

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة حسيبة بن بوعلي- الشلف

Université Hassiba Benbouali –Chlef

كلية الهندسة المدنية و المعمارية

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

قسم الهندسة المدنية

Département de Génie-civil



Mémoire de Master
Filière : Génie Civil
Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème

Performances d'un mortier contenant des poudres fines
issues de déchets de construction.

Présenté par :

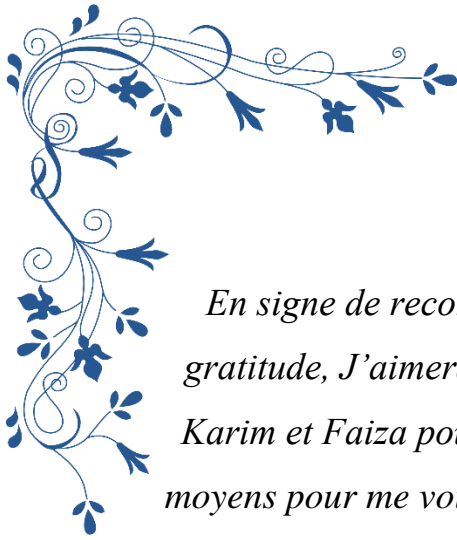
EZZIANE Sarra Malak

KEMMAD Randa

Dirigé par :

Pr. EZZIANE Karim

Promotion : 2023/2024



Dédicace

En signe de reconnaissance et l'expression de ma profonde gratitude, J'aimerai dédier ce travail à mes précieux parents Karim et Faiza pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour eux. Que dieu les protège.

A ma très chère sœur Manal pour le soutien inestimable et ses encouragements permanents qu'elle m'a apportée tout au long de la réalisation de ce travail, j'ai la chance d'avoir une grande sœur sur laquelle on peut compter.

A toute ma famille, je dédie ce travail en reconnaissance de l'amour qu'elle m'offre quotidiennement et de sa bonté exceptionnelle.

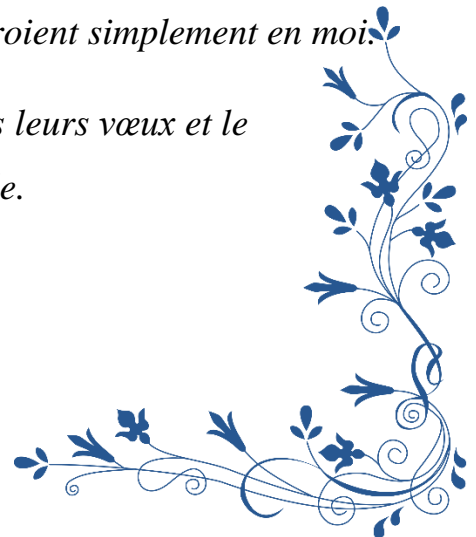
A mes amis, en témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons partagés ensemble et surtout mon binôme Randa.

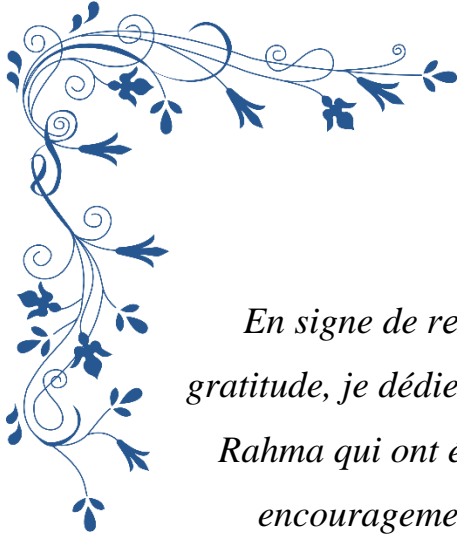
Et enfin, une dédicace à tous ceux qui, dans l'ombre, me souhaitent du succès, m'offrent un mot d'encouragement ou croient simplement en moi.

Que ce travail soit l'accomplissement de tous leurs vœux et le fruit de leur soutien infailible.

Merci à tous.

Malak





Dédicace

En signe de reconnaissance et l'expression de ma profonde gratitude, je dédie ce travail à mes chers parents Abd Elkader et Rahma qui ont été à mes côtés, qui m'ont soutenue par leurs encouragements, par leurs Douâa. Que dieu les garde.

À mon ange "Abdelmoumen" (paix à son âme), qui nous a quittés très tôt à un âge très jeune que dieu puisse nous réunira dans son paradis.

À mes frères et sœurs ma source de bonheur et joie.

À ma chère petite sœur Ikram.

A toutes mes amies, spécialement celles avec qui j'ai partagé ma joie, ma tristesse et ma réussite, qui m'ont aidée à dépasser tous les obstacles et qui m'ont toujours souhaitée le meilleur, citant : Soumia, Samia, yakine, Roumaissa, Houaria.

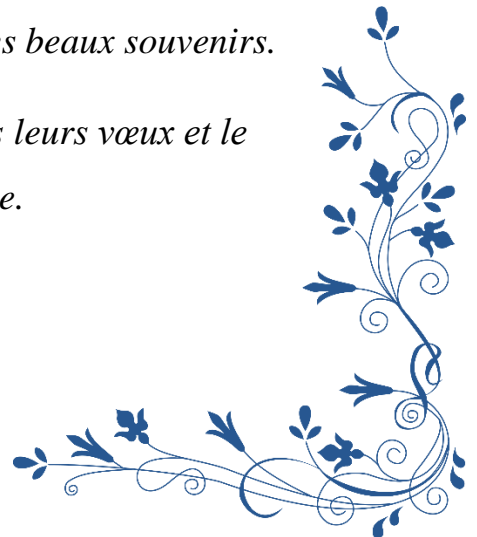
À mon binôme Malak

A toute personne qui m'a aimée, qui m'a soutenue, qui m'a encouragée et avec qui on a partagé ensemble des beaux souvenirs.

Que ce travail soit l'accomplissement de tous leurs vœux et le fruit de leur soutien infailible.

Merci à tous.

Randa





Remerciements

Après des années d'efforts consécutifs, enfin arrive le moment où on recevra notre diplôme AL-Hamdoulillah. On remercie Dieu le tout-puissant de nous avoir donné le courage et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement du Pr EZZIANE Karim ; on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa disponibilité et pour ses précieux conseils durant la préparation de ce travail.

Nous souhaitons aussi remercier la doctorante EZZIANE Manal pour son suivi et son aide pour la réalisation de ce travail. Nos vifs remerciements vont aussi aux membres du jury qui ont accepté de juger ce modeste travail.

Enfin nous ne pourrions terminer ces remerciements sans penser à l'ensemble de nos enseignants qui sont à l'origine de tout notre savoir et qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours universitaire. On remercie nos familles et nos amis pour leur soutien.

Nous adressons aussi notre reconnaissance à tous le personnel technique et administratif, et en particulier Saiah Aissa Abdelkader, pour leurs assistances et aides.

Sans le soutien et les conseils qui nous ont été donnés, on n'aurait pas pu arriver jusque-là.

Merci à tous.

Malak & Randa

ملخص

على مدى السنوات الماضية، كان مجال البناء يتوسع باستمرار ويشهد العديد من التغييرات الجذرية. مع وصول المساكن القديمة إلى نهاية عمرها الافتراضي والكوارث الطبيعية المتكررة بشكل متزايد، أصبح مجال البناء والتشييد عبارة عن دورة من البناء والهدم وسيكون لها تأثير كبير على نفاذ الموارد الطبيعية وكذلك التخزين الذي يمثل نفايات خاملة مزعجة للبيئة. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير ملاط بلاستيكي عالي الجودة وصديق للبيئة. يتم تصنيع الملاط عن طريق استبدال 10% أو 20% أو 30% من الإسمنت من مسحوق السيراميك المعاد تدويرها (FCMR) أو مسحوق الأجر المعاد تدويره (FBQR) أو مسحوق الخرسانة المعاد تدويرها (FBTR). تقوم هذه النفايات بدور المواد الإسمنتية وتعطي للملاط خصائص مقبولة من خلال مقاومة الضغط وحرارة الإماهة، الانكماش والتمتانة.

الكلمات المفتاحية: الملاط، المسحوق، الخرسانة المعاد تدويرها، السيراميك المعاد تدويرها، الأجر المعاد تدويرها، المقاومة، حرارة الاماهة، الانكماش و التمتانة.

Résumé

Au fil des années, le domaine de la construction est en constante expansion et subit de nombreux changements extrêmes. Avec des bâtiments anciens en fin de vie et des catastrophes naturelles de plus en plus fréquentes, le domaine de la construction a connu un cycle de construction et de déconstruction. Cela a un impact significatif sur l'épuisement des ressources naturelles ainsi que sur les décharges remplies de déchets inertes qui nuisent à l'environnement. Cette étude vise à développer un mortier plastique à la fois plus performant et plus respectueux de l'environnement. Les mortiers sont fabriqués en remplaçant 10 %, 20 % ou 30 % de ciment par des fines de céramiques recyclés (FCMR), des poudres de briques recyclés (FBQR) ou des poudres de bétons recyclés (FBTR). Ces déchets jouent le rôle de matériaux cimentaires et confèrent au mortier des performances acceptables en termes de résistance à la compression, de chaleur d'hydratation, de retrait et de durabilité.

Mots clés : Mortier, poudre, béton recyclé, céramique recyclé, brique recyclé, résistance, chaleur d'hydratation, retrait, durabilité.

Abstract

Over the years, the construction field is constantly expanding and undergoing many extreme changes. With old buildings at the end of their lifespan and natural disasters becoming more and more frequent, the construction industry has experienced a cycle of construction and deconstruction. This has a significant impact on the depletion of natural resources as well as landfills filled with inert waste that harm the environment. This study aims to develop a plastic mortar that is both more efficient and more environmentally friendly. Mortars are manufactured by replacing 10%, 20% or 30% of cement with recycled ceramic powders (FCMR), recycled brick powders (FBQR) or recycled concrete powders (FBTR). These wastes act as cementitious materials and give the mortar acceptable performance in terms of compressive strength, heat of hydration, shrinkage and durability.

Key words: Mortar, powder, recycled concrete, recycled ceramic, recycled brick, resistance, heat of hydration, shrinkage, durability.

Liste des symboles

C&DW	Construction and demolition waste
FCMR	Fines de céramique recyclée
FBQR	Fines de brique recycle
FBTR	Fines de béton recyclé
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
Mf	Module de finesse
E/C	Rapport eau sur ciment
SSB	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)
k	Constante de l'appareil
e	Porosité de la couche tassée du ciment
t	Temps mesuré en secondes
η	Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises)
V	Le volume du récipient
ρ_{app}	La masse volumique apparente
ρ_{abs}	La masse volumique absolue
Es	Equivalent de sable
H	Hauteur
Abs	absorption
Ca	Coefficient de capillarité
m_c	Masse de ciment ou liant contenu dans l'éprouvette
C (J/°C)	Capacité thermique du calorimètre et de l'éprouvette
α (J/h °C):	Coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre donné par l'étalonnage.
$\Delta\theta$	Echauffement de l'éprouvette par rapport à la température ambiante.
Rf	La résistance à la flexion
Rc	La résistance à la compression
P	La charge maximale de rupture
L	L'écartement entre les deux rouleaux d'appui en millimètre
a (mm)	La dimension entre la section transversale de l'éprouvette
S	Section de l'éprouvette
ΔL	Variation de longueur exprimé en μm
L	Longueur entre les deux bords de l'éprouvette
ε	Déformation de retrait exprimée en $\mu\text{m}/\text{m}$

