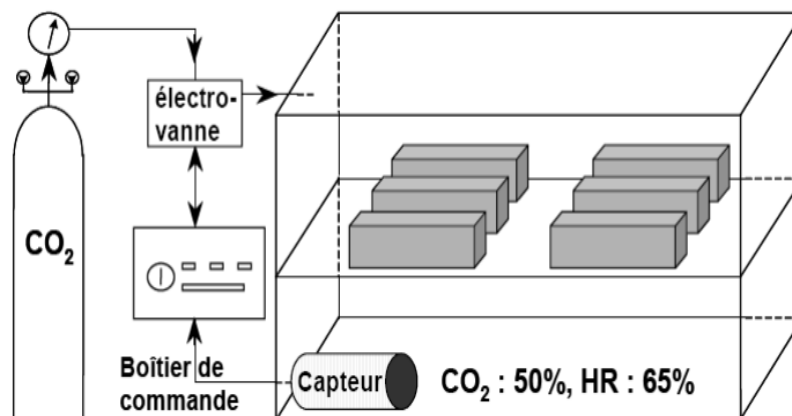


Figure IV.4: Schéma de l'enceinte de carbonatation accélérée

Les mesures correspondent aux distances (en mm) entre la surface externe du béton et le front de coloration, en dehors de zones particulières (coins et interfaces pâte granulat).

IV.2.1.3.4.2 Détection par pulvérisation à la phénolphthaléine

La plus répandue des techniques utilisées pour quantifier la cinétique de carbonatation est la détection d'une limite en deçà de laquelle le pH avoisine 9 appelée front de carbonatation détecté par le virage coloré de la phénolphthaléine. Cette dernière est répandue sur un échantillon fraîchement fendu,

la partie non carbonatée se colore alors en rose tandis que la partie carbonatée reste incolore (figure IV.5).



Figure IV.5 : Détection par pulvérisation à la phénolphthaléine

L'avantage de cette technique est qu'elle révèle une ligne d'équi-pH (pH autour de 9) correspondant à la valeur limite de pH en dessous de laquelle il y a risque de corrosion [Saeki N. et all. 1983, N. Kashino N. 1984]. En revanche, elle présente un inconvénient majeur qui consiste en le fait que la corrosion des armatures peut démarrer à un pH supérieur à 9. En effet, sachant que la dépassivation des armatures peut se produire pour un pH égal à 11,4 [Parrott L.J. 1987], il est probable que la zone où il y a risque de corrosion soit plus profonde dans le matériau que le front relevé par la phénolphthaléine (pH = 9 à ± 1 unité pH près).

IV.2.1.3.5 Durabilité vis à vis à l'action des acides: Attaque par les acides

Pour la caractérisation de la résistance chimique vis-à-vis de l'attaque d'acide sulfurique et chlorhydrique (HCL), des éprouvettes de mortier (40x40x160) mm³ ont été confectionnées selon la norme NF EN 196-1, conservées 28 jours dans l'eau à une température de 20 °C \pm 2 °C. Après la durée de cure sous l'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse des échantillons de mortier avant leur mise dans la solution d'attaque. Les échantillons sont ensuite mis dans une solution de 5% H₂SO₄ pour les deux types de mortier (M_S et M_F).



Figure IV.6: Mortier immergé dans la solution de concentration 5%

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions est évaluée selon la norme ASTM C 267-96; les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau distillée pour éliminer le mortier altéré. Après une demi-heure, une pesée est enregistrée. La balance utilisée était de précision 0,01 gr. Cette opération est effectuée chaque semaine pendant 90 jours. La variation du poids des éprouvettes est examinée après 7, 14, 21, 28, 30, 60 et 90 jours. La solution chimique est renouvelée tous les 7 jours et la solution d'attaque est renouvelée selon la valeur du pH. Le degré de l'attaque est évalué selon l'expression suivante:

$$M_t = \left(\frac{M_t - M_i}{M_i} \right) \times 100 \quad (\text{IV.7})$$

M_t : Masse (gr) à l'instant t,

M_i : Masse (gr) initiale avant exposition à l'acide sulfurique.

IV.3 Etude des propriétés d'adhérence des mortiers

IV.3.1 Généralités

L'objectif de cette recherche est de mieux comprendre l'influence de la présence de déchets céramique sur la durabilité des réparations des ouvrages en béton. Pour cela, la composition et les propriétés de plusieurs produits de réparation ont été analysées. Les mortiers à base de sable de dune modifiés par des déchets ont été formulés en laboratoire. Deux déchets céramiques couramment utilisés pour ce type d'application ont été utilisés: sanitaire (blanche) (CS) et de faïence (rouge) (CF). Deux points principaux ont été étudiés: l'adhérence du produit de réparation au support endommagé et l'environnement du système support/réparation.

On peut définir l'adhérence comme la force qu'il faut fournir au système adhérent pour séparer deux constituants. Il faut distinguer l'adhérence de l'adhésion. En effet, l'adhésion est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui sont responsables de la formation et de la cohésion des interfaces entre deux corps [Darque-Cerreti E. et Felder E. 2003]. Dans le domaine des mortiers appliqués sur un support, l'adhésion est liée à plusieurs facteurs [Nicot Pierre M.2008]:

- l'adhésivité qui est l'aptitude à créer des forces d'interactions entre le support et le mortier,
- l'état de surface et la nature du support (porosité, rugosité, absorptivité, état de propreté),
- la mouillabilité qui réside dans l'aptitude du mortier à créer un contact avec le support sur lequel il est appliqué.

L'adhésion peut être divisée en deux types :

- l'adhésion chimique qui est la capacité à créer des liaisons chimiques fortes ou « physiques » faibles,
- l'adhésion mécanique (ancrage mécanique) qui est la capacité du mortier à « pénétrer » dans le support au travers de la porosité ou de la rugosité par exemple.

IV.3.2 Conditions expérimentales du test d'adhérence

IV.3.2.1 Test d'adhérence par flexion trois points

Nous avons choisi d'utiliser un test de flexion trois points pour qualifier et quantifier l'adhérence. Deux raisons majeures ont guidé ce choix: la première est la facilité d'utiliser cette technique avec un appareillage maîtrisé, la deuxième est la possibilité d'exploiter les résultats en les mettant parallèlement avec les propriétés intrinsèques du support. Le déroulement de la mesure est identique à celui de la mesure de la résistance à la flexion d'une éprouvette (4x4x16) cm³ qui est centrée sur les deux appuis inférieurs en s'assurant que l'appui supérieur sollicite l'interface support/mortier de réparation.



Figure IV.7: Teste d'adhérence des mortiers

Les étapes du coulage du mortier restent les mêmes que celles utilisées pour la fabrication d'éprouvettes « classiques ». La Figure V.8 résume les étapes de fabrication des éprouvettes bicomposées.

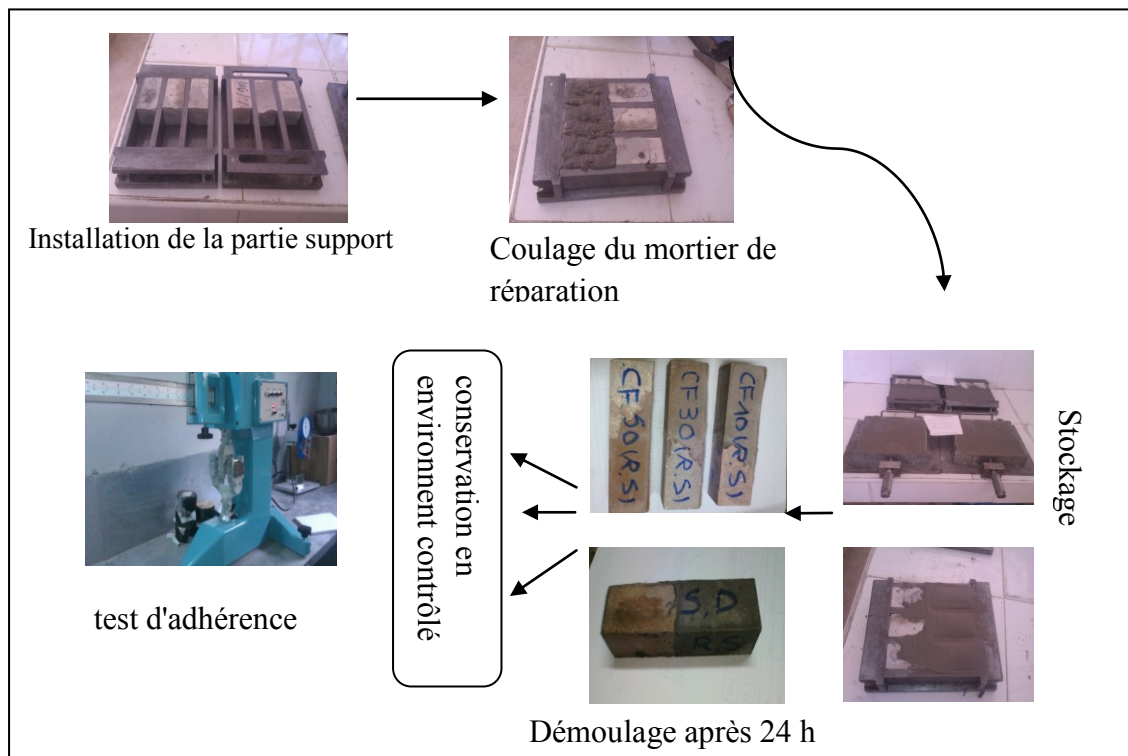


Figure IV.8: Étapes de fabrication des éprouvettes bicomposées

IV.3.2.2 Paramètres étudiés

Plusieurs facteurs entrent en jeu au cours du collage de deux matériaux [L. Courard, 1998]. Nos travaux se sont focalisés sur les trois facteurs décrits ci-dessous :

* Nature et quantité des déchets céramiques utilisés dans les mortiers modifiés.

* État de surface du support.

- (a) Surface sèche et rugueuse S_R , (b) Surface sèche et rugueuse oblique (S_{RO}), (c) Surface saturée en eau et rugueuse (S_{SR}), (d) Surface saturée en eau et rugueuse oblique (S_{SRO}).



Figure IV.9: État de surface du support

* Environnement du système support/réparation

- En immersion dans l'eau.
- Environnement ambiant contrôlé (à l'air libre).
- Environnement chaud.

IV.3.2.3 Contrainte d'adhérence et Modes de rupture

L'essai de flexion trois points permet de mesurer la contrainte à la rupture des éprouvettes. Plus cette contrainte est élevée, plus l'interaction entre le mortier et le support est forte. Suivant la zone de rupture dans l'éprouvette bicomposée, trois types de rupture sont possibles :

* Les ruptures adhésives (A) : ce type de rupture a lieu à l'interface entre le mortier et le support. Il dénote une absence d'adhérence entre le mortier de réparation et le mortier support.

* Les ruptures cohésives : les ruptures sont de ce type quand elles n'ont pas lieu à l'interface entre les deux parties. Elles peuvent avoir lieu soit dans le mortier support soit dans le mortier de réparation. L'obtention d'une rupture cohésive par rapport à une rupture adhésive caractérise une bonne adhésion entre les deux parties du système bicomposé et montre que le point faible du système ne se situe pas à l'interface [Courard L. 1998].

IV.4 Résultats et discussions

IV.4.1 Masse volumique des mortiers durcis

La figure IV.10 illustre les variations des masses volumiques des mortiers en fonction du type et du pourcentage de l'addition de déchets qui est substituée au sable de dune.

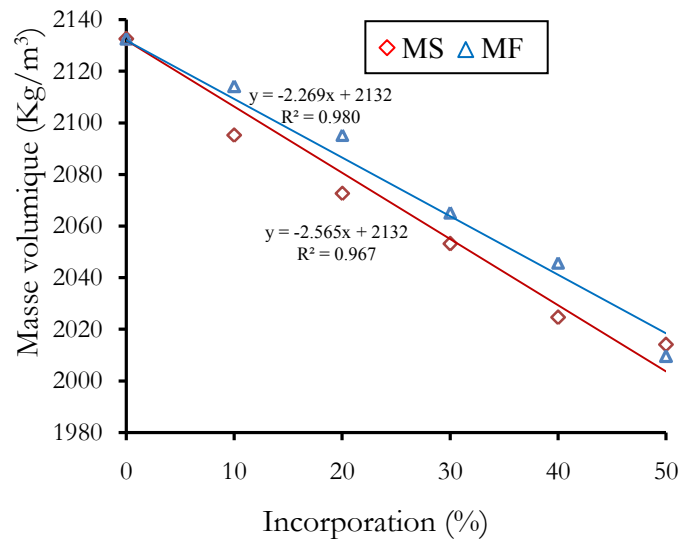


Figure IV.10: Masse volumique des mortiers durcis

D'une manière générale, les courbes de Figure IV.10 de masses volumiques sont décroissantes avec le taux de substitution. Cette décroissance s'explique logiquement par le fait que les additions des déchets qui remplacent le sable ont une masse volumique réelle inférieure. La tendance de cet essai était la même que celle du test de la masse volumique à l'état frais des mortiers. Le remplacement du sable de dune par les déchets céramiques a entraîné une diminution de la masse volumique apparente.

IV.4.2 Résistances mécaniques

Dans le but d'étudier l'influence de déchets céramiques sur le comportement mécanique d'un mortier, on a montré la pertinence d'une démarche comparative entre un mortier de référence et des composites Mortier-céramique de différents teneurs en céramique. Notre objectif étant d'analyser l'évolution de la résistance mécanique, nous étudions les principales caractéristiques mécaniques obtenues lors des chargements d'application de courte durée: résistances mécaniques en traction par flexion et en compression. Dans cette optique, nous nous intéresserons uniquement au comportement mécanique des différentes formulations utilisant les deux types des déchets et dans différents modes de conservation.

Les essais mécaniques ont été effectués à 2, 7 et 28 jours de durcissement sur des mortiers à base de sable de dune composés de 10%, 20%, 30%, 40% et 50% de déchet de céramique.

Les résultats obtenus de l'évolution des résistances mécaniques à la compression et à la flexion des éprouvettes de mortiers conservés dans différents environnements (à l'air libre, au climat chaud, en immersion d'eau) pendant 28 jours, sont récapitulés dans les figures (IV.11 à IV.22).

Les gains de résistance à la compression et à la flexion des différentes compositions avec ajouts de déchets céramique par rapport au mortier de référence sont montrés dans les figures (IV.23 à IV.25).

IV.4.2.1 Résistance à la compression

Le développement de la résistance à la flexion et à la compression en fonction de l'âge pour les différents types de mortiers conservés dans l'eau, au climat chaud et à l'air libre est donné par les figures de IV 11 à IV 16.

IV.4.2.1.1 Mortiers conservés dans l'eau

D'après les figures IV.11 et IV.12, on remarque que, pour tous les mortiers modifiés la résistance à la compression augmente progressivement avec l'âge de conservation dans l'eau. Ceci peut s'expliquer par le développement du phénomène d'hydratation du ciment dans les mortiers en fonction du temps en présence d'humidité suffisante. Dès l'échéance de 2 jours, l'ensemble des mortiers développe des résistances en compression dépassant la valeur de 6 MPa. A 28 jours, le M_D (mortier à base de sable de dune) ayant atteint la résistance mécanique maximale, soit 21,5 MPa et 16.3 MPa, est le M_D avec des déchets céramiques sanitaire et faïence respectivement ($M_{S50\%}$, $M_{F50\%}$). Nous pouvons également remarquer que les M_D avec céramique sanitaire ont développé des résistances supérieures par rapport à ceux incorporant des déchets céramiques faïence. On peut observer qu'au bout de 28 jours, la résistance à la compression du mortier est considérable, elle est de l'ordre de 115% et 160% avec un taux de substitution des déchets de céramiques de 30%; 40% et 50%.