Liste des figures

Figure 1.1 : Déchets de chantier et de démolition.	6
Figure 1.2 : Nature des déchets d'après l'étude réalisée par l'ADEME [4].	8
Figure 1.3 : Représentation schématique du processus d'élaboration des granulats recyclés [17].	14
Figure 1.4 : Constituants de granulats recyclés. [20].	16
Figure 1.5 : Briques pleines et perforées.	17
Figure 1.6 : Protocole de préparation des fines de brique.	17
Figure 1.7 : Déchets de céramiques.	18
Figure 1.8 : Image par MEB d'un grain de poudre de briques recyclés [27].	19
Figure 1.9 : Effet des FBTR comme substitut du ciment, avant et après carbonatation, sur l'ouvrabilité de la pâte [28].	19
Figure 1.10 : Variation des résistances à la compression de différentes mixtures [29].	20
Figure 1.11 : Résistances du béton avec de la poudre recyclée à différents taux de remplacement [30]. ...	21
Figure 1.12 : Résultats de la résistance à la compression des bétons avec FCMR [31].	21
Figure 1.13 : Résultats de résistance à la compression des mortiers avec FCMR [32].	22
Figure 1.14 : Densités apparentes sèches et volume des vides des mortiers à 90 jours [29].	23
Figure 1.15 : Teneur en hydroxyde de calcium dans des pâtes de ciment avec FCMR [31].	24
Figure 1.16 : Teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ par rapport au ciment initial après 24h d'hydratation avec FBQR [27]	24
Figure 1.17 : Images au microscope électronique à balayage des échantillons après 90 jours de cure avec FCMR [29].	25
Figure 1.18 : Distributions du volume des pores des pâtes de ciments à 24 heures mesurées par porosimètre à intrusion de mercure [27].	25
Figure 1.19 : Porosité totale mesurée par porosimètre à mercure et gravimétrie [32].	25
Figure 1.20 : Distribution des pores des pâtes en fonction de la teneur en FCMR [32].	26
Figure 1.21 : Absorptions capillaires initiales et secondaires des bétons avec et sans FCMR [31].	27
Figure 1.22 : Résistance à la pénétration aux ions chlore des bétons à granulats recyclés avec différents taux de FCMR [31].	28
Figure 1.23 : Déformations de retrait de séchage de différents mortiers [29].	28
Figure 2.1 : Sac de ciment provenant de la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) (CEM II/A 42.5).	32
Figure 2.2 : Vue des sables utilisés.	32
Figure 2.3 : Tamiseuse utilisée pour déterminer la granulométrie des sables.	33
Figure 2.4 : Courbes granulométriques des sables naturels utilisés.	34
Figure 2.5 : Mesure de la masse volumique apparente.	36
Figure 2.6 : Pycnomètre utilisé pour déterminer la masse volumique absolue d'un sable.	37
Figure 2.7 : Essai d'Equivalent de sable.	39
Figure 2.8 Essai de l'équivalent de sable.	39
Figure 2.9 : Etapes d'obtention des fines de déchets de chantiers.	41
Figure 2.10 : Appareil de Blaine.	43
Figure 2.11 : Organigramme pour déterminer le dosage en superplastifiant.	45
Figure 2.12 : Malaxeur pour mortier.	46
Figure 2.13 : Table à chocs.	47
Figure 2.14 : Remplissage des moules et conservation des éprouvettes.	47

Figure 2.15: Conservation des éprouvettes à l'air libre et sous l'eau.	47
Figure 2.16 : Essai d'étalement du mortier sur la table à secousses.	48
Figure 3.1 : Evolution de l'étalement des mortiers sur la table à secousses en fonction du taux de substitution du ciment.	57
Figure 3.2 : Evolution de l'enfoncement de l'aiguille de Vicat dans les mortiers à base de FCMR.	58
Figure 3.3 : Evolution de l'enfoncement de l'aiguille de Vicat dans les mortiers à base de FBQR.	59
Figure 3.4 : Evolution de l'enfoncement de l'aiguille de Vicat dans les mortiers à base de FBTR.	59
Figure 3.5 : Evolution des temps de début et de fin de prise des différents mortiers.	60
Figure 3.6 : Variation des masses volumiques des mortiers à l'état frais et durci en fonction du taux de substitution du ciment par les fines.	61
Figure 3.7 : Evolution des chaleurs d'hydratation des mortiers contenant des déchets de construction.	63
Figure 3.8 : Evolution des flux de chaleur d'hydratation des mortiers contenant des déchets de construction.	64
Figure 3.9 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du taux de substitution du ciment par les fines.	64
Figure 3.10 : Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution du ciment par les fines de déchets de construction.	65
Figure 3.11 : Evolution de l'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution du ciment par les fines de déchets de construction.	66
Figure 3.12 : Evolution de l'absorption capillaire des différents mortiers au cours du temps.	67
Figure 3.13 : Evolution du coefficient de l'absorption capillaire en fonction du taux de substitution du ciment par les fines de déchets de construction.	68
Figure 3.14 : Evolution de la perte en poids des différents mortiers conservés à l'air libre.	69
Figure 3.15 : Evolution de la déformation du retrait d'un mortier contenant des FCMR durcissant à l'air libre.	70
Figure 3.16 : Evolution de la déformation du retrait d'un mortier contenant des FBQR durcissant à l'air libre.	70
Figure 3.17 : Evolution de la déformation du retrait d'un mortier contenant des FBTR durcissant à l'air libre.	71
Figure 3.18 : Relation entre la résistance à la traction et celle à la compression.	72
Figure 3.19 : Comparaison des résistances à la compression avec celles du mortier témoin.	73
Figure 3.20 : Comparaison des résistances à la compression avec celles du mortier témoin.	74
Figure 3.21 : Comparaison des chaleurs d'hydratation avec celle d'un mortier témoin.	75

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Quantités de débris issus des catastrophes naturelles en Algérie [15].	12
Tableau 2.1 : Composition de ciment (CEM II/A 42.5) de Chlef.	32
Tableau 2.2 : Module de finesse du sable naturel combiné.	35
Tableau 2.3 : Masse volumique apparente du sable combiné.	36
Tableau 2.4 : Masse volumique absolue du sable combiné.	37
Tableau 2.5 : Résultats de mesure de l'équivalent de sable naturel.	40
Tableau 2.6: Valeurs des masses volumiques absolues des poudres utilisées	42
Tableau 2.7 : Résultats de mesure de la surface spécifique.	43
Tableau 2.8 : Composition minérale de l'eau de gâchage.	43
Tableau 2.9 : Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant (SUPERIOR 9 WG).	44
Tableau 2.10 : Compositions des mortiers testés.	45
Tableau 2.11: Différentes étapes de malaxage du mortier.	46
Tableau 3.1 : Valeurs de la chaleur d'hydratation dégagée en J/g pour différents types de déchets de construction	62

Table des matières

Dédicace.....	II
Dédicace.....	III
Remerciements	IV
ملخص	V
Résumé	V
Abstract.....	V
Liste des symboles	VI
Liste des figures	VII
Liste des tableaux.....	IX
Table des matières.....	10
Introduction générale	2
1. Revue bibliographique	5
1.1. Introduction	6
1.2. Caractéristiques des déchets.....	7
1.3. Déchets de chantier et de démolition	7
1.3.1. Déchets inertes	8
1.3.2. Déchets non inertes non dangereux	8
1.3.3. Déchets spéciaux.....	9
1.4. Traitements des déchets de chantier	9
1.5. Recyclage	10
1.6. Pratique de recyclage des déchets de construction	10
1.6.1. Au Canada	11
1.6.2. Aux Etats-Unis	11
1.6.3. Au Japon.....	11
1.6.4. En Australie	11
1.6.5. Aux Pays-Bas	11
1.6.6. En Algérie	12
1.7. Processus d'élaboration des granulats recyclés	12
1.8. Différents types de granulats recyclés	14
1.8.1. Fines du béton recyclé.....	15

1.8.2. Fines de brique recyclé.....	16
1.8.3. Fines de céramique recyclé	18
1.9. Travaux sur les fractions fines	18
1.9.1. Rhéologie	18
1.9.2. Résistance à la compression.....	19
1.9.3. Densité apparente sèche et volume des vides	22
1.9.4. Produits d'hydratation	23
1.9.5. Résultats de la microstructure	24
1.9.6. Porosité	25
1.9.7. Absorption capillaire	26
1.9.8. Résistance à la pénétration des ions chlore	27
1.9.9. Retrait	28
1.10. Conclusion.....	29
2. Protocole expérimental.....	30
2.1. Introduction	31
2.2. Identification et Caractérisation des Constituants	31
2.2.1. Ciment.....	31
2.2.2. Sable naturel	32
2.2.3. Fractions Fines issues de déchets de chantier	40
2.2.4. Eau de gâchage.....	43
2.2.5. Superplastifiant	43
2.3. Programme expérimental	44
2.4. Préparation des échantillons.....	45
2.4.1. Remplissage des moules	46
2.4.2. Conditions de conservation des éprouvettes	47
2.5. Essais réalisés sur mortier	48
2.5.1. Essai d'étalement	48
2.5.2. Essai de la prise	48
2.5.3. Masse volumique du mortier frais et durci	49
2.5.4. Analyse calorimétrie semi adiabatique	49
2.5.5. Résistance à la flexion	51
2.5.6. Résistance à la compression.....	51
2.5.7. Porosité accessible à l'eau.....	52

2.5.8. Absorption d'eau par capillarité	53
2.5.9. Perte de poids	54
2.5.10. Retrait de séchage.....	54
2.6. Conclusion.....	55
3. Résultats et discussions.....	56
3.1. Introduction	57
3.2. Présentation des résultats.....	57
3.2.1. Etalement	57
3.2.2. Prise du ciment.....	58
3.2.3. Masse volumique du mortier frais et durci	61
3.2.4. Chaleur d'hydratation	62
3.2.5. Résistance à la flexion	63
3.2.6. Résistance à la compression.....	64
3.2.7. Porosité accessible à l'eau.....	65
3.2.8. Absorption d'eau par capillarité	66
3.2.9. Perte en poids	68
3.2.10. Retrait	69
3.3. Analyse des résultats.....	71
3.3.1. Relation entre la résistance à la flexion et à la compression	71
3.3.2. Relation entre les résistances à la compression	72
3.3.3. Relation entre les retraits.....	74
3.3.4. Relation entre les chaleurs d'hydratation	75
3.4. Conclusion.....	75
4. Conclusions générales.....	77
Bibliographie	80



Introduction générale



Introduction générale

L'évolution de l'humanité dans les différents domaines a engendré des crises économiques et écologiques, pour cela la bonne gestion des ressources et la protection de l'environnement sont devenues des besoins universels. 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 protéger l'environnement.

En développement durable, l'environnement est l'un des objectifs de sa réussite, par la diminution d'émissions des gaz à effet de serre, la réduction de la consommation énergétique, l'utilisation rationnelle des ressources naturelles et le recyclage des déchets. L'industrie de la construction est connue pour consommer la majeure partie des ressources naturelles et générer de grandes quantités de déchets de construction et de démolition (C&DW). Malgré les avantages, l'impact négatif des activités de construction sur l'environnement a des répercussions graves dans le monde entier. L'intégration de ces déchets solides dans le circuit de la construction constitue aujourd'hui les nouvelles opportunités d'approvisionnement en ressources granulaires comme une alternative aux granulats naturels qui ont tendance à devenir rares. Avec l'augmentation du coût des projets de construction et les préoccupations environnementales croissantes, l'industrie de la construction est sous une pression immense des organismes gouvernementaux et environnementaux pour réduire au minimum les déchets de construction et d'adopter des pratiques plus durables.

Certains pays, comme la Suisse, recyclent la quasi-totalité de leur béton. En Europe, le taux de recyclage varie du minimum en Portugal à 95% en Suisse. L'utilisation des granulats recyclés dans la production de béton n'a pas encore franchi le seuil du laboratoire. Une évaluation dans ce domaine a été faite à El-ASNAM (aujourd'hui CHLEF) après le tremblement de terre du 10/10/1980 en collaboration avec le Centre Belge des Sciences et Techniques du Bâtiment (C.S.T.C.). Les experts estiment qu'environ 20% du béton actuellement utilisé pourrait techniquement être remplacé par du béton recyclé.

Les propriétés du béton recyclé ont déjà été étudiées par de nombreux scientifiques à travers le monde. Outre la composition, les granulats recyclés ont des propriétés

différentes de celles des granulats naturels. En effet, les granulats recyclés sont plus poreux, ont un coefficient d'absorption d'eau plus élevé, contiennent des hydrates et présentent des zones de transition inter-faciale différentes que celles du béton coulé. Il est donc important de prédire le comportement du béton fabriqué à partir de granulats recyclés pour permettre son utilisation dans la construction. La combinaison de granulats recyclés et d'additions minérales peut contrecarrer ce problème et rendre la dégradation des performances moins perceptible.

Les matrices cimentaires confectionnées avec une addition de fines de déchets de construction 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.

Les laboratoires de recherche sur les matériaux ont commencé à développer des composés de béton et de mortier à base de ces déchets, en raison de leurs avantages, d'un point de vue environnemental (réduction de la quantité de déchets), d'un point de vue économique (réduction des coûts de production) et technique (amélioration de l'état physique et propriétés mécaniques du béton et du mortier).

Parmi ces déchets peuvent figurer les déchets céramiques, les déchets de briques et les déchets de béton. Ces déchets sont broyés en poussière puis utilisés comme additif partiel au ciment pour la fabrication de béton ou de mortier. Des recherches sur la substitution des constituants des mortiers ou des bétons, par des déchets sont effectuées à travers le monde, soit comme ajouts minéraux (par substitution partielle du ciment), soit comme granulats fins ou granulats grossiers (par substitution des granulats traditionnels) afin d'améliorer certaines propriétés à l'état frais (telles que la fluidité) ou à l'état durci (telle que la durabilité des bétons).

L'objectif principal de notre travail est de caractériser les performances d'un mortier contenant des poudres fines issues des déchets de construction telle que la céramique, la brique et le béton. On procède à leurs broyages jusqu'à atteindre une finesse similaire à celle d'un ciment ordinaire. Ces fractions fines peuvent remplacer partiellement le ciment et contribuer à conserver l'environnement et diminuer le prix du ciment en jouant le rôle d'une addition minérale.

Structure du mémoire :

Le document se compose de trois parties. Après une introduction générale définissant la problématique et les objectifs, trois chapitres décrivant ce travail.

Chapitre 1 : Bibliographie ; le premier chapitre constitue un tour d’horizon sur le phénomène des déchets de constructions en générale, et le recyclage des bétons, briques et céramiques comme gros granulats, granulats fins spécialement et le rôle qu’il joue lorsqu’ils sont ajoutés comme substituant au ciment.

Chapitre 2 : Ce chapitre concerne le programme expérimental mis au point afin d’atteindre les objectifs fixés. Les caractéristiques des matériaux utilisés et les différentes procédures d’essais sont décrites.

Chapitre 3 : Le troisième chapitre présent l’effet de l’incorporation des poudres fines (béton, brique, céramique) sous forme de substitution de 10%, 20%, 30% sur l’ouvrabilité du mortier, ses propriétés mécaniques et ses propriétés physico-chimiques. Ce chapitre est également une fenêtre sur les méthodes de recherche qui peuvent mener vers le domaine du recyclage des déchets de construction comme matériaux cimentaires.

En fin ce travail est couronné par une conclusion générale et des recommandations pour des futurs travaux.



*Revue
bibliographique*



1.1. Introduction

En Algérie, la loi N° 01-19 du 12 décembre 2001 définit des différents types de déchets comme suit : tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et plus généralement toute substance, ou produit et tout beine meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer (J.O.R.A, 2001) [1]. Sont considérés comme déchets, tous les matériaux résiduels générés lors de la construction, de la rénovation ou de la démolition de bâtiments et d'infrastructures. Cela inclut des éléments tels que des débris de béton, des matériaux d'emballage, du bois, du métal, des plastiques et d'autres déchets issus du processus de construction. Selon le code de l'environnement, Les déchets de chantier sont tous les déchets produits par le secteur du bâtiment et des travaux publics. Ils sont issus des travaux de construction, de démolition ou de réhabilitation de bâtiment comme c'est illustré sur la figure 1.1.



Figure 1.1 : Déchets de chantier et de démolition.

À l'origine, les déchets humains étaient tous biodégradables et pouvaient donc être jetés sans conséquence dans des décharges sauvages. Il faut attendre après l'Antiquité pour que commence à se dessiner une gestion des déchets dans les grandes cités ; fosses creusées dans les cours intérieures des maisons, évacuation de déchets vers des décharges ou des champs.

Au Moyen Âge, la taille des villes augmente et les déchets des citoyens sont jetés dans la rue ou dans les rivières, provoquant des problèmes de salubrité.

Au XIXe siècle, les pouvoirs publics prennent conscience qu'une bonne hygiène est essentielle pour prévenir des maladies. Aussi, en 1883, Eugène Poubelle (1831-1907), préfet de Paris, signe un arrêté obligeant les Parisiens à jeter leurs déchets dans des récipients qui ont pris son nom : les "poubelles".

Dans les années 1920, des décharges à ordures sont créées. Le traitement des déchets et la propreté des villes deviennent une priorité pour l'État. L'objectif n'est plus l'élimination mais la valorisation des déchets.

De 1965 à 2006, avec l'évolution de la société et des modes de consommation, la production de déchets ne cesse d'augmenter. La réduction des déchets et leur valorisation sont des enjeux majeurs du développement durable [2].

1.2. Caractéristiques des déchets

On caractérise les déchets par quatre paramètres essentiels suivants :

✓ **La densité** : la connaissance de la densité est d'une grande importance pour le choix des moyens de collecte et de stockage.

✓ **Le degré d'humidité** : les ordures renferment une quantité suffisante d'eau variant en fonction des saisons et le milieu environnemental. Cette eau a une grande influence sur la rapidité de la composition des matières qu'elle renferme et sur le pouvoir calorifique des déchets.

✓ **Le pouvoir calorifique** : le pouvoir calorifique est défini comme la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité du poids en ordures brutes.

✓ **Le rapport des teneurs en carbone et azote** : le rapport C/N a été choisi comme critère de qualité des produits obtenus par le compostage des déchets. Il est d'une grande importance pour le traitement biologique des déchets, car l'évolution des déchets lors de la fermentation peut être suivie par la détermination régulière de ce rapport [3].

1.3. Déchets de chantier et de démolition

Les déchets issus de l'activité du bâtiment et des travaux publics présentent toutefois des caractéristiques particulières, permettant de les distinguer de la catégorie

des déchets ménagers et assimilés. En effet, étant constitués pour près de 70% de leur masse par des matériaux lourds à base minérale ainsi que d'autres déchets ayant un fort potentiel de valorisation. Les déchets de démolition et de construction sont composés des trois grandes catégories de déchets, à savoir des déchets inertes, des déchets non dangereux (plastiques, métaux, bois, cartons, ...) et des déchets dangereux (figure 1.2).

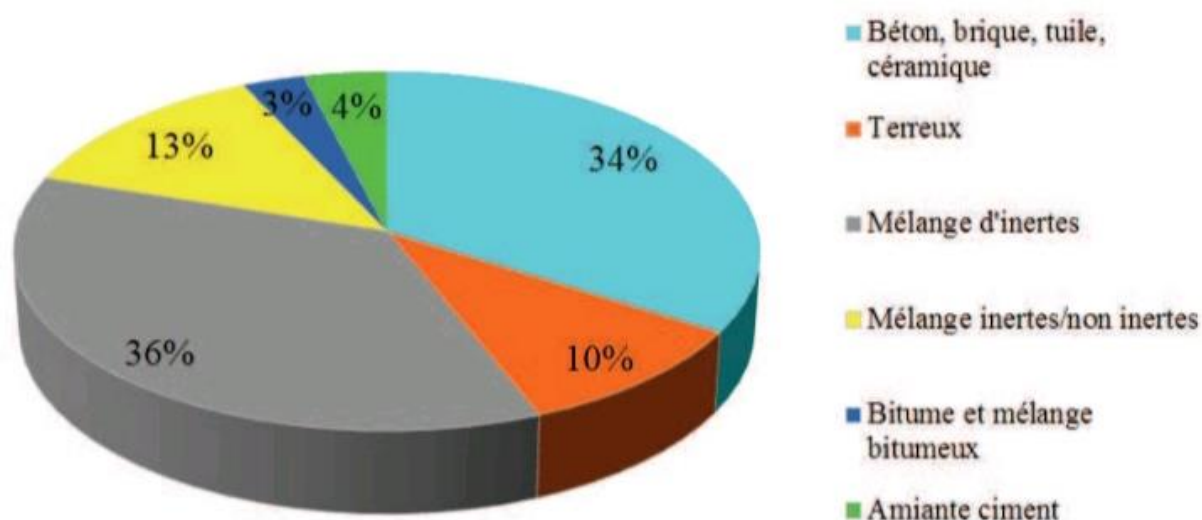


Figure 1.2 : Nature des déchets d'après l'étude réalisée par l'ADEME [4].

1.3.1. Déchets inertes

Les déchets inertes sont des déchets minéraux qui ne subissent pas de modification physiques ou chimiques. Ils sont stables et ne présentent pas de dangers pour l'environnement. Ils ne sont pas biodégradables, ne se détériorent pas au point de polluer l'environnement et ne nuisent pas à la santé. Les déchets inertes sont essentiellement constitués de : briques, béton, céramiques, minéraux, carrelage, etc. Les déchets inertes peuvent être :

- Utilisé comme remblai de chantier ;
- Recyclé en granulats ;
- Collecté par le centre de tri et de recyclage des déchets sur place [5].

1.3.2. Déchets non inertes non dangereux

Les déchets sont l'ensemble des déchets non inertes, ils ne sont pas toxiques et ils ne constituent pas de risque pour la santé ou l'environnement. Ils sont principalement générés par les entreprises et les industriels, mais aussi par les collectivités et les ménages. Les principaux déchets non dangereux sont :

- Les métaux ferreux et non ferreux ;
- Le bois non traité ;
- Emballages non souillés ;
- Les palettes, papiers, cartons ;

Ces déchets sont principalement traités par :

- Recyclage ;
- Valorisation énergétique ;
- Enfouissement [6].

1.3.3. Déchets spéciaux

Les déchets industriels spéciaux (DIS) sont les déchets toxiques constitués de substances dangereuses : solvants acides huiles usagées métaux lourds boues d'épuration emballages et chiffons ouillés piles et batteries. Ces déchets doivent être triés et bénéficier d'un traitement spécifique adapté. Les DIS doivent impérativement être stockés dans des conteneurs spéciaux, et traités dans des centres de valorisation par récupération ou régénération de déchets [7].

1.4. Traitements des déchets de chantier

➤ Réemploi :

Selon le code de l'environnement, on doit privilégier le réemploi. Par exemple, réutiliser des déblais sur un chantier pour un usage identique. Dans ce cas, ils ne sont pas qualifiés de déchets.

➤ Recyclage et valorisation :

Quand le réemploi n'est pas possible, privilégiez le recyclage. Cette alternative aux granulats de carrière est utilisée dans la construction de route, ou dans la fabrication de béton recyclés.

➤ Élimination :

Lorsqu'aucun de ces premiers traitements n'est possible, les déchets sont versés dans des installations de stockage pour traitement et élimination [8].

1.5. Recyclage

Le recyclage est un concept très ancien utilisé par les romains, qui a pour but de récupérer des déchets et de les transformer en de nouveaux objets réutilisables. Pendant la seconde Guerre mondiale, cette technique a commencé à attirer l'attention des gens car de nombreux bâtiments démolis produisaient beaucoup de gravats dont il fallait se débarrasser. Le recyclage et la ré-application des déchets dans le béton présentent des avantages environnementaux apparents, ainsi que de nombreux autres avantages. Premièrement, le recyclage des déchets dans le béton sous forme de granulats réduit la quantité de déchets et préserve les ressources naturelles [9]. L'utilisation des granulats recyclés comporte également des avantages économiques et contribue à la conformité réglementaire. Les granulats recyclés fabriqués sont devenus plus économiques que les granulats vierges en termes de coûts, de transport et d'augmentation du coût des débris d'enfouissement [9]. En Algérie, les catastrophes naturelles comme les séismes de Boumerdes et Chlef ont générés des quantités importantes de gravats.

L'une des premières utilisations des granulats recyclés dans la construction de chaussées a été sur la route américaine 66 dans l'Illinois dans les années 1940, lorsque le béton d'une partie de la route à deux voies existantes a été concassé et stocké pour être utilisé comme agrégat dans les deux secondes voies de l'autoroute. Le recyclage du béton est devenu plus courant dans les années qui ont suivi et cette pratique a été largement adoptée aux Etats-Unis depuis les années 1970 [10].

1.6. Pratique de recyclage des déchets de construction

L'idée de recyclage des matériaux de démolition était envisagée depuis la seconde guerre mondiale où les gravats provenant des bâtiments détruits par les bombardements étaient réemployés en Grande Bretagne et en Allemagne pour la reconstruction de différents ouvrages. Les granulats obtenus par ce recyclage comportaient une forte proportion de brique compte tenu de la nature des constructions à cette époque. Les travaux de recherche qui ont fait l'objet de plusieurs conférences internationales dans l'utilisation de béton de démolition et des déchets de maçonnerie comme agrégats dans le béton, connaissent actuellement une large application sur le terrain dans divers pays du monde [11].

1.6.1. Au Canada

Il y a dix ans, le Canada générerait environ 15 millions de tonnes par année de matériaux secs. En 1992, cette quantité diminuait à peu plus de 11 millions de tonnes. Ce sont les résidus issus de la construction et de la réparation des routes et des ponts qui arrivent en tête avec de 55 à 63 % de la génération totale des matériaux secs [12].

1.6.2. Aux Etats-Unis

Selon un rapport publié en 1986 [13], les résidus de construction et de démolition représenteraient 24% de tous les résidus solides disposés dans les lieux d'enfouissement, soit 31,5 millions de tonnes par année. Toutefois, lors de la conférence nationale sur les matières résiduelles en 1992, la quantité de résidus avait été évaluée à 110 millions de tonnes. Au cours des 25 dernières années, le taux de génération de débris de construction et de démolition a été estimé entre 0,05 kg/habitant et 1,60 kg/habitant par jour.