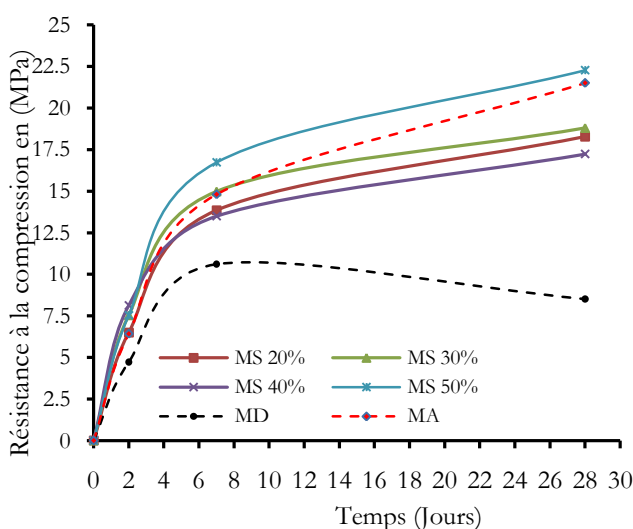


Figure IV.11: Résistance à la compression en fonction de la durée de conservation (Ms)

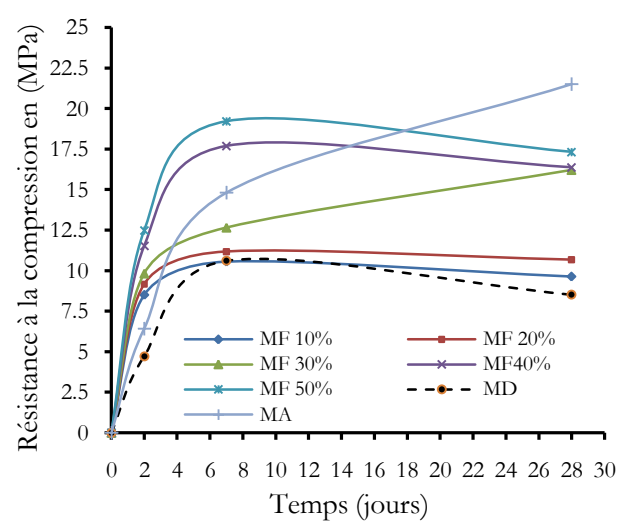


Figure IV.12 : Résistance à la compression en fonction de la durée de conservation (M_f)

IV.4.2.1.2 Mortiers conservés à l'air libre

les résistances des essais sur éprouvettes (4 x 4 x 16) cm³, des mortiers conservés à l'air libre sont illustrés par des figures IV.13 et IV.14. On constate que les résistance de tous les mortiers augmentent régulièrement au jeune âge de conservation des éprouvettes. A 28 jours les mortiers Ms de 10% à 40% et Mf de 10% à 40% présentent une chute de résistance. Les mortiers avec 10%, 20% et 30% des déchets céramiques présente la plus faible performance qu'on attribue au fort taux de granulats céramique et à la forte quantité d'eau absorbée. En général, on observe une augmentation significative de résistance de l'ordre de (12%, 39%) en fonction du temps et du pourcentage de déchets céramiques entre (30% et 50%).

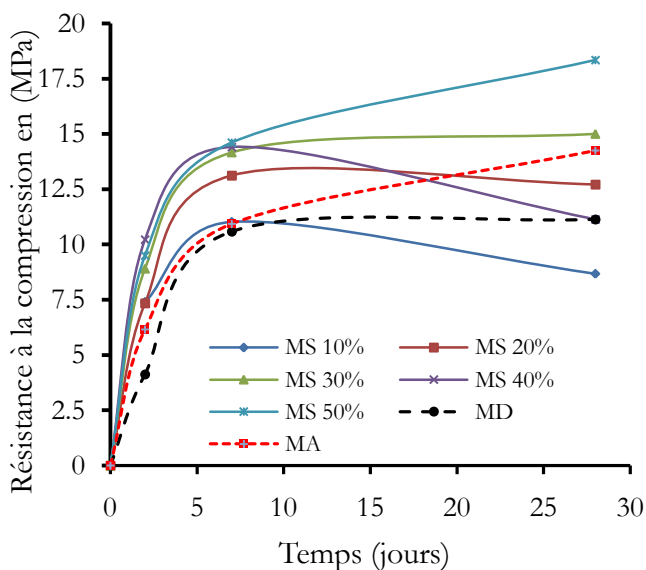


Figure IV.13: Influence de la teneur en céramique sur la résistance en compression des différents mortiers (Ms)

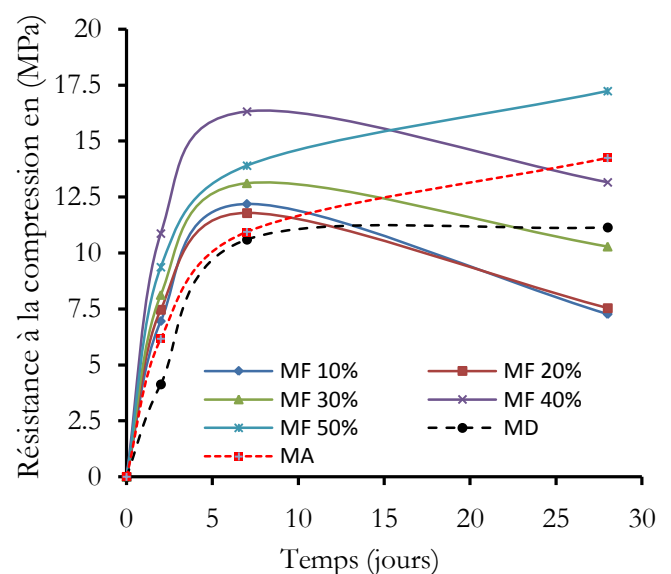


Figure IV.14: Influence de la teneur en céramique sur la résistance en compression des différents mortiers (Mf)

IV.4.2.1.3 Mortiers conservés au climat chaud

Les figures IV.15 et IV.16 présentent l'évolution de la résistance mécanique à la compression pendant la cure pour le mortier de référence et les mortiers à base de granulats des déchets céramiques recyclés. On note un comportement similaire pour l'ensemble des mortiers. Cependant, les mortiers à base de granulats recyclés ont des résistances élevées à jeune âge avec une cinétique d'hydratation plus rapide. Ce qui peut être expliqué par l'élévation de température entraîne une prise accélérée de la pâte. Cette résistance à jeune âge est similaire pour l'ensemble des mortiers à base des déchets céramiques quel que soit le pourcentage de recyclât.

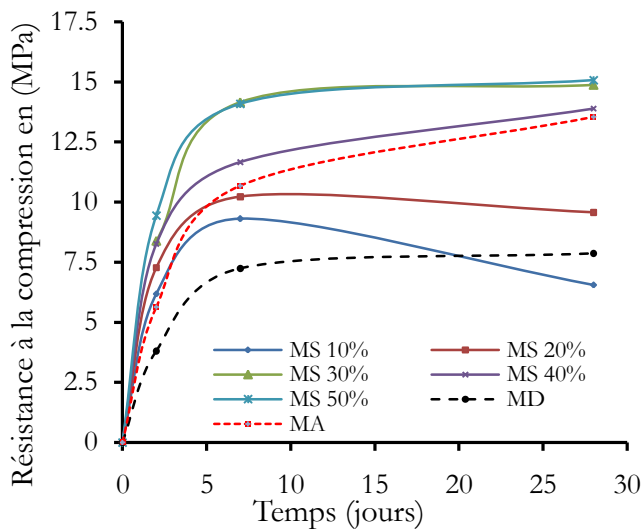


Figure IV.15: Influence de la teneur en céramique sur la résistance en compression des différents mortiers(Ms)

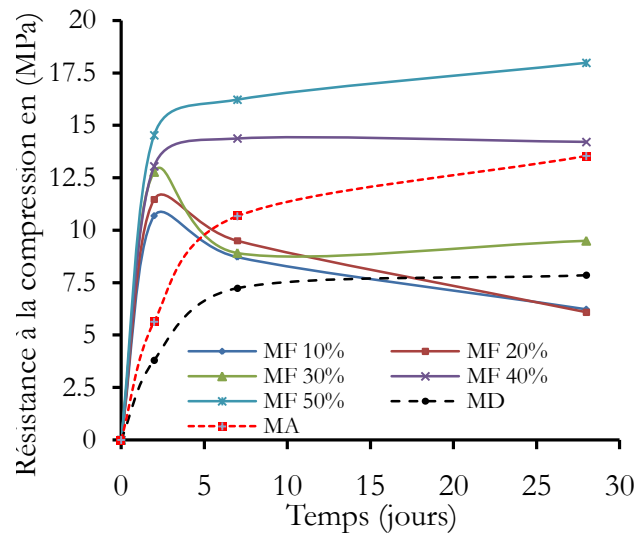


Figure IV.16: Influence de la teneur en céramique sur la résistance en compression des différents mortiers(Mf)

Les déchets céramiques améliorent les résistances en compression à 28 jours de l'ordre de 80%. Pour les mortiers ($M_{S50\%}$ et $M_{F50\%}$); ils atteignent les 120% en résistance, sauf pour les ($M_{S10\%}$, $M_{F10\%}$ et $M_{F20\%}$) où on a une diminution par rapport au mortier de référence ceci est dû au faible pourcentage des déchets céramiques ajouté. Ces résultats confirment le rôle des déchets dans le comportement mécanique des mortiers.

IV.4.2.2 Résistance à la flexion

IV.4.2.2.1 Mortiers conservés dans l'eau

Des essais d'évaluation de la résistance à la flexion ont été réalisés en parallèle à l'essai de compression similitude des figures de IV.11, IV.12. Les résistances à la flexion sont illustrées dans les figures IV.17, IV.18.

Les valeurs des résistances à la traction par flexion des mortiers confectionnés en remplaçant une partie du sable de dune par une addition, est une fonction croissante du temps aux différentes échéances, et quelque soit la nature et le taux de l'incorporation des déchets.

Les résistances à la flexion obtenues, sont assez proches. On note une augmentation importante de la résistance à la flexion plus sensible pour les mortiers avec les additions des déchets céramique. La nature d'addition semble être un paramètre plus important que le taux de substitution. Il apparaît que les pourcentages d'amélioration de la résistance en flexion des deux déchets céramiques sont du même ordre de grandeur (34%). En particulier, le mortier de référence présente des résistances en flexion inférieures à celles des mortiers modifiés. Nous constatons, par ailleurs, que la résistance en flexion varie globalement de la manière semblable à la résistance en compression. les résultats indiquent que les déchets ont une influence très peu significative.

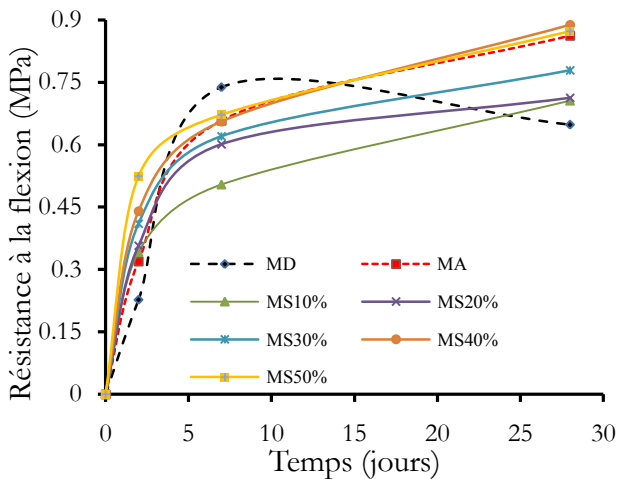


Figure IV.17: Influence de la teneur en céramique sur la résistance à la flexion des différents mortiers(Ms)

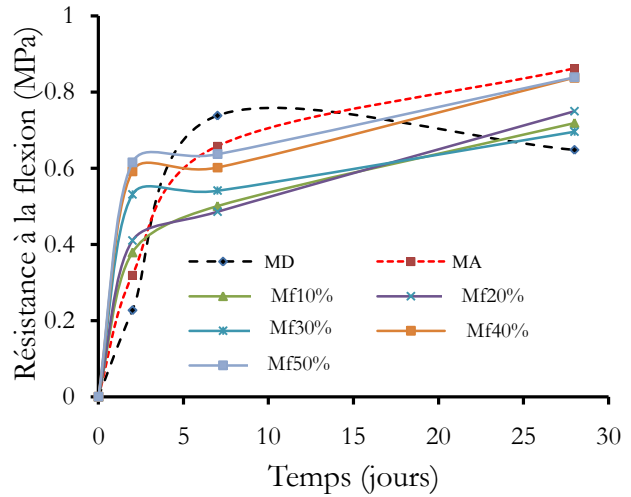


Figure IV.18: Influence de la teneur en céramique sur la résistance à la flexion des différents mortiers (Mf)

IV.4.2.2.2 Mortiers conservés à l'air libre

Les résultats de la résistance à la flexion pour les mortiers conservés à l'air libre en fonction du temps sont donnés par les courbes dans les figures IV.19 et IV.20. D'après ces résultats on remarque que, la résistance à la flexion augmente avec l'âge pour tous les mortiers(M_s) et en fonction du pourcentage. D'autre part, Les mortiers avec 10 % et 20% de déchets céramiques (M_f) présente la plus faible performance qu'on attribue au faible taux de granulats céramiques. Le M_D qui est le mortier témoin a la plus faible résistance.

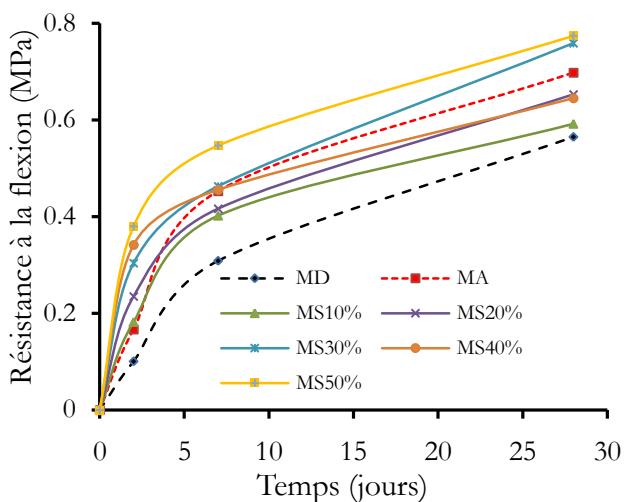


Figure IV.19: Influence de la teneur en céramique sur la résistance à la flexion des différents mortiers (Ms)

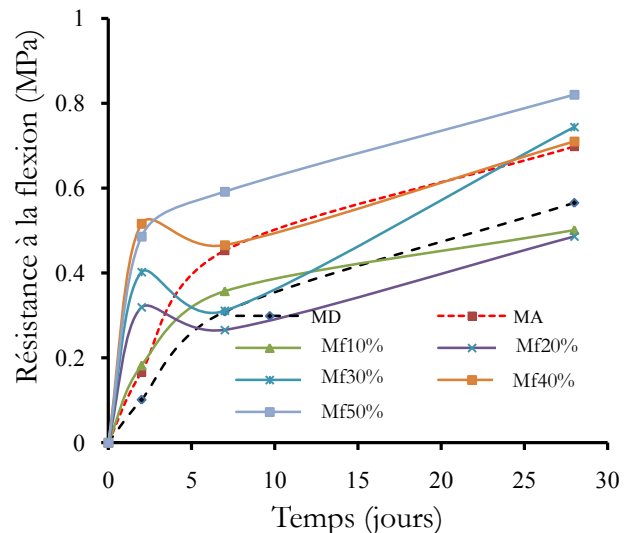


Figure IV.20: Influence de la teneur en céramique sur la résistance à la flexion des différents mortiers (Mf)

IV.4.2.2.3 Mortiers conservés au climat chaud

L'effet des conditions climatiques sur les résistances à la traction des éprouvettes étuvés est illustré sur les figures IV.21 et IV.22. D'après ces figures, on constate que les éprouvettes (M_F) conservées dans l'étuve ont atteint des résistances remarquables à l'âge de 2j, alors que celles des éprouvettes (M_S). Ceci est dû essentiellement à l'influence de la haute température qui a favorisé l'hydratation du ciment et le taux d'absorption d'eau élevée des déchets (CF). A 7j, les résistances des éprouvettes (M_S) ont continué à se développer normalement alors que celles des éprouvettes (M_F) présentent les plus faibles résistances. On peut expliquer ceci par l'évaporation de l'eau de gâchage est inévitable et l'hydratation est par la suite affectée ce qui se traduit par une baisse du développement des résistances. Toutefois, et à 28 jours, les mortiers avec un taux de substitution plus de 40% de déchets ont marqué une légère amélioration et ont développé des résistances supérieures à celles des éprouvettes de mortiers à base de sable de dune.