1.6.3. Au Japon

Au Japon, 77 millions de tonnes de débris de construction et de démolition étaient générées en 2005 (0,6 tonnes per capita). Le taux de récupération était de 80 %. Le béton compte pour 42% de ce volume et l'asphalte 19%. Le taux de recyclage de ces deux matières est de 98%. Les chiffres sur les quantités de matières et les taux de récupération sont des indices révélateurs de la volonté des pays à gérer cette matière [14].

1.6.4. En Australie

Les débris de construction et de démolition représentent 42,5 % de l'ensemble des déchets solides du pays. Ainsi, 13,7 millions de tonnes sont générées (0,64 tonne per capita). De ce volume, 7,8 millions de tonnes sont récupérées, représentant un taux de 57%. Les bétons occupent 81,8% du volume de débris de construction et de démolition et comptent un taux de récupération de 54% [14].

1.6.5. Aux Pays-Bas

Les débris de construction et de démolition générés annuellement aux Pays-Bas sont de 25 millions de tonnes (1,5 tonne per capita) [14]. Le taux de récupération est le plus élevé de l'Union européenne, atteignant 95 %. Le recyclage des bétons est présent dans ce pays depuis plusieurs années, favorisé par un manque de disponibilité d'agrégats naturels et d'espace pour l'enfouissement.

1.6.6. En Algérie

Au cours des 10 dernières années, le taux de génération de débris de construction et de démolition en Algérie a connu une augmentation très remarquable suite aux déchets générés par les entreprises de bâtiments et travaux publics ainsi qu'au vieillissement des constructions et en grande partie au séisme de 2003 qui avait frappé les wilayas d'Algérie, Boumerdes, Tizi-Ouzou, Bejaia, et autres; en produisant des millions de tonnes de matériaux secs (Brique et Béton en particulier) qui résultent de la démolition des bâtiments et des ouvrages d'art sinistrés, les quantités restent inconnues. Les matériaux de démolition sont rarement recyclés en Algérie en matière d'agrégats pour béton de ciment ou béton bitumeux, malgré le déficit entre l'offre et la demande en granulats qui dépassera les 20% de la production. Le tableau 1.1 ci-dessous récapitule quelques données statistiques retirées de la commission de L'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (C.A.R.T.E) :

Tableau 1.1 : Quantités de débris issus des catastrophes naturelles en Algérie [15].

Lieu	Date	Dégâts
EL Asnam – Chlef (séisme)	10 octobre 1980	2900 logements détruits
Constantine (Explosion gazoduc)	Février 2003	316 habitations+ un marché hebdomadaire
Bab El Oued-Alger (inondations)	9 et 10 novembre 2001	22400 logements endommagés et 300 à détruire complètement
Azazga-Tizi Ouzou (inondations)	12 octobre 1971	Des centaines d'habitations détruites
Zemmouri-Boumerdes (séisme)	21 mai 2003	100.000 habitations détruites

1.7. Processus d'élaboration des granulats recyclés

Les granulats recyclés sont obtenus par concassage et criblage des déchets inertes sur des plateformes de recyclage. À réception, les déchets entrants sont contrôlés et peuvent être refusés s'ils ne répondent pas aux critères d'admissibilités. Ainsi le béton, les briques, tuiles et céramiques, le verre, les matériaux bitumineux, le ballast, la terre et pierres (terre végétale exclue) sont acceptés soit sous la forme de mono-matériaux ou bien de matériaux en mélange.

Le processus d'élaboration en plateforme de recyclage est identique à celui des granulats naturels issus de roches massives. Les granulats recyclés, requièrent néanmoins une étape préalable de tri pour éliminer les éléments métalliques, éventuellement les éléments indésirables légers résiduels et normalement minoritaires (plâtre, bois, plastiques, carton etc.). Parfois un scalpage (criblage) est nécessaire pour les éléments les fins potentiellement argileuses. Les plateformes de recyclage peuvent être équipées d'installations fixes mais sont plus souvent équipées d'installations mobiles de concassage et de criblage. Dans ce cas de figure, des campagnes de concassages sont réalisés lorsque le stockage de déchets inertes est suffisamment important (Figure 1.3).

En sortie de concasseur, les granulats recyclés, 0/150 mm au maximum, subissent une étape de criblage à l'aide d'un cribleur vibrant ou bien d'un cribleur à étoiles. Cette opération de criblage est définie en fonction des matériaux visés pour le marché local (graves recyclées pour les travaux publics ou bien gravillon pour le béton prêt à l'emploi). Dans certains cas, les matériaux refusés au cribleur peuvent être réintroduit dans le concasseur pour subir un concassage secondaire.

Le criblage vibrant ou rotatif à trommel et le criblage à étoiles sont les deux techniques les plus couramment utilisées pour cette étape. Le criblage vibrant ou rotatif à trommel possède des grilles avec des mailles de différentes tailles permettant d'obtenir une fraction 0/d1 suivie d'une seconde fraction d1/d2. Le principe du crible à étoiles consiste à classer les grains par variation de vitesse. Les matériaux plus petits tombent les premiers, et les plus gros grains sont acheminés jusqu'à la fin du crible.

En sortie de cribleur, les granulats recyclés sont mis en stock avant d'être valorisés dans le secteur de la construction (travaux publics pour majeure partie et dans une moindre mesure dans le béton prêt à l'emploi) [16].

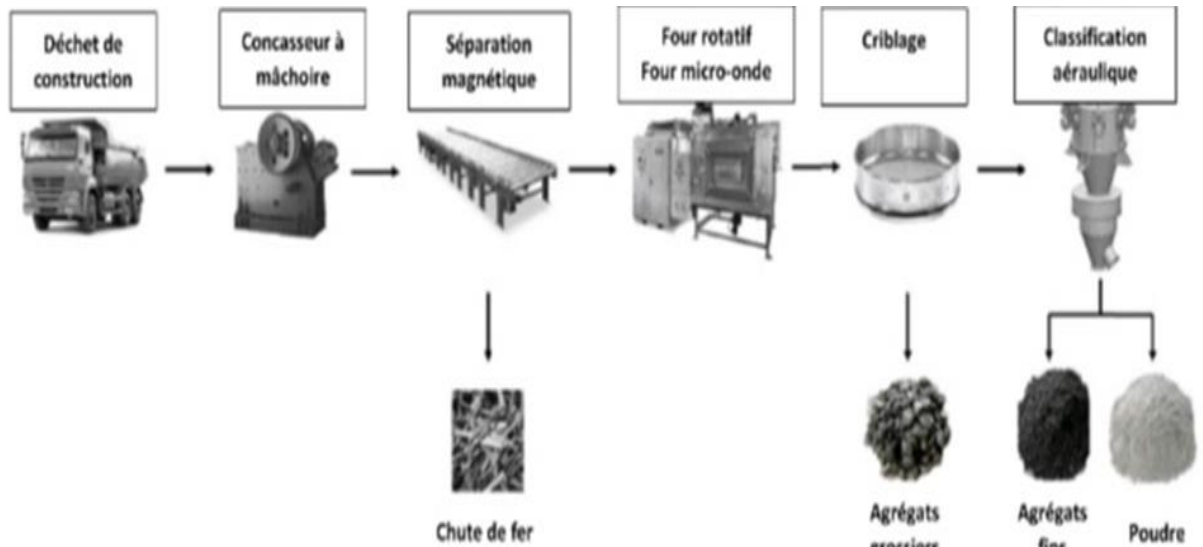


Figure 1.3 : Représentation schématique du processus d'élaboration des granulats recyclés [17].

1.8. Différents types de granulats recyclés

Les granulats recyclés sont issus de bétons recyclés ou de matériaux inertes recyclés. En règle générale, on distingue quatre classes principales de granulats recyclés [18].

a) Granulats de débris de béton :

Proviennent de la démolition de bâtiments ou d'infrastructures de génie civil (bétons ou béton armé d'acier)



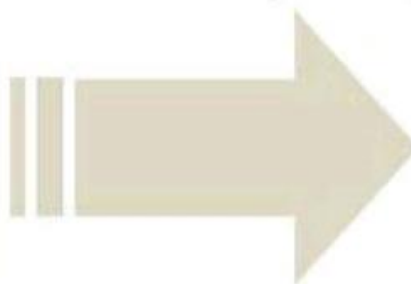
b) Granulats de débris de maçonneries :

Proviennent de la construction, de la rénovation et de la démolition des bâtiments



c) Granulats de débris hydrocarbonés :

Proviennent de la démolition d'infrastructures de génie civil (routes...), de la démolition de parkings...



d) Granulats de débris mixtes :

Proviennent de la construction / rénovation démolition de bâtiments (briques/blocs/tuiles...)



1.8.1. Fines du béton recyclé

En termes d'utilisation des granulats recyclés dans la production de nouveau béton, il est établi que seul le remplacement d'une partie des gros granulats ne modifie pas significativement les propriétés du béton. Cependant, il n'y a pas de consensus concernant le remplacement des granulats fins. Le principal facteur mentionné par certains chercheurs contre l'utilisation de la partie fine des granulats recyclés est son absorption d'eau élevée, ce qui peut conduire à un béton avec de moins bonnes performances à l'état frais. Néanmoins, certaines recherches indiquent que l'utilisation de la partie fine des granulats recyclés peut être viable, si la quantité utilisée ne conduit pas à une perte importante de ses propriétés, tant mécaniques que de durabilité [19].

Dans les granulats recyclés, selon la figure 1.4, on peut distinguer :

a) Fines recyclées :

Ce sont des éléments broyés dont la taille peut être comprise entre 0 et 500 μ m. Ces éléments sont essentiellement constitués de pâte de ciment durci ou/et des granulats broyés d'origine naturelle ou/et du ciment anhydre.

b) Granulats fins recyclés (sable recyclé) :

Il est généralement constitué de la fraction granulaire 0/4mm. Il contient du sable de taille allant de 500 μ m à 4 mm, en plus des éléments fins (0/500 μ m). Ce dernier est constitué de granulats d'origine naturelle et de mortier primaire qui comprend à son tour du ciment anhydre et hydraté.

c) Granulats grossiers recyclés :

Ce sont les granulats recyclés dont la fraction granulaire est supérieure à 4mm. Leur constitution est proche de celle des sables recyclés avec une teneur en mortier accolé plus grande.

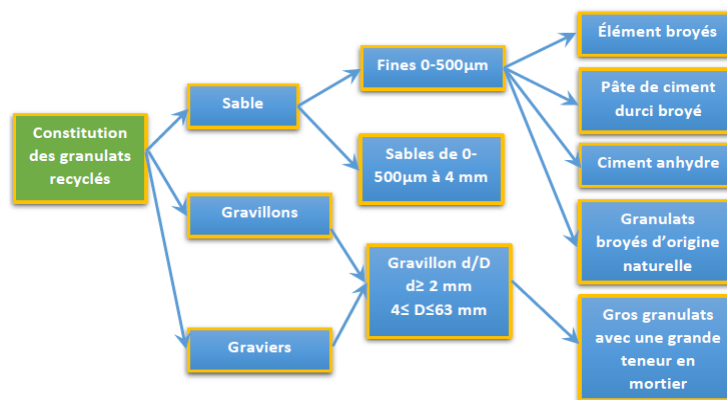


Figure 1.4 : Constituants de granulats recyclés. [20].

D'autres travaux [19] ont analysé la résistance à la compression de divers mélanges de béton contenant la partie fine des granulats recyclés et ils ont trouvé des valeurs semblables à celle du béton de référence (60 MPa). Ceci se justifie par la présence de ciment non hydraté dans les fines recyclé, et par la meilleure adhérence entre la pâte de ciment et le granulats fin recyclé, à cause de sa plus grande porosité [21]. Par contre, il a été obtenu une augmentation significative dans le rapport E/L pour les mélanges contenant des fines recyclées. Ces fines particules absorbent une grande quantité d'eau, forçant une augmentation du rapport E/L afin de maintenir l'affaissement approprié [21]. Cette augmentation d'eau cause alors une diminution dans les propriétés mécaniques du béton.

1.8.2. Fines de brique recyclé

Les briques sont des produits céramiques dont la matière première est l'argile avec ou sans additifs. La forme des briques est généralement un parallépipède rectangle. Ils

sont souvent utilisés dans le bâtiment et les travaux publics. Comparé à d'autres matériaux, c'est l'un des matériaux de construction les plus anciens (figure 1.5).

Les déchets de briques se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets (briques non conformes ou cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions. Par ailleurs des études ont montré un caractère pouzzolanique de ces déchets, raison pour laquelle il a été décidé de substituer une partie du clinker par ce sous déchet après son broyage, pour le transformer en poudre fine comme c'est illustré sur la figure 1.6 [22].