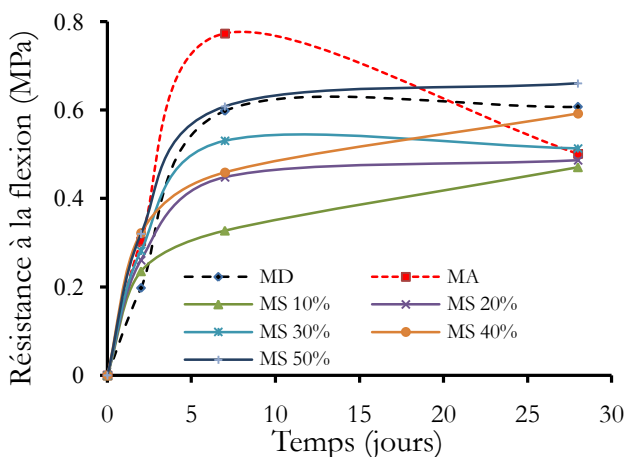


Figure IV.21: Influence de la teneur en céramique sur la flexion des différents mortiers (M_S)

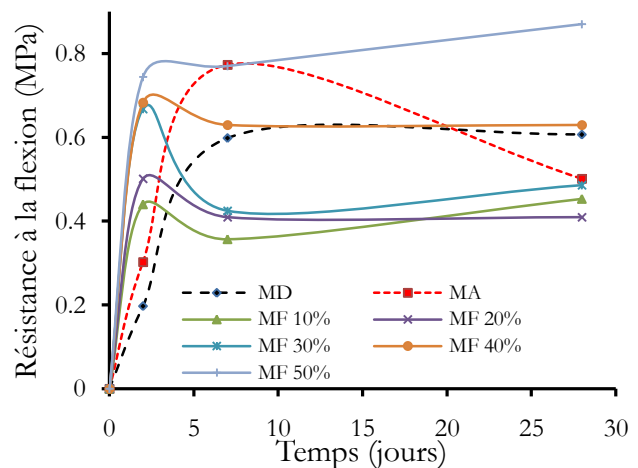


Figure IV.22: Influence de la teneur en céramique sur la résistance à la flexion des différents mortiers (M_f)

le traitement thermique à l'étuve conduit à une baisse significative des résistances en flexion. Cette décroissance était de l'ordre de 20%. Une explication approchée réside dans le fait que les éprouvettes ayant été laissées sans traitement pendant 28 jours (absence l'humidité), il est probable qu'une grande partie de leur eau de gâchage soit évaporée. En conséquence, l'hydratation du ciment et le développement de la résistance ont été arrêtés. De plus, la température enregistrée au niveau de l'étuve a sûrement favorisé le développement des microfissures à l'intérieur des éprouvettes ce qui s'est traduit par la décroissance des résistances à 28 jours.

IV.4.2.3 Discussions

Les augmentations des résistances mécaniques sont dues à trois effets: la bonne liaison liant / agrégat [J. Silva et al. 2010, I. Martínez et al. 2013, P. Torkittikul et A. Chaipanich, 2010], la résistance plus élevée de l'agrégat sanitaire par rapport à l'agrégat naturel [A.V. Alves, 2014, T. Vieira et al. 2016] et un éventuel effet pouzzolanique de cet agrégat recyclé [C. Farinha 2015].

L'augmentation de la résistance due à l'incorporation de granulats fins était attendue. En raison d'un effet de remplissage, les particules sanitaires remplissent les vides entre les agrégats de sable et rendent les mortiers plus compacts et donc plus résistants. Cette compacité accrue a été observée dans plusieurs essais réalisés dans ce travail de recherche: le module d'élasticité, la vitesse d'impulsion ultrasonore et la porosité ouverte.

Des recherches antérieures ont expliqué que la texture superficielle de l'agrégat joue un rôle important dans la résistance à la compression des mortiers [Westerholm M. et al. 2008, Özkan Ö et Yüksel I. 2008]. L'adhérence entre la pâte et l'agrégat au niveau de la zone interfaciale sera améliorée

lorsqu'un agrégat de texture plus rugueux est utilisé, conduisant ainsi à une augmentation de la résistance à la compression [Neville AM. 1997]. De plus, la forme irrégulière fournit la liaison la plus élevée entre l'agrégat céramique recyclé et la pâte. [Metha PK. et Monteiro PJM. 2004]. Ceci est cohérent avec la conclusion de cette étude, dans laquelle la résistance à la compression du mortier contenant des déchets céramiques était plus élevée que celle du mortier de témoin.

De plus, l'agrégat céramique pourrait présenter une faible activité pouzzolanique dans la partie superficielle du fait de sa composition chimique et de sa granulométrie, suffisante pour réagir avec la portlandite présente en périphérie de l'agrégat, donnant naissance à des produits hydratés tels que les hydrates de silicate de calcium (CSH) et des hydrates d'aluminate de calcium qui présentent une structure moins poreuse et plus compacte, formant une zone de transition agrégat / pâte plus stable.

D'autre part, cet agrégat céramique présente une composition chimique (présence de: Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , et autre) typique des matériaux pouzzolaniques [S. Santamaria F. 1983, Calleja Carrete J., 1970] qui contiennent de l'alumine et du verre de silice. Le fait que ces déchets céramiques soient incorporés avec une granulométrie supérieure à 4 mm fait que l'activité pouzzolanique sera présente uniquement dans la partie superficielle de l'agrégat, ce qui est suffisant pour produire une réaction avec une partie de la portlandite présente au voisinage des granulats, donnant naissance à des produits hydratés ayant des propriétés d'agglomération telles que les hydrates de calcium-silicate (CHS) et les hydrates de calcium-aluminate avec une structure moins poreuse et plus compacte [C. Medina et al. 2012].

IV.4.2.4 Gains de la résistance

Les figures IV.23, IV.24 et IV.25 montrent l'influence du pourcentage du déchet de céramique additionné au mortier à base de sable de dune, sur le développement des performances mécaniques des mortiers modifiés à 28 jours. Il est constaté que la résistance mécanique du mortier modifié augmente avec l'augmentation du pourcentage du déchet de céramique additionné. Cette augmentation est plus importante lorsque le pourcentage de l'ajout augmente.

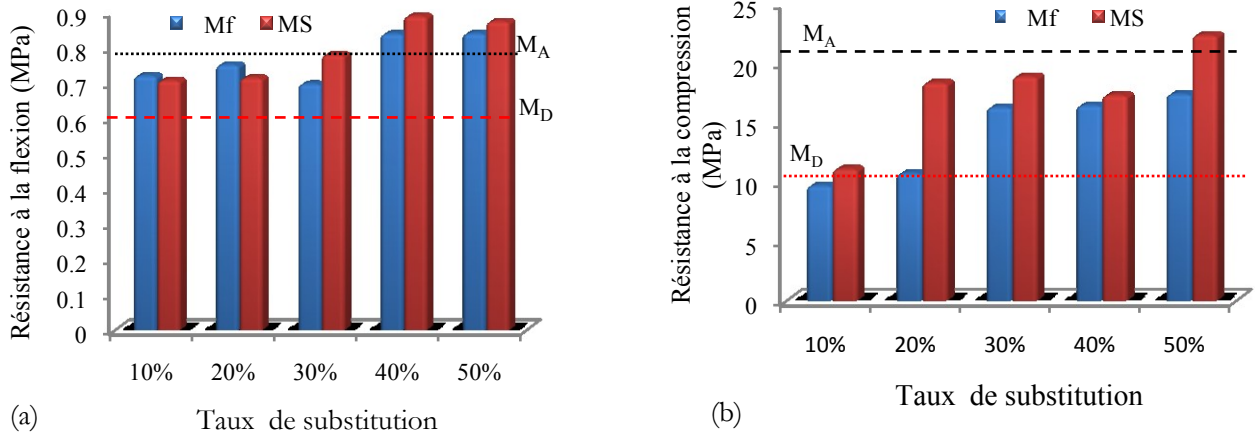


Figure IV.23: Variation de la résistance à la flexion (a) / (b) compression en fonction de taux de substitution (conservation dans l'eau)

Les gains de résistances obtenus pour les mortiers avec des déchets semblent être directement liés aux propriétés particulières des déchets céramiques, qui améliorent la compacité des mortiers et par la suite la résistance.

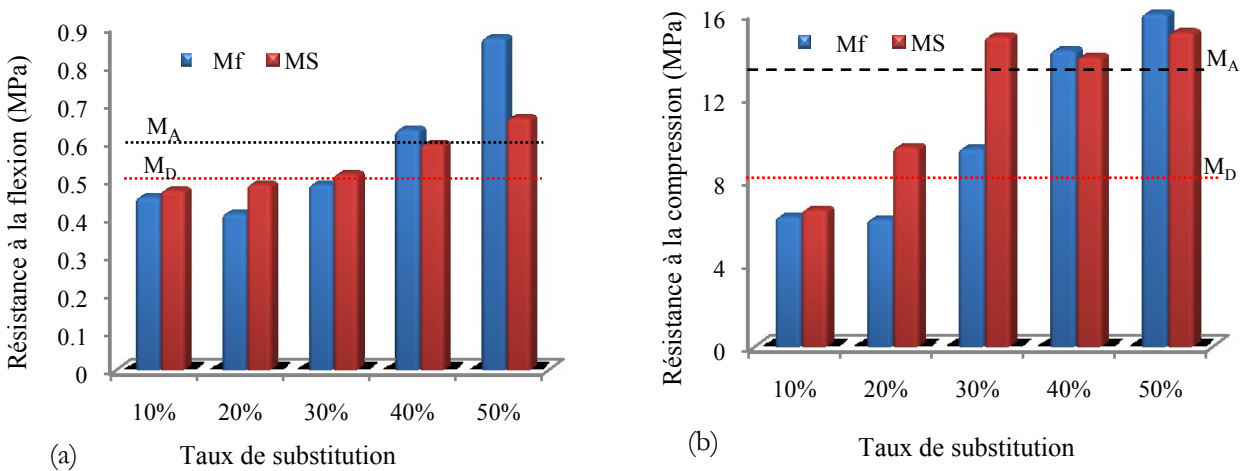


Figure IV.24: Variation de la résistance à la flexion (a) / (b) compression en fonction de taux de substitution (conservation au climat chaud)

Cette augmentation de la résistance est due à la réaction pouzzolanique prédominante à long terme. La réaction pouzzolanique continue son effet en formant des C-S-H supplémentaires qui améliorent l'interface pâte-granulat, et par conséquent l'augmentation de la résistance mécanique.

Pour 40 et 50% de substitution, la résistance mécanique du modifié augmente fortement pour enregistrer des valeurs (compression, flexion) supérieures à 12 MPa, 0.7 MPa respectivement après 28 jours de durcissement. L'augmentation importante de la résistance mécanique à 28 jours est réalisée sur des mortiers renfermant entre 40 et 50% de déchets céramiques.

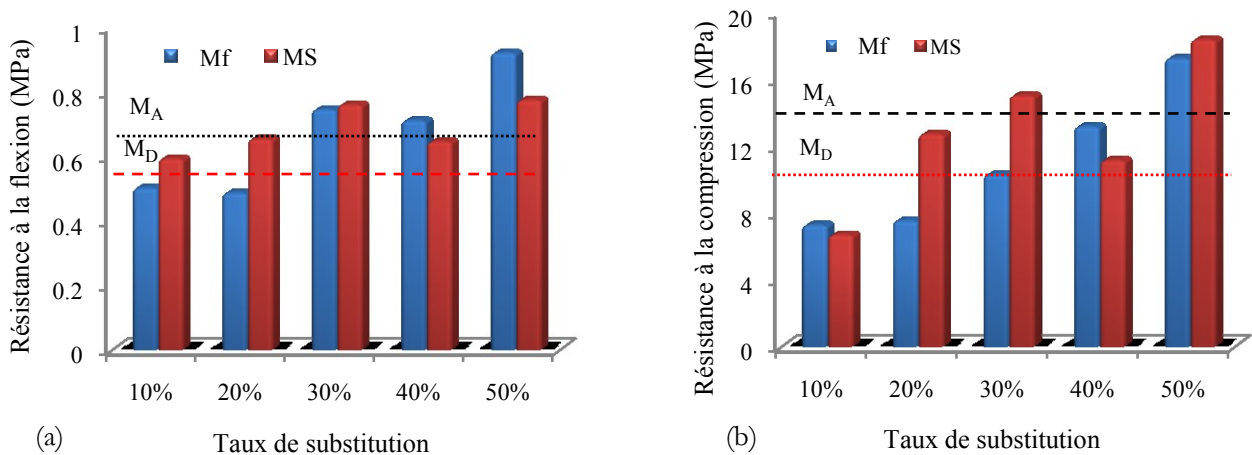


Figure IV.25: Variation de la résistance à la flexion(a)/(b)compression en fonction de taux de substitution (conservation à l'air libre)

Les résultats obtenus montrent que les mortiers avec additions de déchets céramiques peuvent présenter des variations significatives de la résistance mécanique à 28 jours par rapport aux mortiers de référence. Les mortiers modifiés présentent le meilleur gain de performance de (32% à 160%) en résistance mécanique (traction et compression respectivement), et peut même dépasser les mortiers standards à base de sable alluvionnaire.

Dans tous les cas, la conclusion est que le taux de substitution supérieur à 30% et le type de déchets céramiques interviennent de façon significative sur le comportement des mortiers à base de sable de dune.

IV.4.2.5 Module de déformation dynamique

La figure IV.26 représente l'évolution du module dynamique en fonction des taux de substitution pour les deux formulations étudiées. Tous les mélanges développent des modules dépassant 19 GPa et pour la quasi-totalité obtient cette valeur est comprise entre 20 et 30 GPa. L'influence des déchets céramiques est considérable sur l'obtention du module d'élasticité des mortiers à base de sable de dune,

donc le module d'élasticité augmente avec l'incorporation plus élevée de déchets céramiques. Cela est dû à la haute résistance à la compression et aux particules fines qui occupent les vides entre les agrégats de sable. Ainsi, les mortiers deviennent plus compacts et, en conséquence, le module d'élasticité augmente. L'incorporation de déchets engendre alors plus de déformations lors du chargement et permet une rupture du matériau cimentaire plus ductile.

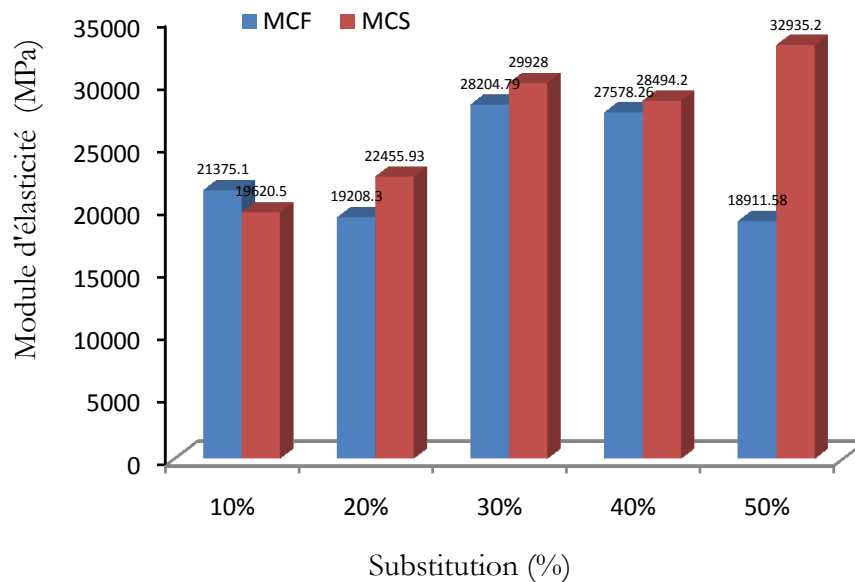


Figure IV.26: Module d'élasticité dynamique des mortiers

IV.4.3 Durabilité

IV.4.3.1 Absorption d'eau par capillarité

Les phénomènes d'absorption capillaire dans les matériaux cimentaires sont très bien connus dans la littérature. En réalité, trois phases caractérisent l'absorption capillaire. La première, appelée aussi absorption initiale, traduit le remplissage des gros pores capillaires durant les deux premières heures de l'essai. La seconde, appelée aussi absorptivité, traduit le remplissage des plus petits capillaires. Enfin, la troisième phase caractérise la remontée capillaire atteignant la face supérieure des échantillons et se traduit sur la courbe par une asymptote horizontale. L'essai de l'absorption d'eau par capillarité simule l'absorption capillaire des revêtements en contact avec l'eau extérieure (pluie ou autre).

Ce test a évalué le coefficient de capillarité à 28 jours et les résultats sont présentés dans les figures IV.27, IV.28 et la figure IV.29. Dans cet essai, on a calculé le coefficient capillaire, qui est donné par la masse d'eau absorbée entre 10 min et 90 min, par unité de surface et racine carrée de temps. Un coefficient plus faible indique un taux moindre d'absorption d'eau par capillarité.

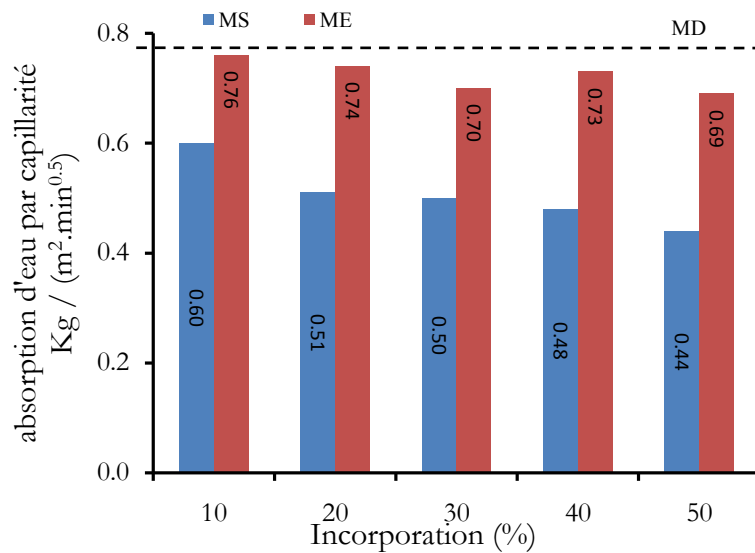


Figure IV.27: L'absorption capillaire des mortiers

L'incorporation de déchets de céramique diminue le coefficient capillaire et également l'absorption totale d'eau par rapport au mortier de référence. Le mortier à base de sable de dune a une absorption d'eau plus élevée que le mortier modifié par l'incorporation de déchets de céramique qui peut être expliquée par l'existence de moins de vides internes dans les mortiers durcis en raison d'addition des fines de déchets céramiques. Lorsqu'une partie du sable de dune est remplacée par des rapports d'incorporation de substitution graduellement étudiés, les particules des déchets céramiques vont remplir certains vides, laissant pour la plupart des très petits pores de mortier durci qui entravent la circulation de l'eau et rend l'écoulement de l'eau capillaire très faible. Les particules des déchets remplissent les vides entre l'agrégat de sable, en diminuant la taille des pores et leur ouverture.

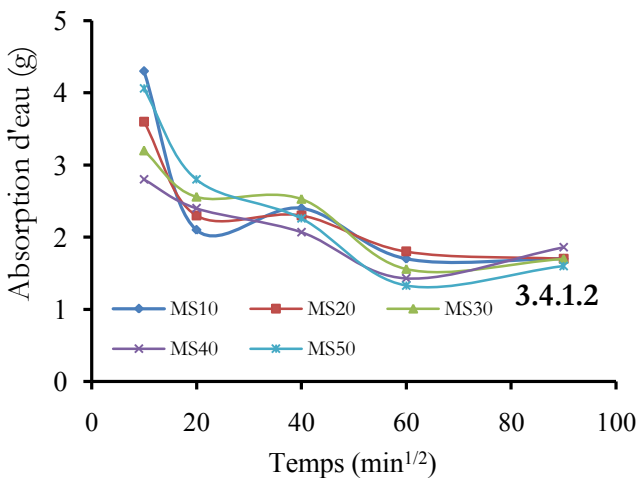


Figure IV.28: Courbe absorption d'eau des mortiers-céramique blanc

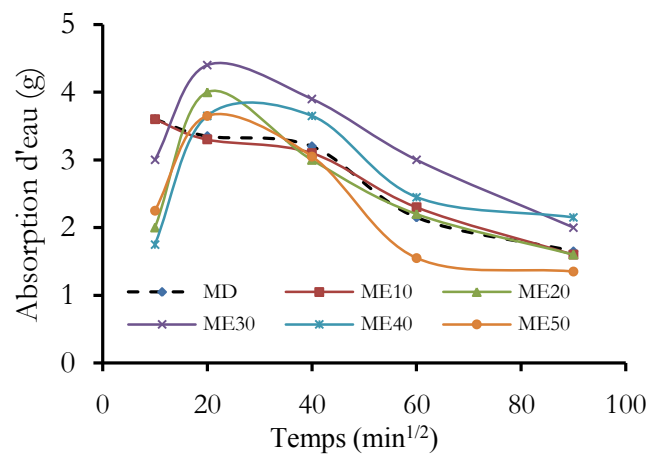


Figure IV.29: Courbe absorption d'eau des mortiers - rouge

IV.4.3.2 Porosité ouverte

La figure IV.30 montre la variation de la porosité accessible à l'eau en fonction du pourcentage des déchets incorporés. Cette porosité a été mesurée selon les recommandations de l'ASTM désignation C642. Sur cette figure, on note une diminution de la porosité en fonction du pourcentage de remplacement jusqu'à 6,53 % pour 50% de remplacement des déchets. La réduction de la porosité entraîne une diminution de l'absorption totale d'eau par capillarité, tandis que la plus petite taille des pores conduit à une diminution de la vitesse d'absorption (coefficient de capillarité plus faible), ce qui indique un volume de vides plus faible. Ainsi, on s'attendait à ce que la porosité ouverte soit inférieure pour les mortiers avec incorporation de déchets de céramique. Enfin, L'incorporation des déchets céramiques conduit à une réduction importante de la taille des pores comparativement à la même matrice sans déchets. La diminution de la porosité induite par la présence des déchets céramiques contribue à l'amélioration de la durabilité du béton.

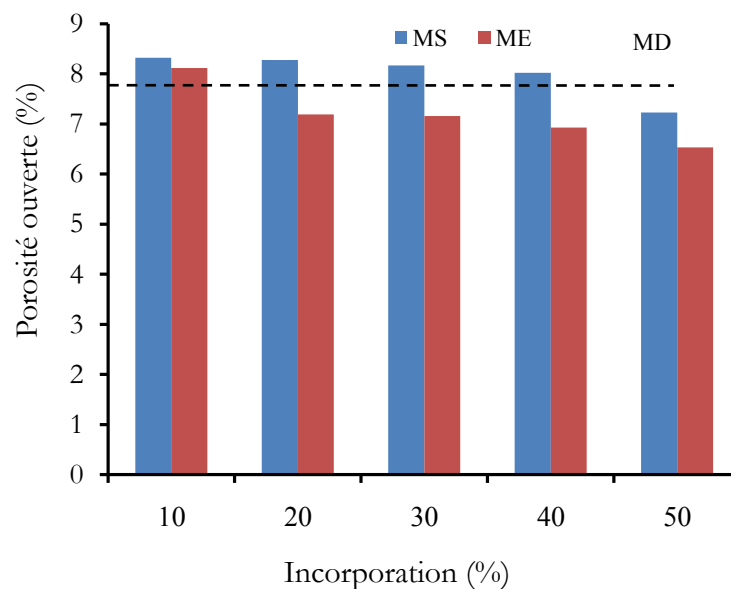
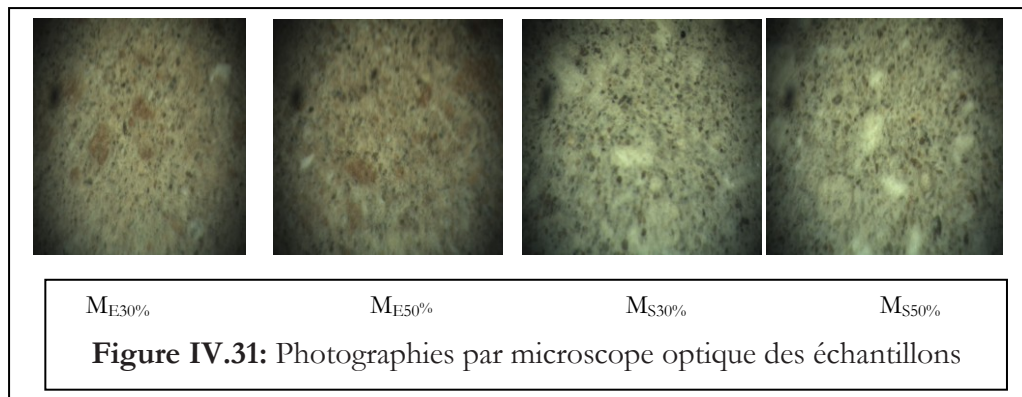


Figure IV.30: Porosité des mortiers en fonction des déchets incorporés

IV.4.3.3 Microstructure

a) Observation au microscope optique

La microscopie optique apporte de précieux renseignements sur la texture des matériaux compacts; elle permet notamment d'évaluer le taux de porosité du matériau grâce à un fort grossissement et un éclairage bien adapté. La figure IV.31 montre des photographies de différents échantillons obtenues par un microscope optique. L'observation de la surface des mortiers indique que la céramique recyclée et la pâte de ciment sont bien collées. Ceci explique la bonne résistance mécanique obtenue sur les mortiers à base de sable de dunes modifiés par des déchets de céramique.



b) Observations au MEB

La figure. V.32 représente les micrographies des échantillons (Sable de dune, MF et CS). Le mortier à base de sable de dune présente une porosité importante qui se traduit par la présence de points noirs sur la photo. On peut observer que les mortiers à base (CS) présente une faible porosité par rapport au mortier M_F et le mortier à base du sable de dune. Ce résultat est confirmé par l'absorption capillaire et la porosité ouverte, la taille des pores diminue avec l'ajout des deux déchets.

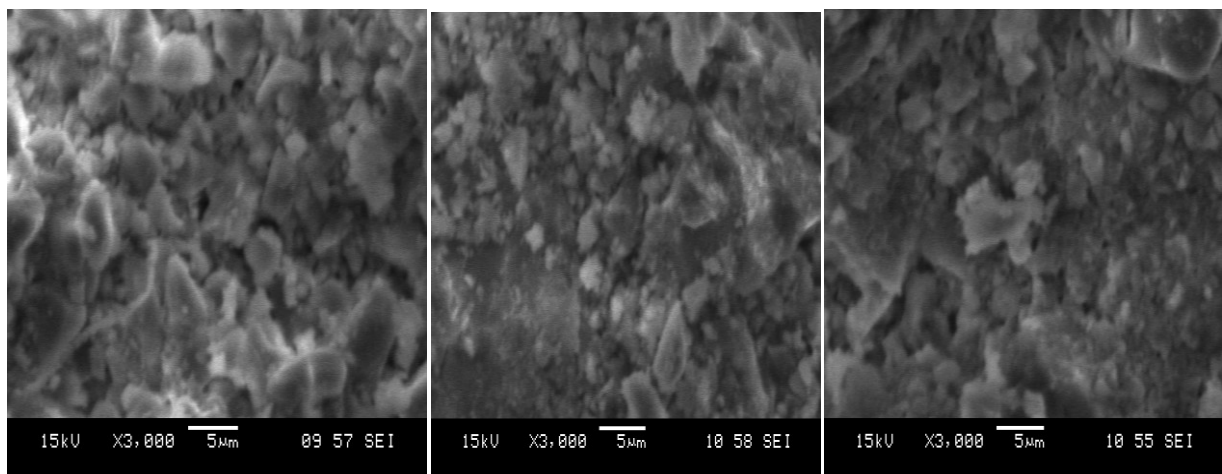


Figure IV.32: Vue globale de la microstructure des différents mortiers étudiés

La morphologie des surfaces des mortiers est obtenue par microscopie électronique à balayage. La figure IV.33 montre que les échantillons présentent une morphologie similaire.

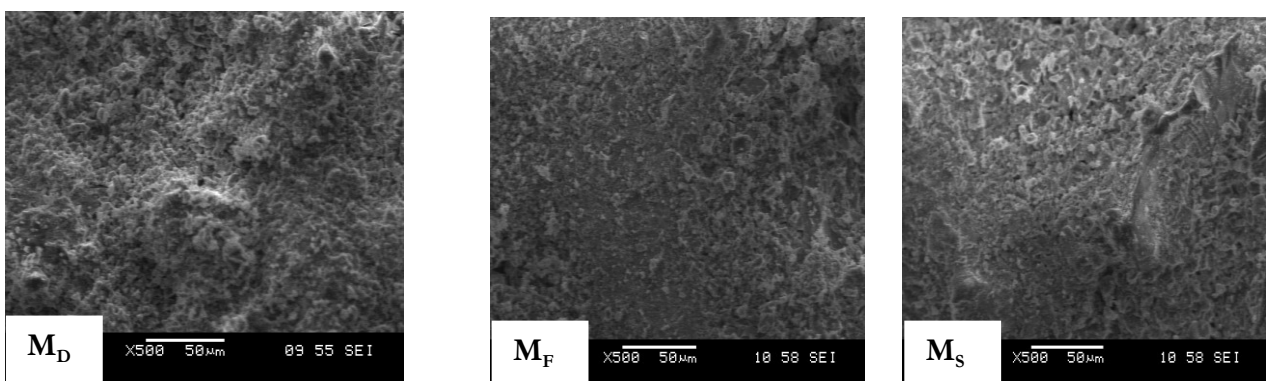


Figure IV.33: Morphologie des surfaces des mortiers

c) Analyse par diffraction aux rayons X sur les mortiers

Une analyse par diffraction des rayons X (DRX) a été réalisée sur le mortier à base de sable de dune (Mortier de référence) M_D ainsi que sur les déchets céramiques sanitaire et faïence incorporés dans les mortiers. La figure IV.34 montre les spectres respectifs des mortiers M_D , M_S et M_F . L'analyse vise à identifier la nature des hydrates formés dans les mortiers avec les différents ajouts utilisés et de déduire leur influence sur la microstructure des mortiers. Ces derniers sont principalement composés de : quartz SiO_2 , calcite $CaCO_3$, portlandite $Ca(OH)_2$.