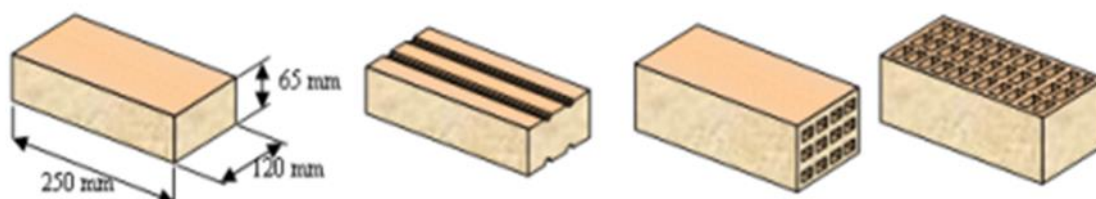


Figure 1.5 : *Briques pleines et perforées.*

Les fines de brique peuvent être définies comme un filler, c'est-à-dire un matériau avec une granulométrie inférieure à 0,063 mm selon EN NF 12620 [23]. Les fillers sont utilisés dans des formulations de mortier ou béton pour permettre une amélioration des propriétés d'écoulement, de résistance mécanique et de durabilité. Les fines de brique peuvent être utilisées comme substituant ou ajout dans les mortiers ou bétons à base de ciment ou de matériaux alcali-activés.

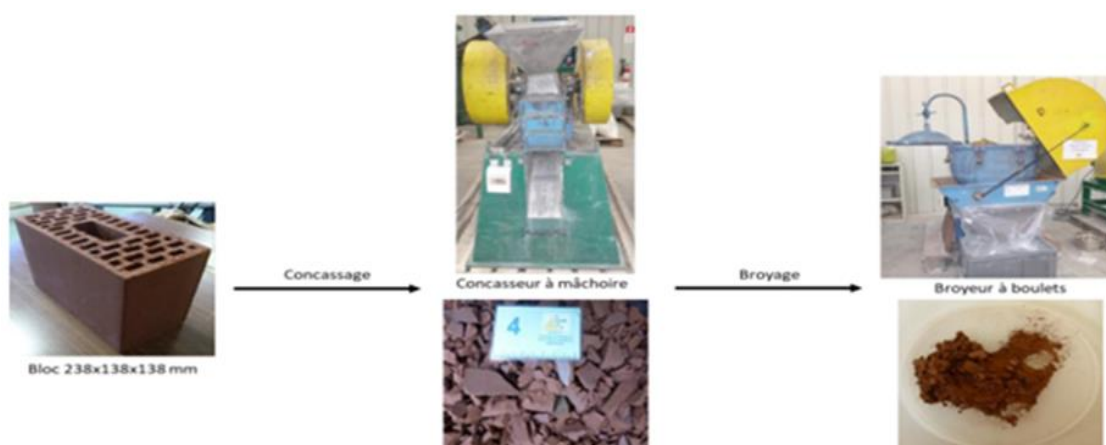


Figure 1.6 : *Protocole de préparation des fines de brique.*

1.8.3. Fines de céramique recyclé

De nos jours, la céramique est la décoration architecturale la plus populaire, et est largement utilisée comme assiette et matériel sanitaire. En Chine, environ 25% de céramique, soit 13 millions de tonnes, sont produits et jetés chaque année en raison des dommages causés lors du transport et d'autres raisons [24]. La figure 1.7 montre des déchets de céramiques brutes et concassés.

Parmi eux, environ 95% ne sont pas recyclés par des moyens efficaces. Avec la demande croissante de céramiques, il est prévisible que la quantité de déchets de céramique continuera d'augmenter [25]. L'utilisation des déchets de céramique en tant que substitution de ciment est un moyen efficace de résoudre le problème de l'accumulation et de réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ lors de la production de ciment [26].



Figure 1.7 : Déchets de céramiques.

1.9. Travaux sur les fractions fines

De nombreux chercheurs tentent de réutiliser les déchets de construction et de démolition pour atténuer les problèmes causés par leur stockage. Par exemple, l'utilisation des fractions fines comme additions cimentaires pour remplacer une part de ciment est une méthode efficace pour réduire les émissions de CO₂ lors de la production du ciment et pour économiser l'espace de décharge et contribuer aux avantages écologiques de l'industrie du ciment.

1.9.1. Rhéologie

Les effets des FBQR sur le comportement rhéologique et les performances d'hydratation au jeune âge avec différents taux de substitution allant de 0 % à 40 % ont été étudiés par Chen et al. 2024 [27]. Les résultats montrent que, plus le taux de substitution est élevé, plus le l'étalement au mini-cône est faible. Par exemple, par rapport à

l'échantillon témoin, l'étalement au mini-cône diminue de 13.8% et 24.6% et le seuil de cisaillement augmente de 4.1% et 53.4% lorsque le ciment est remplacé par 20 et 40%. La figure 1.8 révèle que les particules de la poudre de briques recyclés possèdent une surface rugueuse avec des pores visibles, contribuant à sa plus grande absorption d'eau.

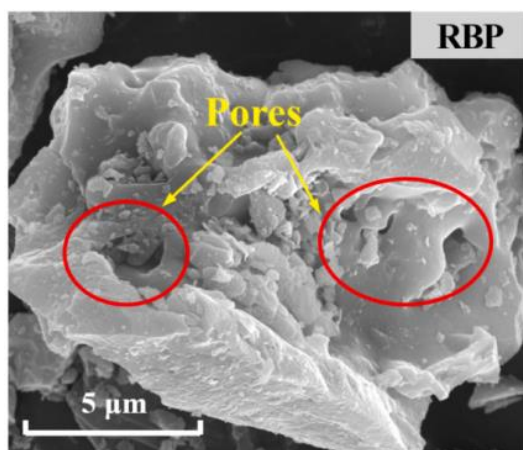


Figure 1.8 : Image par MEB d'un grain de poudre de briques recyclés [27].

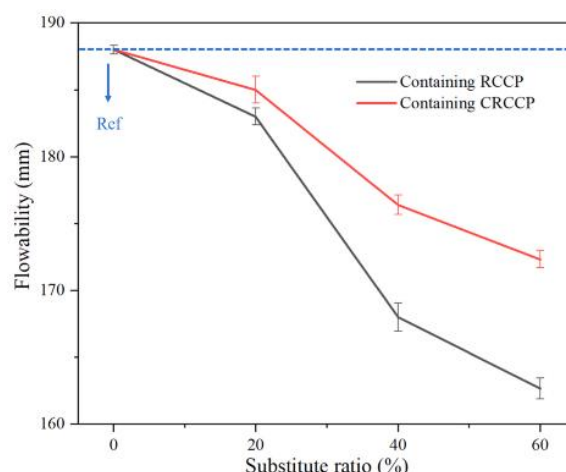


Figure 1.9 : Effet des FBTR comme substitut du ciment, avant et après carbonatation, sur l'ouvrabilité de la pâte [28].

Dans une étude, des FBTR carbonatées et non carbonatées ont été introduites comme des additions cimentaires avec des taux de 0%, 20%, 40%, 60%. Les résultats expérimentaux de la figure 1.9 montrent que le traitement de carbonatation peut améliorer la maniabilité du béton avec une amplitude allant de 1,08% à 5,61% [28].

1.9.2. Résistance à la compression

Mohsen et al. (2023) [29] ont rendu compte des résultats d'une étude expérimentale sur l'effet des FCMR comme substitut de liant dans les mortiers de maçonnerie à base de ciment. Dans le cadre d'une enquête expérimentale approfondie, des échantillons standards de mortier ont été fabriqués avec des taux de remplacement de 0% à 60% avec durcissement humide jusqu'à 90 jours. La Figure 1.10 [29] montre les résultats de résistance à la compression des échantillons de mortiers. Toutes les résistances sont supérieures de 10% ou similaire à celles du mortier témoin à l'exception du mortier contenant 60% de poudre de céramique. Le mortier avec 10% de céramique offre la meilleure résistance à la compression de 28,1 et 33,5 MPa respectivement à l'âge de 28 et 90 jours. Cette résistance diminue progressivement jusqu'au mortier avec 50% de poudre de céramique. Cette performance remarquable de la poudre de céramique peut être attribuée à sa haute teneur en particules fines et à sa pouzzolanicité.

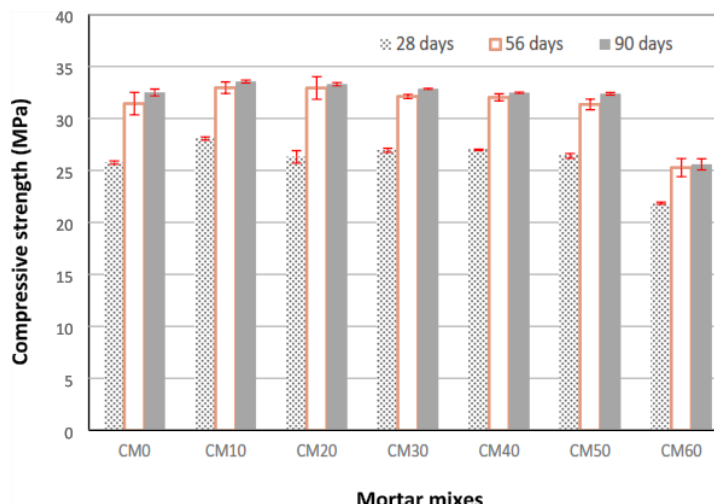


Figure 1.10 : Variation des résistances à la compression de différentes mixtures [29].

Les résultats de la figure 1.11 [30] montrent que le béton contenant 10 %, 20 % et 30 % de ciment substitué par les FBQR enregistre une chute de résistance à la compression respectivement de 2,1%, 6,6% et 19,5% ; de même, le remplacement du 10%, 20% et 30% de ciment par les FBTR réduit la résistance à la compression de 7,0%, 16,2% et 32,2%, [30].

Le C-S-H, qui contribue principalement au développement de la résistance des matériaux cimentaires, est fortement influencé par l'incorporation des poudres en remplacement au ciment. Cette substitution réduit effectivement la quantité de clinker de ciment et affecte par la suite la formation de C-S-H, conduisant à la réduction de la résistance du béton [30]. Attribué à la meilleure finesse et à l'activité pouzzolanique de la poudre de briques par rapport à la poudre de béton, le béton de poudre de brique a une meilleure microstructure et une meilleure réaction d'hydratation que le béton avec la poudre de béton, ce qui conduit à une meilleure résistance mécanique de ce béton.

L'influence de différentes substitutions de poudre carbonatée (FBTR) sur la résistance à la compression du béton montre une augmentation initiale suivie d'une diminution, avec une plage de variation de 2,27 MPa à 4,47 MPa à 28 jours, attribuée à l'accélération effective de l'hydratation due à une légère augmentation de la teneur en calcite [28].

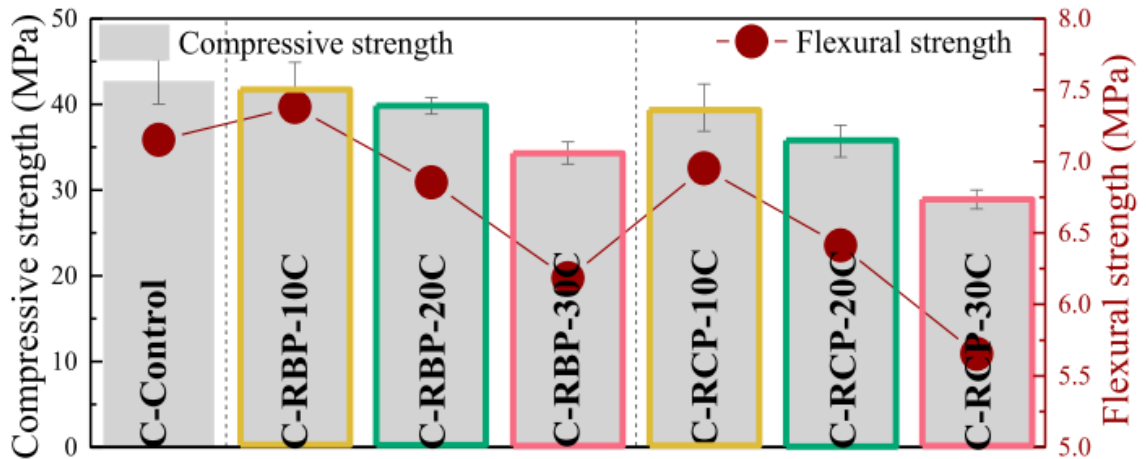


Figure 1.11 : Résistances du béton avec de la poudre recyclée à différents taux de remplacement [30].