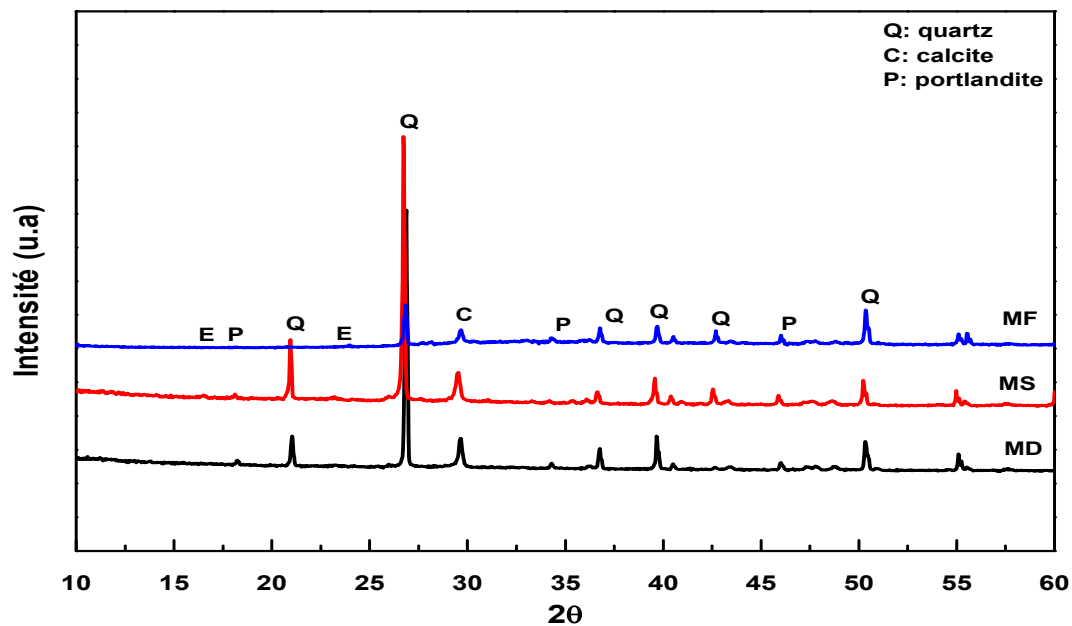


Figure IV.34: Spectre de diffraction des rayons X des mortiers

La superposition des diffractogrammes X montre que l'ajout des déchets ne modifie pas la nature des hydrates. La figure IV.34 montre que la Portlandite formée lors des réactions d'hydratation du ciment en présence de sable de dune a été partiellement consommée. Ce résultat confirme que les déchets incorporés ne sont pas inertes et participent à la formation de nouveaux C-S-H qui rendent la pâte plus dense et plus compacte. La réactivité pouzzolanique de déchets céramiques est plus importante que celle du sable de dune.

IV.4.3.4 Carbonatation accélérée

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons. Elle correspond à la transformation progressive essentielle d'un des composés du béton durci, la portlandite en calcite, au contact du dioxyde de carbone contenu dans l'air et en présence d'humidité. Cette transformation s'accompagne d'une diminution du pH. L'une des conséquences principales de la carbonatation est de favoriser la corrosion des armatures lorsque le front de carbonatation les atteint.

En effet, les armatures, passivées dans le béton sain de fort pH, ne sont plus protégées dans le béton carbonaté. Quand le processus de dégradation est fort, la rouille provoque l'éclatement du béton d'enrobage et laisse apparaître, à partir d'épaufrures, les armatures oxydées.

Les mesures de l'épaisseur de mortier carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphthaléine. Cette dernière révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée. Les mesures correspondent aux distances (en mm) entre la surface externe du mortier et le front de coloration. La comparaison de la carbonatation du mortier de référence (sans ajout des déchets céramiques) et celle des mortiers contenant respectivement 10, 30 et 50% des déchets s'effectuent sur les valeurs moyennes de profondeur carbonatée.

Les deux figures IV.35 et IV.36 illustrent les évolutions des profondeurs carbonatées des mortiers avec ou sans déchets.

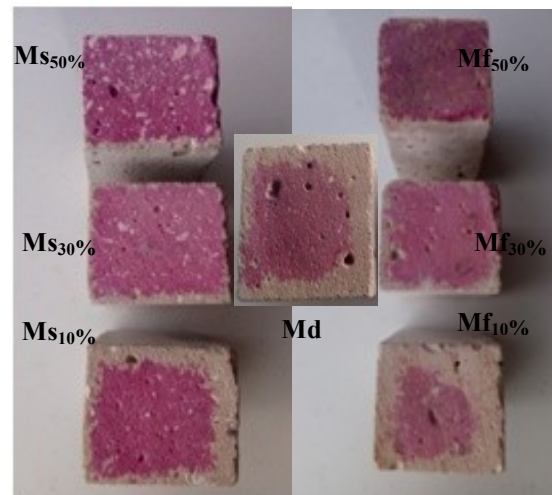
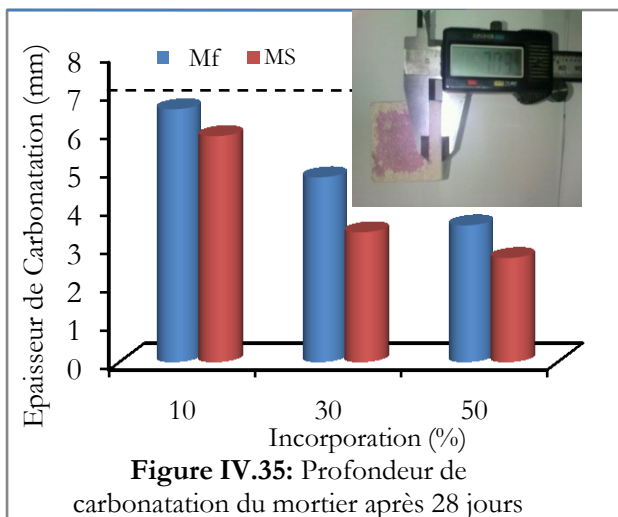


Figure IV.36: Aspect visuel des échantillons exposés à la carbonatation naturelle pendant 28 jours

Les cinétiques de carbonatation des différents mortiers sont proportionnelles aux taux de substitution des déchets céramiques. Après 28 jours, de carbonatation et compte tenu des dispersions mesurées, l'incorporation des déchets dans les mortiers à base du sable de dune conduit à diminué la profondeur de carbonatation de 90% à 160% (figure IV.34 et IV.35) en comparaison à celle des mortiers de référence. A première vue, on peut prédire que l'incorporation des déchets céramiques faïence dans les mortiers à base de sable de dune résiste mieux à l'attaque de CO_2 que le mortier de référence, alors que les mortiers modifiés par céramique sanitaire sont les plus résistants. Cependant, la propagation du CO_2 est également influencée par un autre facteur important qui est la porosité.

IV.4.3.5 Analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique est une technique d'analyse qui permet de déterminer des changements de phase via la variation de masse en mode transitoire lors du chauffage d'un matériau. ATG permet d'enregistrer en continu des variations de masse d'un échantillon lors d'une montée de sa température depuis celle de l'ambiance jusqu'à environ 1200 °C. Ces variations de masse correspondent, entre autres, à la déshydroxylation des hydrates et à la décomposition de la calcite. L'analyse de la perte de masse a permis de déterminer les quantités de portlandite et de calcite dans l'échantillon examiné. Dans les figures IV.37, IV.38 et IV.39 nous présentons les résultats de l'analyse thermogravimétrique (ATG), la thermogravimétrie dérivée (DTG) sur le mortier de référence et les mortiers avec des déchets céramiques.

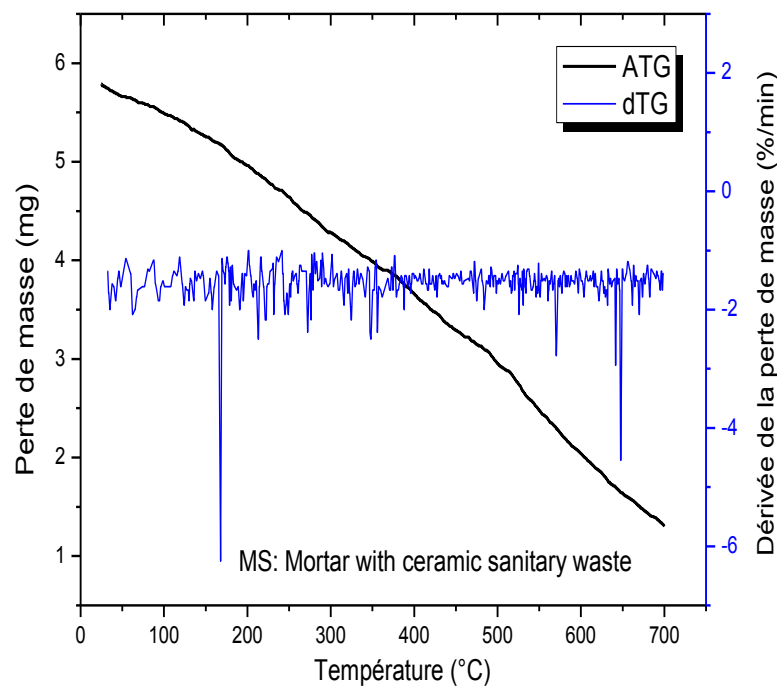


Figure IV.37: Analyses ATG et DTG des mortiers (M₃)

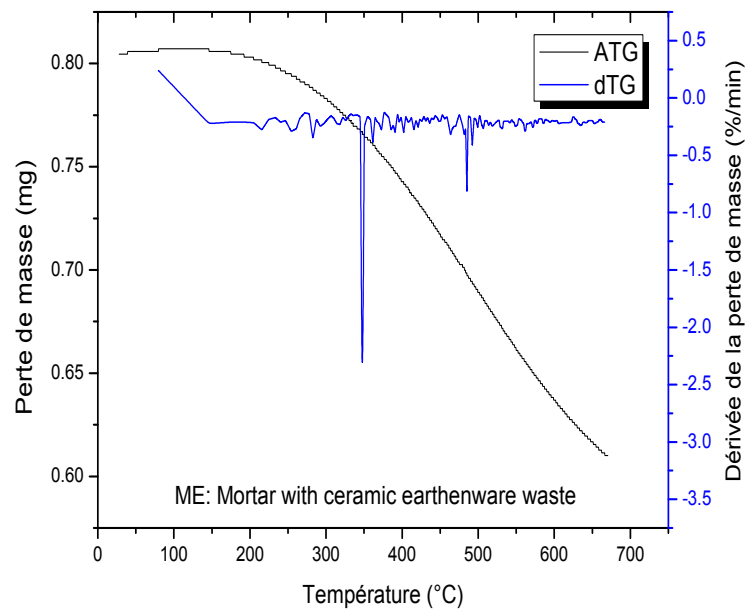


Figure IV.38: Analyses ATG et DTG des mortiers (M_T)

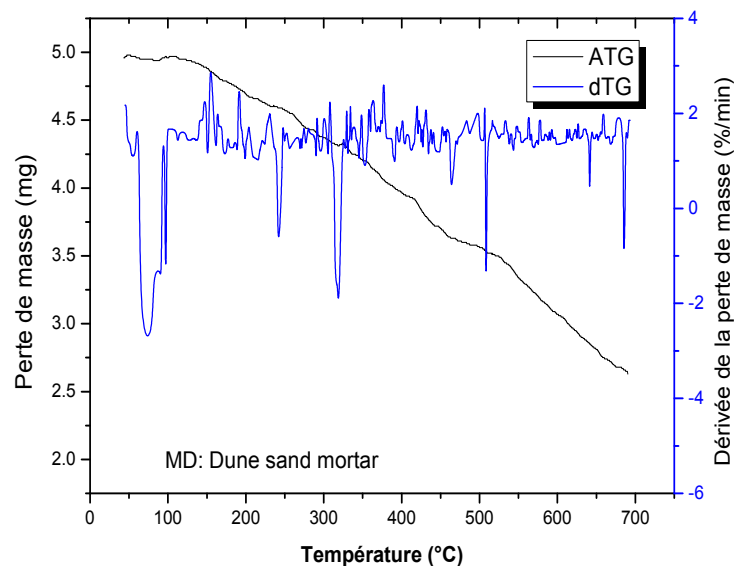


Figure IV.39: Analyses ATG et DTG de mortier (M_D)

Une perte de masse associée à un pic en DTG témoigne du départ d'un composé. Au contraire, un pic sans perte de masse associée est témoin de la transformation d'un composé, sans perte de matière. Pour une analyse plus complète, les résultats obtenus par ATG sont dérivés et lissés afin d'obtenir les courbes de dérivées thermogravimétriques (DTG) qui présentent des pics nets traduisant les points d'inflexion des courbes d'ATG. Les différentes réactions qui se produisent ressortent mieux, ce qui permet une lecture plus claire des plages de température de décomposition des minéraux.

Les trois grandes phases de perte de masse autour de 200°C, 450°C et 700°C sont respectivement dues au départ de l'eau (libre et liée), à la deshydroxylation de la portlandite et au début du phénomène de décarbonatation.

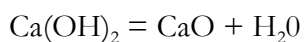
La déshydroxylation du silicate de calcium hydrate C-S-H entre 100 °C et 300 °C [M.Thiery.2005]. Dans cette gamme de température, il y a aussi une vaporisation d'eau libre, d'eau liée et de décomposition de l'étringite. Lorsque la poudre est séchée à 105 °C, la plus grande partie de l'eau libre et liée a été éliminée.

La déshydroxylation de la portlandite entre 400°C et 550°C [M.Thiery.2005]. Le résultat montre que la quantité de Ca(OH)_2 contenue dans le mortier (M_S) est la plus élevée, suivie par le mortier (M_F) et M_D .

La décomposition du carbonate de calcium CaCO_3 à environ 700 °C [M.Thiery.2005]. Le résultat montre que la quantité de CaCO_3 contenue dans le mortier M_S est la plus élevée, suivie par le mortier M_F et M_D .

Nous cherchons à déterminer les fractions massiques de portlandite et de carbonate de calcium comme suit [S.T.Pham 2013]:

La décomposition de la portlandite:



% H_2O est le pourcentage de perte de masse lorsque H_2O s'évapore, on déduit la fraction massique de la portlandite:

$$\% \text{Ca(OH)}_2 = \% \text{H}_2\text{O} \cdot (74/18)$$

La décomposition du carbonate de calcium :



% CO_2 est le pourcentage de perte de masse lorsque le CO_2 s'évapore; on déduit la fraction massique de carbonate de calcium:

$$\% \text{CaCO}_3 = \% \text{CO}_2 \cdot (100/44).$$

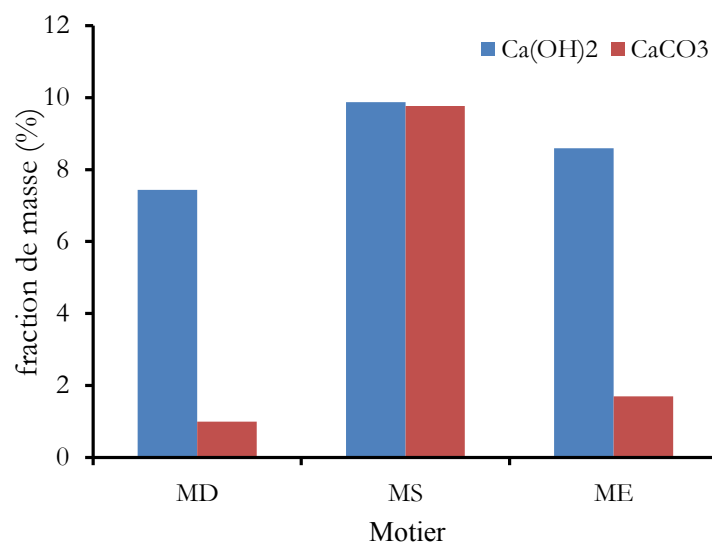


Figure IV.40: Les fractions massiques de portlandite et de carbonate de calcium dans tous les mortiers

Nous présentons dans la Figure IV.40 les fractions massiques de la portlandite et du carbonate de calcium. Lorsque C-S-H et $\text{Ca}(\text{OH})_2$ réagissent avec le CO_2 , les fractions massiques de ces composants dans le matériau influencent le taux de propagation du CO_2 . A première vue, on peut prédire que le mortier M_F résiste mieux à l'attaque du CO_2 que le mortier M_D , alors que le mortier M_S est le plus résistant. Cependant, la propagation du CO_2 est également influencée par un autre facteur important qui est la porosité.

IV.4.3.6 Durabilité vis à vis de l'action des acides

a) L'effet de HCl

Les figures (IV.41, IV.42) montrent l'évolution de la perte de masse des trois mortiers M_D , M_F et M_S en fonction de la période d'immersion dans une solution acide de 5 % HCl. On constate une perte de masse continue concernant les mortiers immergés dans la solution de l'acide chlorhydrique après 24 heures et jusqu'à l'âge de 90 jours. Il est clair que les mortiers M_S contenant des déchets céramiques sanitaire avec un taux d'incorporation 50% augmentent leur aptitude à résister à l'attaque de l'acide chlorhydrique. Par contre, l'incorporation des déchets céramiques faïence dans les mortiers M_F présente une mauvaise résistivité par rapport au mortier de référence M_D .

Dans les figures IV.31 et IV.32, on constate que dès le premier jour le mortier sans incorporation des déchets subit une attaque par l'acide; on enregistre une perte de l'ordre de 8%. Par autre côté, les mortiers avec des déchets développent une certaine résistance car on enregistre une perte de masse de l'ordre 2.8%.

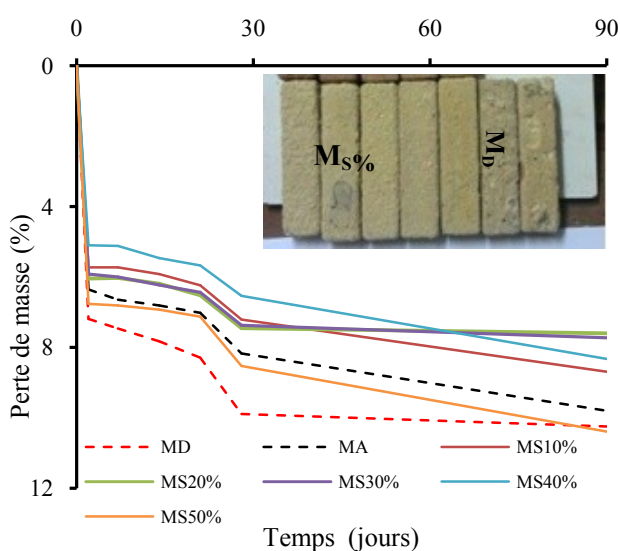


Figure V.41: Etat et variation de perte masse en fonction de la période d'immersion (HCL)

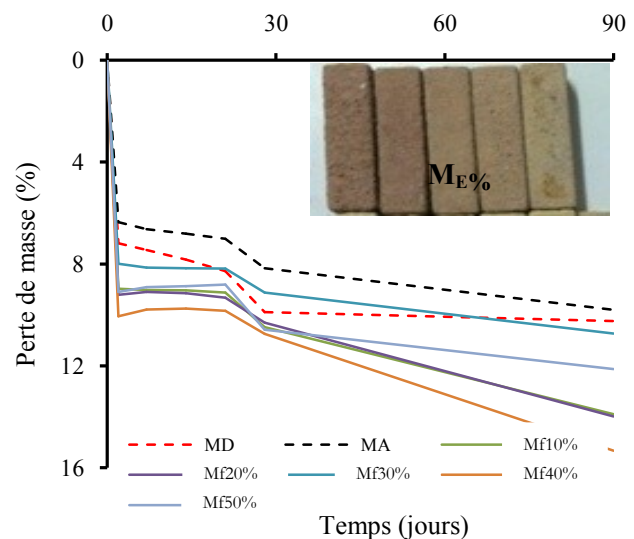
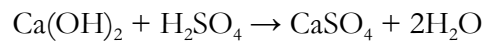


Figure V.42: Etat et variation de perte de masse en fonction de la période d'immersion (HCL)

b) Effet de H_2SO_4

Les figures IV.43, IV.44 présentent l'évolution de la perte de masse en fonction de la période d'immersion des différents mortiers conservés dans une solution d'acide sulfurique. L'acide sulfurique (H_2SO_4) est un acide inorganique; il est plus nuisible pour les bétons et mortiers qu'un acide organique. Les acides inorganiques forment avec le $Ca(OH)_2$, contenu dans la pâte de ciment durcie, des composés facilement solubles dans l'eau. La mesure des pertes de masses a été faite sur trois échantillons, identifiés à cet effet, préalablement essuyés et nettoyés 3 fois avec de l'eau distillée pour éliminer la solution superficielle et le mortier altéré.

Le suivi de la perte de masse des différents mortiers immergés dans une solution d'acide sulfurique (5% H_2SO_4) nous a mené à noter des pertes de masse continues au cours du temps. Cette perte est due au dépôt du gypse, qui se forme, suite à la réaction entre la portlandite libérée lors de l'hydratation, du ciment et de l'acide sulfurique selon la réaction chimique :



Les figures IV.40, IV.41 montrent, en terme de pertes de masses, que les performances des mortiers avec des déchets sont meilleures que celles du mortier de référence.

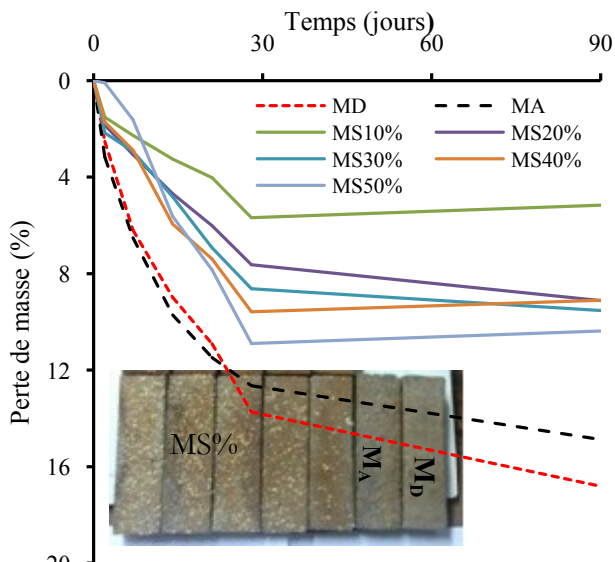


Figure IV.43: Etat et variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion (H_2SO_4)

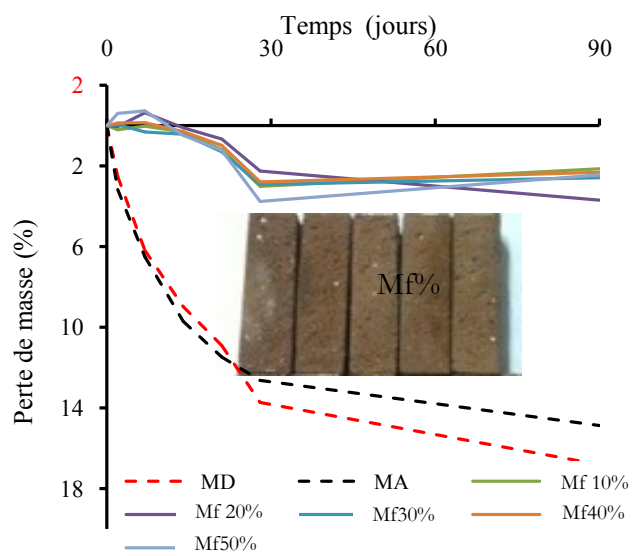


Figure IV.44: Etat et variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion (H_2SO_4)

Au début de la première semaine, les mortiers obtenus avec 30, 40 et 50% de déchets céramique rouge subissent un gain en masse. Ce gain traduit un début de gonflement des mortiers, conséquence des réactions chimiques se produisant entre les hydrates et l'acide sulfurique [Zivica.V 2001]. Le gypse déposé forme une couche blanchâtre épaisse sur la surface du mortier. La couche du gypse précipitée

est facilement lessivée dont le résultat est une perte de masse ainsi que l'obtention d'une solution blanchâtre. D'après les figures (IV.43, IV.44), on constate que les mortiers avec des déchets céramiques présentent une meilleure résistivité par rapport au mortier de référence avec un gain de 36.8% et 32.3% respectivement. Il est à noter aussi que les autres mortiers présentent une faible perte de masse. L'amélioration de la résistance est due à la réaction pouzzolanique qui fixe la chaux ; par conséquent, les pores capillaires sont réduits par formation de gels CSH bloquant ainsi l'absorption de la solution acide dans une réduction de la perte de masse.

Les photographies des figures (IV.43, IV.44) montrent le changement de volume des différents mortiers après immersion de 90 jours dans la solution d'acide fort (H_2SO_4).

L'examen visuel des éprouvettes montre que les mortiers avec ajout des déchets céramiques gardent leur forme.

IV.4.3.7 Étude des propriétés d'adhérence des mortiers

L'évolution des propriétés d'adhérence dépend de la nature de l'adhésion entre le mortier et son support, mais également des conditions environnementales auxquelles l'ouvrage est exposé. Le décollement de la couche réparatrice de mortier – revient à étudier l'adhérence entre le mortier appliqué et la surface du support à réparer. Cette étude nécessite la prise en compte de tous les facteurs pouvant influencer le système mortier/support. Il est aussi nécessaire, dès le départ, de mettre en place une technique de mesure d'adhérence. Le test d'adhérence par flexion trois points est celui que nous avons retenu, pour sa facilité de réalisation et la possibilité d'exploiter les résultats obtenus en se basant sur les propriétés mécaniques intrinsèques des mortiers présentées dans les chapitres précédents.

IV.4.3.7.1 Conditions expérimentales du test d'adhérence

a) Test d'adhérence par flexion trois points

Nous avons choisi d'utiliser un test de flexion trois points pour qualifier et quantifier l'adhérence. Deux raisons majeures ont guidé ce choix : la première est la facilité d'utiliser cette technique avec un appareillage maîtrisé, la deuxième est la possibilité d'exploiter les résultats en les mettant parallèlement avec les propriétés intrinsèques du support. Le déroulement de la mesure est identique à celui de la mesure de la résistance à la flexion d'une éprouvette ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 qui est centrée sur les deux appuis inférieurs en s'assurant que l'appui supérieur sollicite l'interface support/mortier de réparation.

Les étapes du coulage du mortier restent les mêmes que celles utilisées pour la fabrication d'éprouvettes « classiques ». La figure IV.8 résume les étapes de fabrication des éprouvettes bicomposées.

b) Paramètres étudiés

Plusieurs facteurs entrent en jeu au cours du collage de deux matériaux [Courard,1998]. Nos travaux se sont focalisés sur trois facteurs qui sont:

- * Nature et quantité des déchets céramiques utilisés dans les mortiers modifiés.
- * État de surface du support.
 - Surface sèche et rugueuse (S_R), Surface saturée en eau et rugueuse (SR),
- * Environnement du système support/réparation
 - En immersion dans l'eau.
 - Environnement ambiant contrôlé (à l'air libre).
 - Environnement chaud et sec. (condition d'un climat chaud et sec " l'étuve où la température est aussi maintenue à $52\pm 2^\circ\text{C}$. l'humidité à l'intérieur de l'étuve est très basse").

c) Contrainte d'adhérence et Modes de rupture

L'essai de flexion trois points permet de mesurer la contrainte à la rupture des éprouvettes. Plus cette contrainte est élevée, plus l'interaction entre le mortier et le support est forte. Suivant la zone de rupture dans l'éprouvette bicomposée, trois types de rupture sont possibles:

- * Les ruptures adhésives (A) : ce type de rupture a lieu à l'interface entre le mortier et le support. Il dénote une absence d'adhérence entre le mortier de réparation et le mortier support.
- * Les ruptures cohésives: les ruptures sont de ce type quand elles n'ont pas lieu à l'interface entre les deux parties. Elles peuvent avoir lieu soit dans le mortier support soit dans le mortier de réparation. L'obtention d'une rupture cohésive par rapport à une rupture adhésive caractérise une bonne adhésion entre les deux parties du système bicomposé et montre que le point faible du système ne se situe pas à l'interface [Courard, 1998].

IV.4.3.7.2 Influence des déchets céramiques et de l'état de surface sur l'adhérence

Après 28 jours, les contraintes d'adhérence ont été mesurées; les résultats des mesures sont présentés dans les figures IV.45 et IV.46:

L'exposition du mortier modifié à de hautes température a un impact négatif sur l'adhérence du mortier. De plus, la défaillance est purement adhésive (A) car une partie d'eau est évaporée dans ces conditions ce qui limite l'hydrations de ciment.

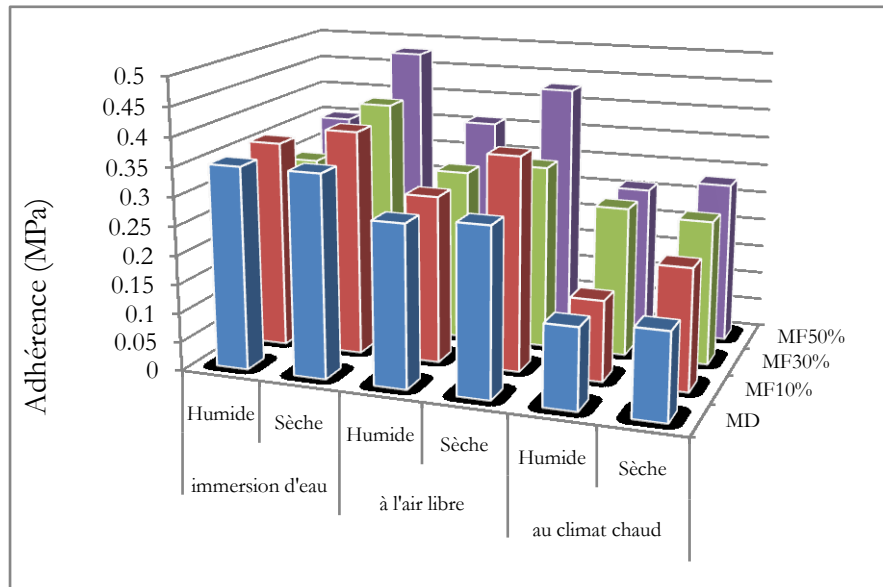


Figure IV.45: Adhérence des mortiers après 28 jours dans les différents milieux

L'immersion de l'eau augmente l'adhérence du mortier modifié. Ce résultat est prédit parce que l'eau est disponible pour tous les hydrates de ciment. En outre, la rupture cohésive peut être trouvée dans le support ou dans la préparation des mortiers. Mais, la résistance à la flexion du mortier référence M_D n'est pas toujours atteinte.