En incorporant des FCMR dans un béton à base de granulat recyclé, on obtient les résistances à la compression de la figure 1.12 [31]. On s'aperçoit, sur la figure 1.12, qu'à sept jours le mélange RAC-10 (10% de céramique) atteint celui du béton sans addition (RAC-0). A 28 jours, la résistance à la compression du RAC-10 est de 4.6% supérieure à celle de RAC-0. Après l'âge 56 jours, la résistance à la compression de RAC-10 et RAC-20 est plus élevée que celle du RAC-0 respectivement de 12,53% et 4,78% [31].

La poudre de FCMR avec sa grande finesse peut être utilisée comme remplissage pour réduire les vides avec des particules de ciment, et aussi fournir une surface supplémentaire pour la formation des produits d'hydratation. Du point de vue chimique, la poudre de céramique recyclée se combine avec les hydrates de ciment pour former plus de C-S-H en raison de son activité pouzzolanique.

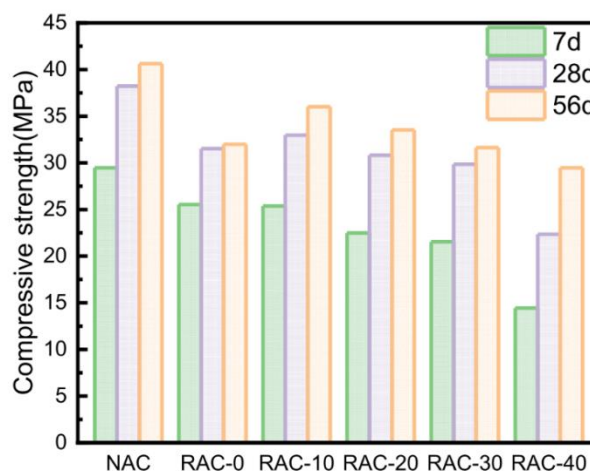


Figure 1.12 : Résultats de la résistance à la compression des bétons avec FCMR [31].

De même, sur des essais de mortier contenant différentes proportions de FCMR, la résistance à la compression ultime peut être supérieure à 80 MPa et la résistance à la flexion est d'environ 10 MPa [32]. Le remplacement du ciment par FCMR ne présente aucun impact négatif sur le comportement mécanique des mortiers. Par exemple sur la figure 1.13, le mortier avec 10% de FCMR atteint une résistance à la compression de 86 MPa, soit environ 7% plus élevé que celle du mortier témoin [32].

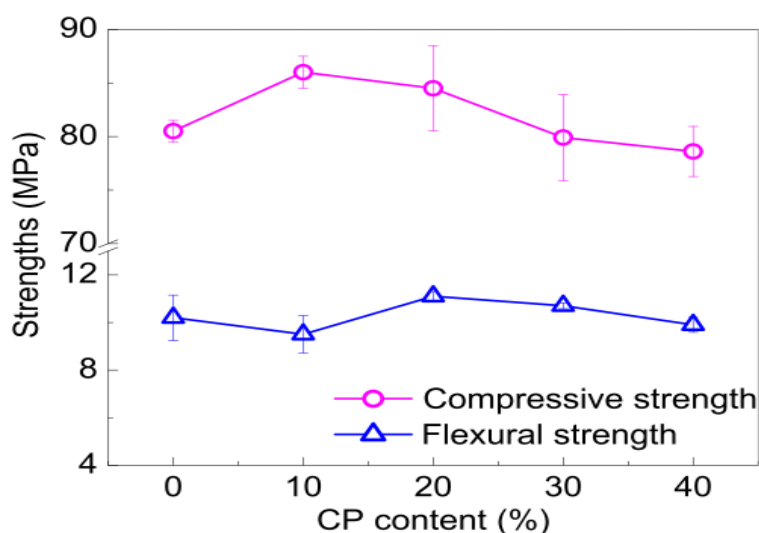


Figure 1.13 : Résultats de résistance à la compression des mortiers avec FCMR [32].

1.9.3. Densité apparente sèche et volume des vides

Les résultats de la densité apparente sèche et du volume des vides perméables à l'âge de 90 jours sont présentés dans les Figure 1.14 [29]. En raison du niveau plus élevé de la densité du ciment par rapport à celle de la poudre de céramique, la densité des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution.

Le volume de vides perméables le plus faible appartient cependant au mortier contenant seulement 10% de poudre de céramique [29]. Ce comportement est conforme aux résistances à la compression et à la traction de ce mortier. En effet, les silicates et aluminates de calcium résultant des réactions pouzzolaniques de la poudre de céramique a eu pour résultat d'améliorer l'intégrité du mortier, augmentant ainsi la résistance à la compression et diminuant la perméabilité.

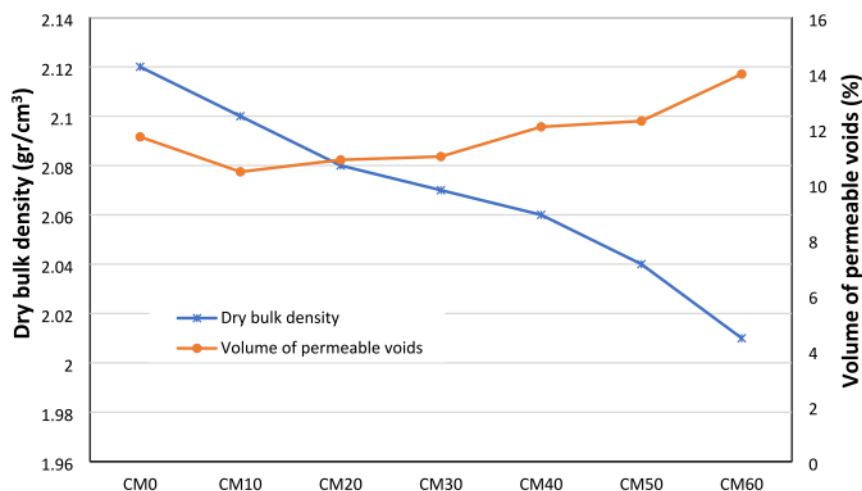


Figure 1.14 : Densités apparentes sèches et volume des vides des mortiers à 90 jours [29].

1.9.4. Produits d'hydratation

Les résultats de l'analyse thermogravimétrique de la pâte durcie à 28 jours montrent que le gel C-S-H, en tant que principal produit d'hydratation, augmente lorsque le taux de substitution de la poudre FBTR carbonatée atteint 20 % mais il diminue continuellement avec des teneurs plus élevées. De plus, sur la courbe DTG, la vitesse de décomposition de la calcite entre 650°C et 760°C dans le béton contenant du FBTR carbonaté est significativement plus rapide que l'échantillon de référence, et elle atteint son maximum lorsque le dosage est de 60% [28].

Selon les résultats thermogravimétrique présentés sur la figure 1.15, montrent les teneurs en Ca(OH)_2 des pâtes de ciment contenant différents taux de FCMR. Par rapport à un ciment ordinaire, la teneur en chaux de la pâte contenant du FCMR à 7 jours, 28 jours et 56 jours diminuait avec l'augmentation de sa teneur. À sept jours, la teneur en chaux dans la pâte ordinaire était de 9,85 %, et diminue de 12,59 %, 18,78 %, 29,04 % et 34,01 %, respectivement pour des teneurs en FCMR de 10%, 20%, 30% et 40%. A 56 jours, cette teneur diminue de 13,4 %, 34 %, 49,7 % et 56,6 % [31].

La diminution de la teneur en chaux dans les pâtes de ciment avec FCMR s'explique par l'effet de dilution lorsque le ciment est remplacé par ces fines. De plus, la plus grande teneur en FCMR engendre la plus faible teneur en chaux. Après sa teneur élevée à 28 jours, le teneur en chaux diminue à 56 jours. Ceci est probablement dû à sa réaction pozzolanique qui consomme la chaux pour produire d'autres produits [31].

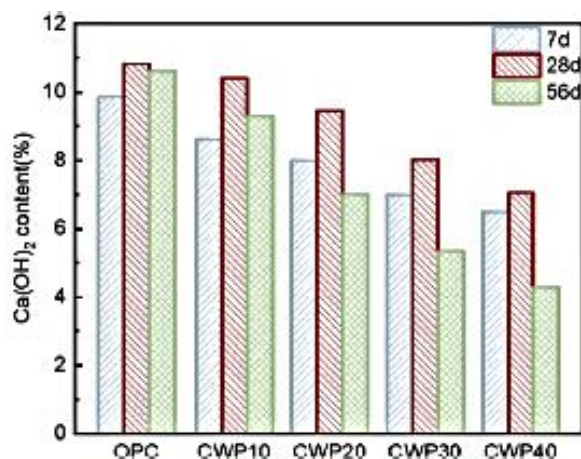


Figure 1.15 : Teneur en hydroxyde de calcium dans des pâtes de ciment avec FCMR [31]

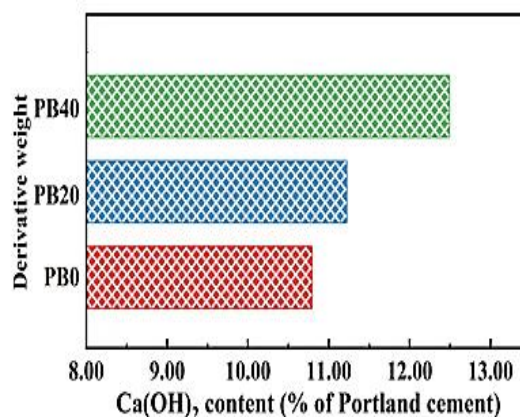


Figure 1.16 : Teneur en $Ca(OH)_2$ par rapport au ciment initial après 24h d'hydratation avec FBQR [27]

En plus, une analyse [27] a mis en évidence que le mortier témoin présente la plus grande perte de poids des gels Aft et C-S-H évaluée à 5,02 %, tandis que les échantillons contenant 20% et 40% de la poudre FBQR présentent une perte de poids plus faible respectivement 3,83 %, 3,32 %. La faible réactivité de ce produit au très jeune âge conduit à la réduction des produits d'hydratation dans les pâtes de ciment [27].

Notamment, La poudre FBQR accélère l'hydratation du ciment Portland à un stade précoce. La figure 1.16 montre un accroissement de la production de la chaux à 24 heures de l'hydratation calculée par rapport à la quantité de ciment initiale [27]. Ces particules fines peuvent devenir le noyau de cristallisation et favoriser la croissance des cristaux. De plus, leur incorporation améliore le rapport eau-ciment effectif des pâtes et augmente la quantité d'eau libre disponible pour l'hydratation du ciment. Cette augmentation de la surface de contact entre les particules de ciment et l'eau est également bénéfique pour améliorer l'hydratation du ciment Portland.

1.9.5. Résultats de la microstructure

La figure 1.17 montre les images au microscope électronique à balayage (MEB) des mortiers avec quelques teneurs en poudre de céramique [29]. Les mortiers montrent une surface dense avec une petite quantité de particules n'ayant pas réagi ou ayant partiellement réagi. Ces particules sont plus prononcées pour le mortier témoin et le mortier avec 10% de céramique. L'illustration MEB du mortier avec 50% de céramique a prouvé que des taux de remplacement élevés peuvent influencer négativement la formulation du gel C-S-H et générer un gel ayant réagi plus partiellement tel que la Mullite et n'ayant pas réagi tel que le quartz.

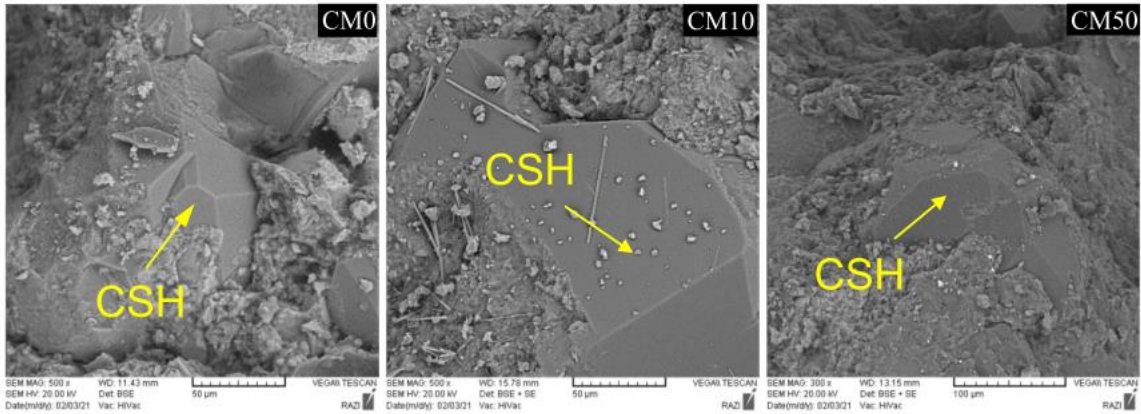


Figure 1.17 : Images au microscope électronique à balayage des échantillons après 90 jours de cure avec FCMR [29].