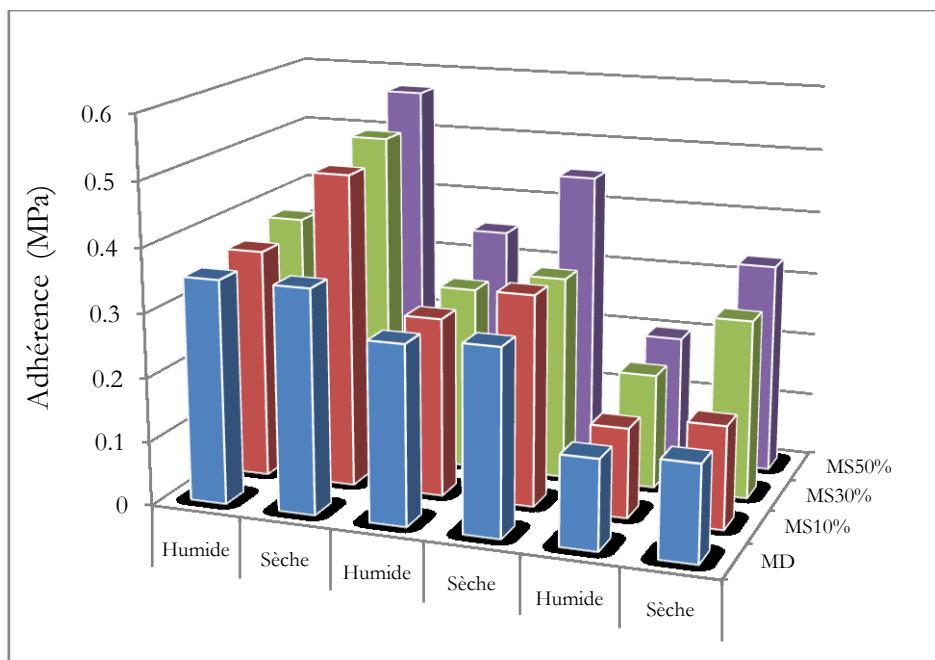


Figure IV.46: Adhérence des mortiers après 28 jours dans les différents milieux

Les plus faibles valeurs d'adhérence (0.15 MPa) sont obtenues avec les mortiers non-modifiés et le mode de rupture reste à l'interface du mortier et du support. Pratiquement, Il n'y a pas d'adhérence entre le mortier à base de sable de dune M_D et le support. En ce qui concerne les mortiers modifiés, les

résultats d'adhérence obtenus avec le mortier $M_{S50\%}$ sont presque plus élevés deux fois que ceux obtenus avec le mortier M_D . Le mode de rupture est également différent pour les deux mortiers. La rupture a lieu exclusivement dans le substrat pour les éprouvettes $M_{S30\%}$, $M_{S50\%}$, $M_{E30\%}$ et $M_{E50\%}$, et à l'interface pour les éprouvettes $M_{S10\%}$ et $M_{E10\%}$.

Selon l'évolution de l'adhérence sur le mortier M_D en fonction de déchets céramiques après 28 jours, on constate une adhérence maximale obtenue avec 50% de déchets céramiques sanitaires qui avoisine 0.57 MPa. Dans ce cas, la rupture est purement cohésive dans le substrat. Par contre, la rupture est purement adhésive alors car elle a lieu à la fois à l'interface et dans le support à 0% et à 10% de déchets. Cette évolution dénote bien une amélioration de l'adhérence avec la teneur en déchets céramiques à partir de 30%.

D'une manière générale, on remarque que l'adhérence dans le système est influencée par différents paramètres :

* L'adhérence des mortiers modifiés par des déchets céramiques est meilleure que celle obtenue avec le mortier à base de sable de dune par la formation d'interface plus solide mortier/support. L'ensemble des études réalisées sur ce sujet arrive à la même conclusion [C. Farinha 2015; Silva 2009, 2010 et Corinaldesi. 2009]. Certains expliquent que cette augmentation de l'adhérence par l'incorporation d'agrégats de déchets céramiques de différentes tailles améliorerait la force d'adhérence par rapport au mortier de référence et qu'elle est probablement dû au fait que les agrégats fins de déchets céramiques mélangés et à l'eau de gâchage pénètrent dans les pores capillaires du support ce qui forme une interface plus solide

[C. Farinha 2015]

* le matériau doit avoir une bonne mouillabilité [Courard 1998, 2000], c'est-à-dire il doit être capable de s'étaler totalement sur la surface du support, pour assurer une adhérence maximale avec ce support.

L'influence de la saturation en eau du support avant application du mortier de réparation a été étudiée; les figures IV.43, IV.44 récapitulent les mesures effectuées. Les valeurs d'adhérence mesurées montrent que la saturation en eau de la surface de réparation n'agit pas favorablement sur les propriétés d'adhérence des mortiers étudiés (M_S , M_F). Nous observons que la saturation en eau des supports à réparer qui entraînent une diminution de l'adhérence des mortiers est de l'ordre de 10% à 30% pour un taux d'incorporation de 50% des déchets céramiques.

Les résultats montrent que l'eau présente à la surface du support ne contribue donc pas à l'amélioration de l'adhérence. L'eau en excès reste à l'interface mortier/support, ce qui limite le contact entre les deux matériaux et peut entraîner un taux de porosité localement plus élevé [Tchetgnia 2013]

IV.4.3.7.3 Influence de la rugosité de la surface du support sur l'adhérence

Les éprouvettes bicomposées ont été stockées à l'air libre et les mesures ont été effectuées à 28 jours. La Figure IV.47 présente l'évolution de la force d'adhérence de chacun des mortiers en fonction de la rugosité de la surface de contact. Le mortier M_D présente une adhérence faible quelle que soit le degré de rugosité. Cette adhérence, qui est légèrement plus importante sur une surface oblique que sur une surface rugueuse, est de l'ordre de (25%,10%) pour les mortiers (M_S, M_F) respectivement.

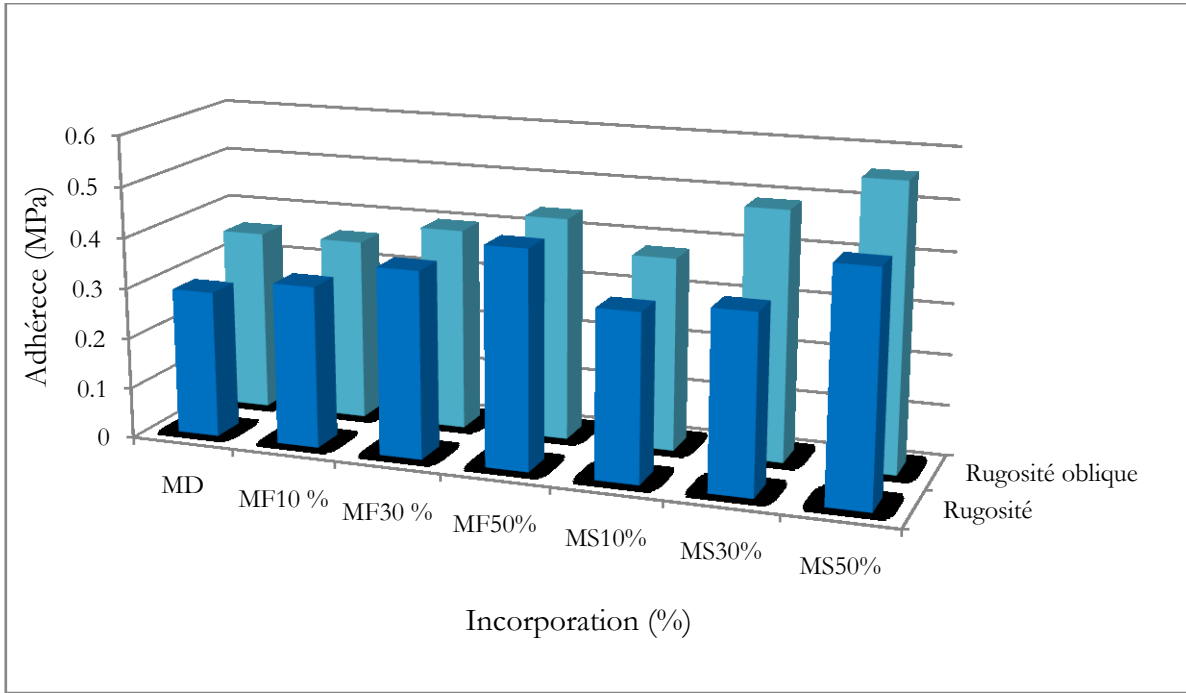


Figure IV.47: Evolution de l'adhérence des mortiers coulés sur une surface rugueuse

En ce qui concerne les mortiers contenant le déchet (Figure IV.48), l'impact de la rugosité dépend de la teneur en déchets céramiques des mortiers. Sur une surface rugueuse, l'adhérence atteint son maximum avec 50% de déchets après 28 jours alors qu'elle croît avec une surface rugueuse oblique. L'augmentation de la rugosité du support augmente l'adhérence du mortier à base de sable de dune M_D par rapport à l'adhérence sur une surface plane. Mais, l'interface reste toujours la partie la plus fragile de l'éprouvette bicomposée.



Figure IV.48: Mode de rupture des mortiers

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le remplacement partiel du sable de dune par des déchets céramiques (sanitaire, faïence). Ce déchet est intéressant puisqu'il est propre et ne nécessite qu'un concassage après stockage. A la suite de cette substitution, nous avons obtenu un mortier modifié avec des propriétés importantes en comparaison avec celles du mortier de référence.

Les conclusions de cette étude sont les suivantes:

* l'absorption en eau est de l'ordre de 30 % pour les déchets céramiques sanitaires et de 71 % pour les déchets céramiques faïence. Ce fort taux d'absorption des granulats recyclés complique la mise en œuvre et pourrait compromettre la durabilité des mortiers modifiés.

* à l'état frais, le remplacement de sable de dune par les déchets céramiques conduit à une diminution de la maniabilité du mélange; aucun mortier n'a posé de difficulté de mise en place lors de sa confection.

* L'incorporation de déchets sanitaires comme agrégats a réduit la densité apparente (à l'état frais et durci) des mortiers en raison de la plus faible densité d'agrégats recyclés par rapport au sable de dune.

* Les propriétés des mortiers à l'état durci ont été étudiées après qu'ils aient subi trois types de cure : à l'air libre, en immersion dans l'eau et au climat chaud. L'étude mécanique a été réalisée sur les mortiers modifiés (M_s , M_f) et les paramètres étudiés ont été le type de sable (dune et alluvionnaire), le type d'addition (céramiques sanitaires et faïence). Elle a porté sur les résistances à la compression et à la flexion 3 points. Les résultats montrent que le sable de dune est un matériau fort prometteur puisqu'il permet d'obtenir à la fois une bonne fluidité des mortiers et aussi les meilleures résistances mécaniques lorsqu'il est associé aux déchets céramiques. Nous avons constaté que le mortier à un taux d'incorporation plus de 30% de déchets céramiques présente de bonnes performances mécaniques et révèle des qualités comparables à un mortier à base de sable alluvionnaire. Avec un taux d'incorporation de 50% de déchets céramiques, le mortier (M_s et M_f) a montré des performances (32% à 160%) plus élevées que M_D et avec ce taux, les mortiers modifiés se rapprochent ou dépassent la performance équivalente d'un mortier ordinaire.

* le module d'élasticité dynamique mesuré par méthode ultrasonique présente un comportement similaire à celui de la résistance mécanique en compression, en l'occurrence d'une amélioration en fonction du taux de substitution des déchets céramiques.

* Dans le cadre de l'évaluation de l'influence de l'incorporation des déchets céramiques dans le mortier à base de sable de dune, les essais de durabilité ont permis de confirmer les performances de ce type de matériau. Les indicateurs de durabilité (profondeur de carbonatation, absorption capillaire, porosité) sont nécessaires ainsi qu'une analyse de son comportement vis-à-vis de l'action des acides. Les analyses

des résultats des programmes expérimentaux des indicateurs de la durabilité ont apporté de nouvelles informations sur la qualité et la performance des mortiers étudiés. Au niveau de l'absorption capillaire, une forte diminution (l'ordre de 50%) de cette propriété est constatée avec l'augmentation de la proportion de granulats céramiques sanitaires et une légère diminution des mortiers avec des déchets céramiques faïence. Cela est dû à la forte absorption d'eau des granulats recyclés qui induit un rajout d'une forte quantité d'eau pour garantir une plasticité acceptable. Les valeurs de porosité des mortiers de déchets céramiques demeurent remarquablement inférieures à celle du mortier à base de sable de dune, une légère diminution de cette propriété est constatée avec l'augmentation de la proportion de granulats céramiques.

* Les cinétiques de carbonatation des différents mortiers sont proportionnelles aux taux de substitution des déchets céramiques. Après 28 jours de carbonatation et compte tenu des dispersions mesurées, l'utilisation de déchets céramiques dans les mortiers à base de sable de dune conduit à diminuer la profondeur de carbonatation de 90% à 160% dans le cas du M_F , M_S en comparaison à celle des mortiers de référence.

Un autre essai performant a fait l'objet de cette étude de durabilité, les trois mortiers MD, MS et MF ont subi une attaque chimique externe (deux produits d'attaque chimique ont été utilisés dans cette étude : immersion totale dans une solution à 5% HCl, et 5% H_2SO_4). Les mortiers avec un taux d'incorporation de 50% des déchets céramiques sanitaires sont plus durables vis-à-vis de l'attaque par les HCl que les mortiers M_D et M_F . Pour l'effet du H_2SO_4 , les pertes de masse sont moins sensibles que dans le cas de l'attaque par l'acide HCl, on a une perte de 10% pour M_{S50} , 2.5% pour M_{F50} , 16% pour le mortier témoin. Dans ces cas, les mortiers avec des déchets céramiques sont les plus résistants.

Concernant l'étude des mécanismes de décollement de la couche de mortier de réparation sur le mortier support, nous avons choisi d'utiliser un test d'adhérence par flexion trois points en raison de sa facilité de mise en œuvre et de la possibilité d'utiliser des éprouvettes de dimensions limitées ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 . Les résultats obtenus par l'ensemble de ces essais évaluent les influences des déchets céramiques et de la nature du support sur lequel le mortier est appliqué par rapport aux deux indicateurs choisis: l'environnement de conservation des éprouvettes (milieu ambiant, milieu chaud et en immersion dans l'eau) et l'état de la surface du support (plan et sec, plan et saturé en eau ou sec et rugueux).

Les mortiers contenant de CS, CF présentent une adhérence plus élevée que celle de mortier de référence. Pour les mortiers formulés avec CS et CF, l'adhérence maximale est obtenue avec un taux d'incorporation de 50% de déchets céramiques; l'adhérence est de l'ordre de (0.57MPa, 0.48MPa) respectivement.

L'adhérence des mortiers coulés sur surface rugueuse et sèche est plus élevée lorsqu'ils sont soumis à une conservation en immersion dans l'eau. De plus, l'adhérence des mortiers diminue lorsqu'ils sont conservés à une température élevée.

La possibilité de substituer des granulats naturels (sable de dune) par des granulats céramiques produits par les déchets de broyage des céramiques offre des avantages techniques, économiques et environnementaux d'une grande importance dans le contexte actuel de durabilité dans le secteur de la construction.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'utilisation des déchets comme les céramiques dans le mortier à base de sable de dune a pris beaucoup d'importance en raison des exigences de la protection de l'environnement et de la construction durable à l'avenir. En fait, la production de granulats recyclés permet de limiter l'exploitation des carrières et les surfaces de travail nécessaires. Malgré la difficulté de quantifier cet indicateur, il n'est pas négligé parce qu'il présente un intérêt financier très intéressant.

Les résultats expérimentaux obtenus donnent les conclusions suivantes :

* L'influence de deux déchets céramiques (blanc ou rouge) a été étudiée et discutée à partir de nombreux essais sur les mortiers à base de sable de dune. Pour chacun d'eux, le comportement des mélanges à l'état frais (masse volumique, maniabilité) et à l'état durci (performances mécaniques) à différentes échéances et pour différents taux de substitution est analysé.