1.9.6. Porosité

Il a été montré que l'ajout de des FBQR réduit considérablement les produits d'hydratation et augmente la porosité totale des pâtes de ciment de 4,3 % à 16,9 % à 24 h [27]. La structure des pores est un élément important de la microstructure des matériaux cimentaires qui possède un impact sur les performances techniques. La figure 1.18 montre les résultats de la distribution des pores obtenus par porosimètre à mercure. Il est bien clair que l'ajout de ces poudres influence nettement la porosité des pâtes de ciment. Elle présente une tendance à la hausse à mesure que la substitution du ciment augmente. Par exemple, par rapport à la pâte témoin, la porosité totale augmente de 5,84 % et 16,86 %, respectivement lorsqu'on remplace 20% et 40% de ciment par FBQR. De plus, Le diamètre critique des pores augmente de 551,7 nm à 686,4 nm et 842,3 nm.

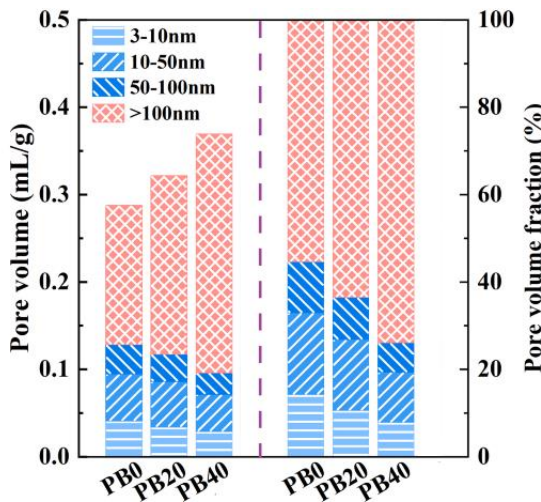


Figure 1.18 : Distributions du volume des pores des pâtes de ciments à 24 heures mesurées par porosimètre à intrusion de mercure [27].

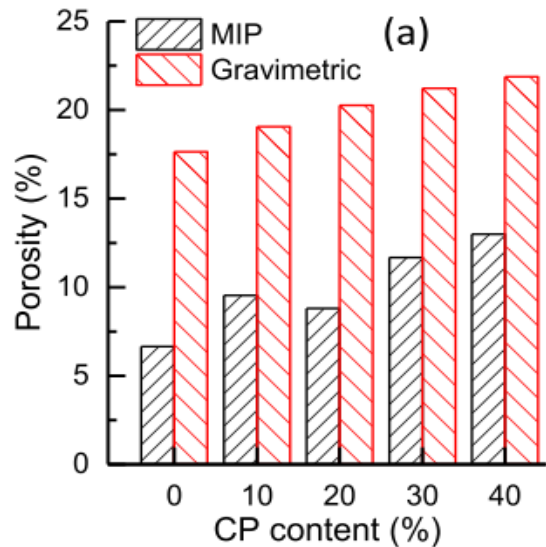


Figure 1.19 : Porosité totale mesurée par porosimètre à mercure et gravimétrie [32].

Selon les résultats présentés sur la figure 1.19 [32], Il semble que l'augmentation de la teneur en FCMR augmente la porosité de manière monotone. Cela signifie que le mélange du ciment avec les FCMR a tendance à rendre le matériau plus poreux. La distribution des pores obtenue peut être classée en trois classes : gel des pores (<10 nm), pores capillaires fins (10 à 50 nm) et les macropores (> 50 nm).

Ce classement indique qu'à mesure que la teneur en FCMR augmente, la fraction des pores du gel augmente, la fraction des capillaires fins fluctue et la fraction des macropores diminue comme illustré sur la figure 1.20 [32].

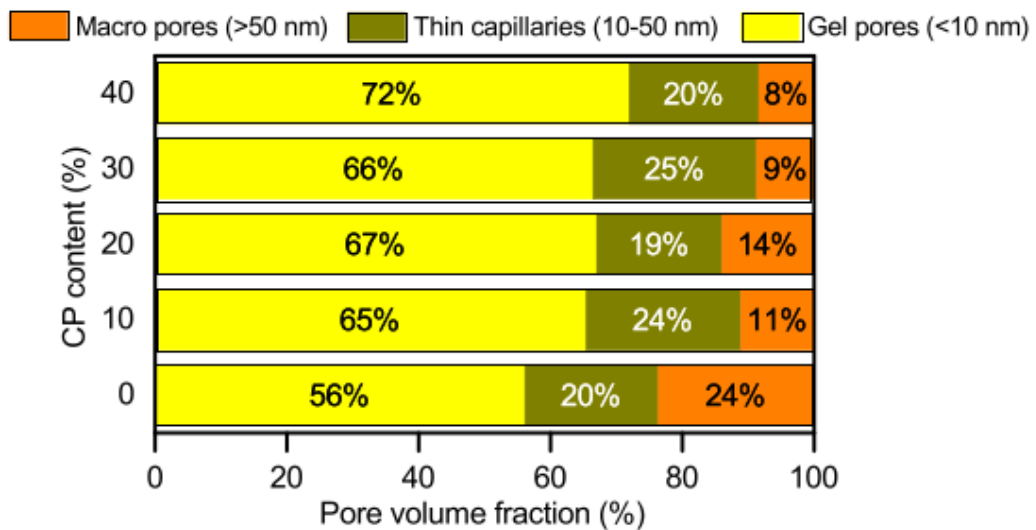


Figure 1.20 : Distribution des pores des pâtes en fonction de la teneur en FCMR [32].

1.9.7. Absorption capillaire

L'absorption capillaire est, en général, la pente de la racine carrée d'absorption de l'eau de la courbe temporelle du béton. Une étude précédente a montré que l'absorption capillaire de l'eau est divisée en deux étapes [31].

- L'absorption rapide initiale causée par la tension de surface des pores capillaires.
- L'assimilation secondaire relativement lente provoquée par d'autres fissures et pores

La figure 1.21 [31] illustre la relation entre l'absorption de l'eau et la racine carrée du temps, qui décrit quantitativement l'effet de différentes quantités de céramique sur le comportement d'absorption d'eau des bétons à base de granulats recyclés. On constate que l'absorption de l'eau du RAC-0 est significativement plus élevée que celle du béton ordinaire, tandis qu'avec l'augmentation de la teneur en céramique, l'absorption d'eau des

RAC diminue d'abord en grande partie, puis augmente lentement. Ces résultats indiquent que l'incorporation des FCMR au RACs compromet l'absorption de l'eau du béton, tandis que l'introduction de FCMR en quantité appropriée, pour remplacer le ciment, bénéficie à réduire de manière optimale l'absorption d'eau. C'est parce que les FCMR ont tendance à avoir des réactions d'hydratation secondaires pour la formation de C-S-H conduisant à une densification de la microstructure du béton.

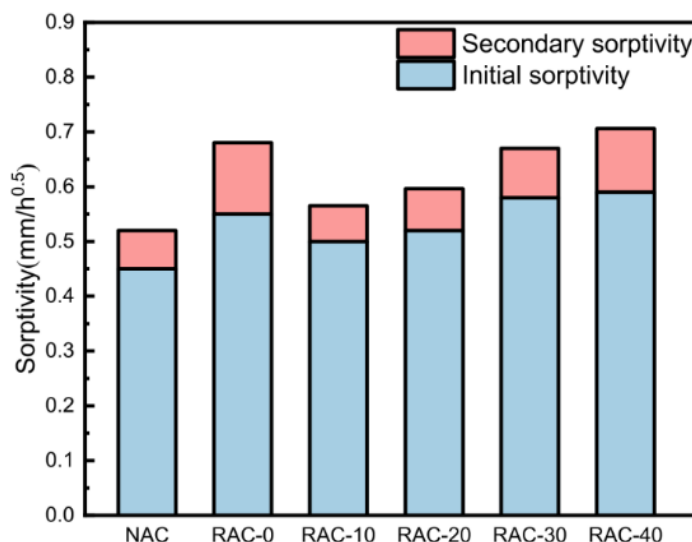


Figure 1.21 : Absorptions capillaires initiales et secondaires des bétons avec et sans FCMR [31].

Les mortiers de ciment représentent presque l'absorption capillaire la plus élevée et la présence continue de FCMR réduit cette absorption. La diminution peut être supérieure à 40 % lorsque 20% de ciment est remplacé par FCMR. Quand le taux de remplacement des FCMR dépasse 40%, la réduction de la sportivité peut aller jusqu'à 60% [32].

1.9.8. Résistance à la pénétration des ions chlore

Les valeurs des charges électriques passées à travers un béton sont un indice important pour refléter sa durabilité. La figure 1.22 montre les valeurs de charge passées sur des bétons contenant différents taux de FCMR. L'indice d'évaluation de la pénétrabilité des ions chlorés pour tous les bétons est considéré comme modéré [31].

L'incorporation des FCMR ont diminué la charge totale passée par le RAC. Par exemple, la charge passée par le RAC a diminué de 27,3 % pour une teneur en FCMR de 10%. Néanmoins, avec l'augmentation de la teneur en FCMR, la charge totale passée du

RAC a augmenté en conséquence. Les échantillons de RAC, contenant 40 % de FCMR, ont montré une charge totale plus faible que l'échantillon de RAC sans FCMR [31].

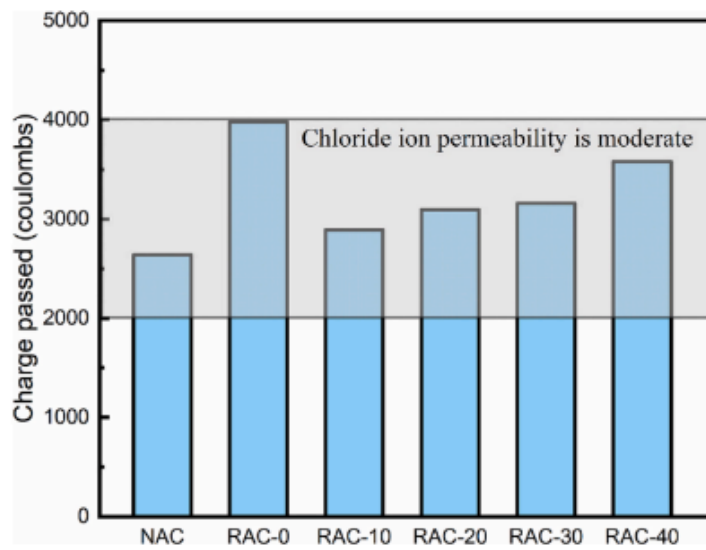


Figure 1.22 : Résistance à la pénétration aux ions chlore des bétons à granulats recyclés avec différents taux de FCMR [31].

1.9.9. Retrait

La figure 1.23 montre les résultats de retrait de séchage pour des mortiers avec différentes teneurs en céramique [29]. Ce retrait diminue avec la teneur en céramique jusqu'au taux de remplacement de 40 %. Cette réduction du retrait peut s'expliquer en considérant les particules très fines de la céramique ainsi que leurs caractéristiques pouzzolaniques. Les silicates et aluminates de calcium secondaires réduiraient les pores et augmenteraient la connectivité interne du mortier. Ainsi, l'eau absorbée dans le mortier, responsable du retrait au séchage, est réduite.

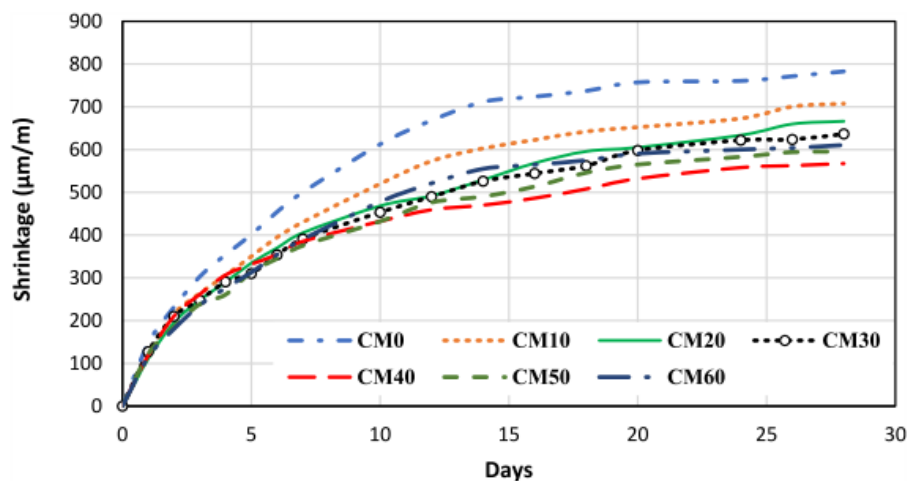


Figure 1.23 : Déformations de retrait de séchage de différents mortiers [29].