* Le mortier contenant du céramique sanitaire et faïence présentait généralement une densité plus faible que celle du mélange témoin (mortier à base de sable de dune), en raison de la plus faible densité des déchets céramiques par rapport au sable de dune. La masse volumique des mortiers modifiés décroît avec le taux de substitution. Cette décroissance s'explique logiquement par le fait que les additions des déchets qui remplacent le sable sont plus légers.

* Pour les résultats de maniabilité, aucun mortier n'a posé de difficulté de mise en place lors de sa confection.

* Il est intéressant de remarquer que les meilleures performances sont obtenues pour une valeur optimale entre 10% et 50% qui permet l'obtention des résistances les plus élevées, sont en accord avec ceux obtenus par des auteurs, ce qui justifie notre choix.

* L'étude mécanique a été réalisée sur un mortier et les paramètres étudiés ont été le sable (de dune et alluvionnaire) et le type d'addition (déchets céramiques sanitaire et faïence); cette étude a porté sur les résistances à la compression, à la flexion 3 points. Les résultats montrent que le sable de dune est un matériau fort prometteur puisqu'il permet d'obtenir à la fois une très bonne résistance mécanique lorsqu'il est associé aux déchets céramiques et son comportement vis-à-vis de l'étuvage est aussi très favorable. Tous les résultats obtenus en compression dépassent les 12 MPa.

* L'étude des indicateurs de durabilité été faite sur La porosité, la perméabilité, l'absorption de l'eau et la carbonatation de ces matériaux, sur des mortiers confectionnés avec des déchets céramiques et leur résistance à l'attaque chimique par des acides sulfuriques et chlorhydriques a été effectuée. Le mortier $M_{5\%}$ qui possède les performances mécaniques intrinsèques les plus élevées est le mieux résistant à la

carbonatation. Par contre, la carbonatation du mortier de référence M_D est beaucoup plus rapide que celle du mortier $M_{E\%}$. Alors, nous constatons que plus la teneur en déchets céramiques est importante, plus la carbonatation est lente. Le mortier de référence M_D est pratiquement totalement carbonaté. La profondeur de carbonatation diminue quand le rapport sable/déchet augmente.

* L'étude de la durabilité a permis de montrer l'effet bénéfique de l'incorporation des déchets céramiques dans la matrice cimentaire. En général, les compositions contenant de déchets développent une résistance différente de celle du mortier non modifié contre l'attaque chimique par l'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide chlorhydrique (HCL).

Après l'analyse de l'influence de la présence des déchets céramiques et de l'état de surface du support sur l'adhérence et son évolution pendant la conservation des éprouvettes dans des environnements différents, ce travail nous a permis de confirmer l'effet positif de la présence de déchets céramiques dans les mortiers de sable dunaire de réparation parce qu'ils :

- améliorent les propriétés mécaniques de ces matériaux ;
- réduisent leur porosité et par conséquent le transfert d'espèces agressives vers les armatures ;
- améliorent l'adhésion des produits de réparation sur le support à réparer.

Perspectives

En perspective de ce travail, il est important de compléter cette étude par :

- * Des études approfondies et à long terme sur le comportement mécanique, la microstructure et la durabilité des mortiers avec des déchets céramiques afin de confirmer la faisabilité de ce type de mortier dans le domaine de construction.
- * L'analyse du comportement de ces mortiers vis-à-vis du retrait;
- * La caractérisation de l'adhérence des mortiers sur un support réel à réparer ;
- * L'évaluation du risque de corrosion après la réparation du béton ; des essais électrochimiques permettant de simuler ce risque peuvent être réalisés en couplant deux armatures enrobées par un mortier de réparation.

References

- Amorim .LV, Lira HL, Ferreira HC. Use of residential construction waste and residues from ceramic industry in alternative mortars. *J. Environ Eng* 2003; 129(10):916–20. ASCE
- Ahmadi.B, W. Al-Khaja L'utilisation de boues de déchets de papier dans l'industrie de la construction de bâtiments *Ressour Conserv Recycl*, 32 (2001), pp 105-113
- Abbas Carcasses.A. M. Ollivier J.P (2000).The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*, (52)1-6.
- Alves .A.V, T.F.Vieira, J.de Brito J.R. Correia, Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials* 64 (2014) 103-113.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) C-125. Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates; (2007).
- Benaissa A « Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable » *Annales de l'ITBTP* No 504, 1992, pp 41-52.
- Bourmatte.N, H.Houari,'Caractérisation Expérimentale des Bétons et Mortiers à base de Granulats Recyclés : Béton de Démolition et Déchets de Briques ' *Sciences & Technologie B – N°38*, (Décembre 2013), pp 25-31.
- Bazaz J.B.; Mahmood Khayati; and Navid Akrami; *Properties and Performance of Concrete Made with Recycled Low-Quality Crushed Brick*, IAEG, The geological society of London, 2006, 616-620.
- Baradan B. 'Durability of reinforced concrete structures. *Dokuz Eylul University Engineering Faculty Press*, Izmir (Turquie) (2002), pp. 49-227.
- Bissonnette .B, L. Courard, M. Jolin, M. Thomassin, A. Vaysburd, A. Garbacz et von Fay, K.F.' *Adhérence des réparations en béton évaluation et facteurs d'influence*, 2014.
- Braga.M., de Brito J, Veiga R. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Constr Build Mater* 2012;36:960–968.
- Cabral AEB., Schalch V, Dal Molin DCC, Ribeiro JLD. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 2010;24(4):421–30
- Charonnat.Y, Benichou E., Darcel M., Geoffray J. M., Gonzalez J. C., Launaire Y (2001). « Maîtrise de l'eau dans le béton hydraulique », *Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Guide technique, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris.
- Courard. L, *Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation*, Thèse Université de Liège, 1998.

Calleja Carrete Las Puzolanas .J, Premio LUXAN. Madrid: Cía. Española de Puzolanas; 1970. p. 47.

Corinaldesi V. Moriconi G. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Constr Build Mater* 2009;23:289–94.

Correia . JR et al. *Materials and Structures*, 39, 2006, 169-177

Cachim. P.B. Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1292–1297.

Darque-Cerreti .E, E. Felder. Adhésion et adhérence. CNRS édition, Sciences et Technique de l'ingénieur, 2003, ISBN 2271060923, 388 pages.

Debieb.F, Kenai S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Const Build Mater* 2008;22(5):886–93.

Debieb.Farid, Courard, Luc, Kenai, Said and Degeimbre, Robert. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*-32. 421–426. (2010)

Erdogan TY. *Materials of construction*. Metu Press, Ankara(2002).

Farinha.C, J. de Brito, R. Veiga. Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars, *Construction and Building Materials* 83 (2015) 194–206.

Farinha.C, Brito J.de, Veiga R., Reduction of cement contents in renderings with fine sanitary ware aggregates, *Mater. Struct.* (2015)

Franck C., *Produits préfabriqués en béton file:Vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production*, Thèse Doctorat, Université de Toulouse III Spécialité Génie Civil. (2007)

GAGNÉ.R., GCI 714 - Durabilité et réparations du béton, Université de Sherbrooke - Centre de Longueuil, Québec, 2000, 338 p.

Gomez-Soberon .J. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. *Cem Concr Res.* 2002 pp 32: 1301.

Guerra .I, Vivar I, Llamas B, Juan A, Moran J Ecoefficient concretes: the effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete. *Waste Manage* 29:643–646.2009

Houst.YF, Wittmann FH. Influence of porosity and water-content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste. *Cem Concr Res*;24(6):1165–76. 1994.

Hendrickx. R. The adequate measurement of the workability of masonry mortar. PhD Dissertation in civil engineering, Arenberg Doctoral School of Science, Engineering and Technology,Heverlee,Belgium;October,2009pp.29–90.

Higashiyama.H, F. Yagishita, M. Sano and O. Takahashi, "Compressive Strength and Resistance to Chloride Penetration of Mortars Using Ceramic Waste as Fine Aggregate," *Construction and Building Materials*, 26, 2012, pp. 96-101,.

Jiménez J.R. et al. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing *Construction and Building Materials* 40 679–690 2013.

Jackiewicz-Reka.W, Kamil Załęgowskia, Andrzej Garbacza, Benoit Bissonneteb Properties of cement mortars modified with ceramic waste fillers' 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD'2015). *Procedia Engineering* 108 (2015) 681 – 687.

Juan .A, C. Medina, M. Ignacio Guerra, J. M. Morán, P. J. Aguado, M. I. Sánchez de Rojas M. Frías and O. Rodríguez, "Re-Use of Ceramic Wastes in Construction," In: Wunderlich, W. (ed.) *Ceramic Materials*.Rijeka, Croatia: Sciyo, 2012, pp. 197-211.

Kashino N., Investigation into limit of initial corrosion in existing reinforced concrete structures, 3rd Conference Durability Building Materials and Components, Espoo, 1984.

Khatib JM. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cem Concr Res* 2005;35(4):763–9.

De Larrard F. Structures granulaires et formation des bétons » Etudes et Recherches des LaboratoiresdesPontsetChaussées,OA34,Paris2000.

Lavat .A, Trezza M, Poggi M (2009) Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Manage* 29:1666–1674

Levy SM, Helene P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cem Concr Res* 2004;34 (11):1975–80.

Lopez .V, Llamas B, Juan A, Moran J, Guerra I (2007) Ecoefficient concretes: impact of the use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete. *Biosyst Eng* 96:559–564.

Lucas, J. de Brito, R. Veiga, C. Farinha. The effect of using sanitary ware as aggregates on rendering mortars' performance *Materials and Design* 91 (2016) 155–164

Maillot R., *Mémento Technique des Granulats*" Presses École des Mines de Paris, Paris, 2001, p. 31 39.

Malou.M, "Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le comportement Différé d'une Matrice Cimentaire. Caractérisation - Comportement monotone - Microstructure" Thèse doctorat d'état université de Constantine 2007.

Marcio.J, Estefano, de oliveira; Cassia Silveira de Assis; and Antonia Wanderley Terni. Study on compressed Stress, Water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate; International RILEM conference on the use of Recycled Materials in buildings and structures, November Barcelona, Spain, 2004, 8-11.

Martínez,I, M. Etxeberria, E. Pavón, N. Díaz, A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars, *Constr. Build. Mater.* 49(2013) 384–392.

Mamery .S, Béton à base de recyclats influence du type de recyclats et rôle de la formulation, Thèse doctorat, décembre 2013, Université BORDEAUX 1

PK. Metha, Monteiro PJM. *Concrete: microstructure, properties and materials.* 3rd ed. San Francisco: McGraw Hill; 2004.

Mehta PK . *Building durable structures in the 21st century* (2001). *Concrete International.*

Mohd M *Journal of Engineering Research & Education*, 3, 2006, 139-145.

Medina.C, M. Frías, M.I. Sánchez de Rojas, C. Thomas, J.A. Polanco 'Gas permeability in concrete containing recycled ceramic sanitary ware aggregate' *Construction and Building Materials* 37 (2012) 597–605.

Medina .C, M. Frías, M.I. Sánchez de Rojas Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Materials* 31 (2012) 112–118

Medina .C, M.I. Sánchez de Rojas, M. Frías. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) 48–54

Muraz .L. Valorisation de scories cristallines dans le béton de ciment. UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE Faculté de génie Département de génie civil.

Neville .AM. *Properties of concrete.* Harlow (New York: Longman Scientific & Technical John Wiley & Sons; 2008.

Neville.AM. *Properties of concrete.* Harlow: Addison Wesley Longman Limited;1997

Nicolas BUR.. *Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable"* Thèse Doctorat, université de Strasbourg,2012.

Nicot Pierre M.: *Interactions mortier-support : éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier "*Université Toulouse III – Paul Sabatier 2008.

Ollivier J.P, A. Vichot. *LA DURABILITÉ DES BÉTONS.* Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques 2008.

Özkan.Ö, Yüksel I. Studies on mortars containing waste bottle glass and _industrial by-products. *Constr Build Mater* 2008;22(6):1288–98.

Oliveira .R., J. de Brito, Veiga R. Incorporation of fine glass aggregates in renderings. *Constr Build Mater* 2013;44:329–41.

Olorunsogo.F.T., Padayachee, N (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and Concrete Research*. pp 32: 179-185

Padmini.A.K.; Ramamurthy, K.; and Mathews, M.S. Behaviour of concrete with low-strength bricks as lightweight coarse aggregate. *Magazine of concrete Research*, 53(6), 2001, 367-375.

Penacho.P, J. de Brito, M., Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate, *Cem. Concr. Compos.* 50 (2014) 47–59.

Puertas F. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. *Cem. Concr. Compos* (2008)30:798–805.

Parrott.L.J.A review of carbonation in reinforced concrete, British Cement Association,1987,126

Paine .KA, Dhir RK. Recycled aggregates in concrete: a performance-related approach. *Mag Concr Res* 2010;62(7):519–30.

Rougelota. T, N. Burliona, D. Bernardb, F. Skoczylas, About microcracking due to leaching in cementitious composite: X-ray microtomography description and numerical approach, *cement and concrete research*, 40 (2)2010, 271-283

Saeki.N, N. Takada, Y. Fujita, Influence of carbonation and sea water on corrosion of steel in concrete, Japan Concrete Institute, 6, 1983, 155-162.

Sayamipuk.S, Strength and durability of mortars containing métakaolin from Thailand, PhD Thesis School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, (1999) pp 201

Senthamarai.RM., P. Devadas Manoharan, D, Gobinath, “Concrete made from ceramic industry waste: durability properties” *construction and building materials*, 25, 2413-2419, 2011.

Serifou.M, 'Béton à base de recyclats: influence du type de recyclât et rôle de la formulation, thèse doctorat, L'UNIVERSITE BORDEAUX 1 2013.

Silva J., J. de Brito, R. Veiga, Recycled red-clay ceramic construction and demolition waste for mortars production, *J. Mater. Civ. Eng.* 22 (3) (2010) 236–244.

Silva.J, J. de Brito, Veiga R. Incorporation of fine ceramic in mortars. *Constr Build Mater* 2009;23:556–564

Senthamarai .R.M. and Devadas Manoharan; *Cement & Concrete Composites*, 27, 2005, 910-913

Vieira J.P.B., et al., *Cement and Concrete Research*, 41, 2011, 533-541.

Song .HW, Kwon SJ. Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure. *Cem Concr Res* 2007;37(6):909–15.

Soria F. Santamaria. Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción. *Mater Construcc* 1983;190–191:69–84.

Subathra Devi V., Gnanavel.B.K, Murthi. P 'Experimental Investigation on the mechanical properties of steel slag ceramic concrete 'International Journal of Chem Tech Research 8, pp 152-160, 2015.

Symonds, 1999 European Commission, Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts.

Son Tung P. Experimental Investigation and Modelling of Carbonation Process in Cement Materials, The Open Civil Engineering Journal, 2013, 7, 116-125

A.Tafraoui, 2009 Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie).Application aux nouveaux bétons, thèse doctorat, L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Tiles and Bricks Europe, 2011.

Torgal.F.P, S. Jalali .Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete' Materials and Structures 2010.

Torkittikul.P, A. Chaipanich, “Utilization of ceramic waste as fine aggregate within portland cement and fly ash concretes”, cement and concrete composites 32, 2010, 440-449.

Valcuende.M, Parra C. Natural carbonation of self-compacting concretes. Constr Build Mater 2010;24(5):848–53.

Vieira .T, A.V. Alves, J. de Brito, J.R. Correia, R.V. Silva, Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware, Materials and Design 90 (2016) 767–776

Westerholm .M, Lagerblad B, Silfwerbrand J, Forssberg E. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. Cem Concr Compos 2008;30(4):274–82.

Zivica V., Bajza A., Acidic attack of cement based materials, a review. Part 1. Principle of acidic attack, Construction and Building Materials 15 (2001) 331-340.