1.10. Conclusion

Les principales limitations associées aux agrégats recyclés les plus courants, ceux fabriqués à partir de déchet de béton ou de déchet de construction et de démolition, sont liées à la présence de matériaux plus faibles tels que le mortier ou la brique. Ces matériaux ont une porosité plus élevée que leurs homologues naturels et sont délétères pour les zones de transitions établies avec une nouvelle pâte. Les performances du béton à granulats recyclés dépendent donc majoritairement de la qualité et de l'origine des agrégats recyclés utilisés. Les propriétés morphologiques, physiques et chimiques de ces granulats recyclés, ainsi que la présence de contaminants légers et lourds, sont des caractéristiques clés qui influenceront le développement microstructural et, par conséquent, le comportement macroscopique des bétons recyclés.

L'incorporation des déchets de chantier et de démolition tel que le béton, la briques et céramiques comme substituant au ciment dans la fabrication des mortiers plastiques contribue à réduire la pollution par des déchets inertes et les émissions importantes de dioxyde de carbone (CO₂) provenant de la production de ciment.

A la lumière de cette synthèse, il nous parut clair maintenant la possibilité d'utiliser des fractions fines des déchets de chantier et de démolition (béton, briques, céramiques) comme substituant au ciment. Les baisses de performances enregistrées par différents chercheurs ne sont pas à craindre. De ceci, il est encourageant de tester les matériaux locaux et leur possibilité de remplacer les matériaux naturels et épargner les ressources naturelles d'un éventuel gaspillage.



***Protocole
Expérimental***

2.1. Introduction

Ce travail a été réalisé au niveau du laboratoire de recherche Géo-matériaux de l'université de Hassiba Benbouali de Chlef. Il a pour objectif de déterminer certaines propriétés d'un mortier contenant des proportions fines de déchets de construction. L'objet de ce chapitre est de présenter les essais réalisés sur un mortier éco-plastique composé de ciment, de sable naturel et des fines de déchets de construction en tant que substituant d'une partie de ciment. Cette étude vise à étudier la possibilité d'utiliser les déchets de céramiques, de briques et de béton (fines $< 80 \mu\text{m}$) à la place du ciment avec des taux de remplacement de 0%, 10%, 20% et 30%. La substitution est effectuée par volume en respectant les masses volumiques de chaque composant. La recherche vise à quantifier l'effet de ces fines de déchets de construction sur les propriétés physico-mécaniques du mortier. Le protocole expérimental mis en place met en évidence tous les équipements et matériels utilisés ainsi que la démarche technique adoptée pour atteindre cet objectif.

2.2. Identification et Caractérisation des Constituants

Les différents essais réalisés pour l'identification et la caractérisation physique et mécanique des différents constituants rentrant dans la composition d'un mortier plastique sont le ciment, le sable, l'eau et l'adjuvant.

2.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment composé CEM II A-L 42.5 N. Ce ciment est utilisé pour confectionner un mortier à base d'un sable naturel conforme à la norme EN 196-1 [33] produit par la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) contenant un pourcentage de calcaire allant de 6 à 20%, avec une résistance minimale à la compression à 28 jours supérieure à 42,5 MPa. Sa surface spécifique de Blaine est de $3200 \text{ cm}^2/\text{g}$. Ses caractéristiques chimiques et minéralogiques sont présentées dans le tableau 2.1. La figure 2.1 représente un sac de ciment de ce produit avec ses caractéristiques.



Figure 2.1 : Sac de ciment provenant de la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) (CEM II/A 42.5).

Tableau 2.1 : Composition de ciment (CEM II/A 42.5) de Chlef.

Ciment CEM II/A 42.5	Composition chimique %								Composition Minéralogique %			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	PAF	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
	22.6	4.2	3.55	62.17	2.19	0.63	0.42	1.84	47.99	28.63	5.1	10.7

2.2.2. Sable naturel

Lors ce travail, on a utilisé un sable naturel de classe (0/4 mm) provenant de la rivière de Cheliff mélangé avec un sable fin (0/2 mm) originaire de la rivière d'Oued-Rass (Chlef) afin de confectionner un sable normalisé. Plusieurs essais de caractérisation ont été effectués sur ces deux sables pour mieux les utiliser dans la confection du mortier. La figure 2.2 montre les deux sables naturels utilisés.



Sable naturel grossier (Oued Cheliff)

Sable naturel fin 0/2 (Oued Rass)

Figure 2.2 : Vue des sables utilisés.

2.2.2.1. Granulométrie

L'analyse granulométrique est la détermination des dimensions des diamètres des grains et de la distribution des grains à l'aide des tamis ou des passoirs. La granulométrie est réalisée grâce à une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont décroissantes du haut vers le bas (4 ; 3.1; 2.5; 2; 1.6; 1.25; 1; 0.8; 0.63; 0.5; 0.25; 0.125; 0.08) pour les sables selon la norme EN 933-1 [34]. Afin de mener à bien cette opération, nous avons employé les équipements suivants :

- Des tamis de différents diamètres ;
- Un échantillon de sable ;
- Une balance de 6 kg avec une précision 0.1g;
- Une étuve thermostatique.

Les granulats de classe granulaire 0/4 utilisés pour la préparation du mortier sont séchés pendant 24 heures dans une étuve à une température maximale de 105° C. Les tamis sont empilés les uns sur les autres de manière décroissante. La colonne est équipée d'un fond à la partie inférieure pour récupérer les fillers et d'un couvercle en haut pour éviter toute perte de matériau lors du tamisage. La disposition d'une série de tamis prêts à l'essai de tamisage est illustrée dans la figure 2.3.



Figure 2.3 : Tamiseuse utilisée pour déterminer la granulométrie des sables.

On désigne sous le nom de tamisât le poids de matériau qui traverse un tamis spécifique et de refus le poids de matériau qui est retenu. Le matériau à étudier est placée en haut de la colonne de tamis et celle-ci est vibrée. Nous considérons que le processus de tamisage est terminé lorsque le taux de refus est constant. Le taux de refus de chaque tamis est pesé R_i ; soit sa masse. On peut observer le résultat du tamisage à travers la courbe granulométrique de la figure 2.4.

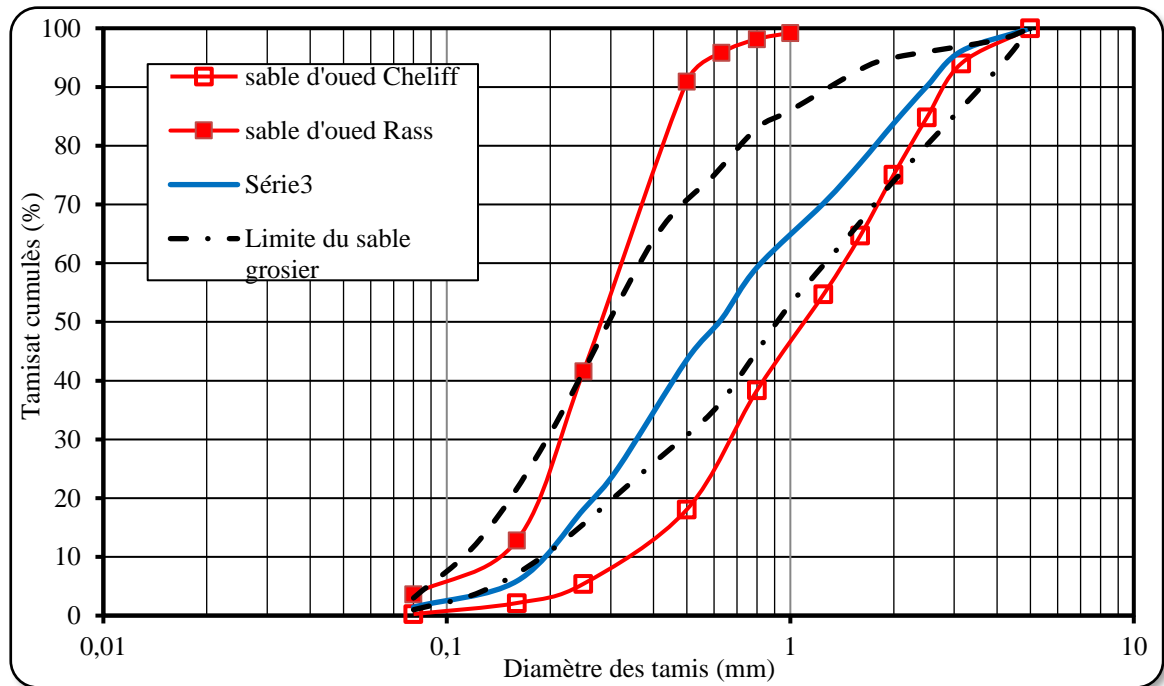


Figure2.4 : Courbes granulométriques des sables naturels utilisés.

2.2.2.2. Module de finesse

Il est crucial de déterminer le module de finesse (MF) lors de la confection et la formulation d'un mortier. Étant donné qu'elle permet de déterminer la quantité de fines et de grossiers éléments qui composent le sable, le dosage de celle-ci aura un impact considérable sur le comportement du mortier (ouvrabilité, risque de ségrégation, perte/augmentation des résistances), comme le montre le tableau 2.2. Selon la norme EN 933-8 [35], le module de finesse d'un granulat correspond à 1/100^{ème} de la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentage des différents tamis, comme indiqué dans l'expression suivante :

$$Mf = \frac{R_5 + R_{2.5} + R_{1.25} + R_{0.63} + R_{0.315} + R_{0.16}}{100}$$

Elle permet de classer les sables en trois types. D'après la valeur du module de finesse :

a) Sables fins $1.8 < Mf < 2.2$: plus de 75% des éléments supérieurs à 80µm, sont inférieurs à 0,5mm. Il est nécessaire de modifier considérablement ces sables afin d'obtenir des caractéristiques similaires à celles des graves [36]. Notamment employé en raison de son impact positif sur la facilité d'utilisation (ouvrabilité) lors de la mise en œuvre au détriment probable de la résistance.

b) Sables moyens $2.2 < Mf < 2.8$ (sable favorisé): moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80µm sont compris entre 0,2 et 2mm. Ce sable est spécialement conçu pour obtenir une ouvrabilité adéquate et une résistance adéquate, en réduisant les risques de ségrégation.

c) Sables grossiers $2.8 < Mf < 3.3$ plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80µm sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables présentent des caractéristiques similaires à celles des graves [36]. Il est fréquemment employé pour obtenir des résistances élevées, mais cela peut entraîner des conséquences néfastes telles que la diminution de l'ouvrabilité et les risques de ségrégation.

Tableau 2.2 : Module de finesse du sable naturel combiné.

Diamètre (mm)	Diamètre (mm)	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	Module de finesse
Sable grossier	Tamisât (%)	100.00	84.83	54.70	26.00	9.00	2.15	3.23
	Refus (%)	0.00	15.17	45.30	74.00	91.00	97.85	
Sable fin	Tamisât (%)	100.00	100.00	99.00	95.83	55.00	12.84	1.37
	Refus (%)	0.00	0.00	1.00	4.17	45.00	87.16	
Sable combiné	Tamisât (%)	100.00	90.14	70.20	50.44	25.10	5.89	2.58
	Refus (%)	0.00	9.86	29.80	49.56	74.90	94.11	

Le module de finesse combiné :

$$Mf = \frac{0 + 9,4 + 28,9 + 49,2 + 73,0 + 92,7}{100} = 2,58$$

2.2.2.3. Masses volumiques apparente (ρ_{app})

La masse volumique apparente d'un matériau est définie par masse par un mètre cube du matériau. Le tableau 2.3 présente une synthèse de la mesure de la masse volumique

apparente du sable naturel. Afin de déterminer sa masse volumique apparente, on a pris une quantité suivant la norme EN 1097-3 [37].

L'expérience consiste à remplir un récipient de volume V (1 litre) avec un matériau sec sans compactage, puis à peser cette quantité (M) à l'aide d'une balance de 0,1 grammes de précision. Le processus est exposé dans la figure 2.5 et décrit de la manière suivante :

- Peser le récipient vide de 1 litre soit M_1 .
- Remplir le récipient avec les granulats à l'aide de la main écope, jusqu'à ce qu'il déborde (la main écope doit être à une hauteur ne dépassant pas 5 cm).
- Araser le surplus des grains.
- Peser le récipient avec les grains M_2 .

La valeur est calculée par la relation suivante :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$



Figure 2.5 : Mesure de la masse volumique apparente.

Tableau 2.3 : Masse volumique apparente du sable combiné.

Masse volumique apparente	M(g)	V (ml)	(kg/l)
Sable naturel	1614,5	1000	1,615

2.2.2.4. Masse volumique absolue (ρ_{abs})

L'objectif est de déterminer la masse par unité de volume de matière en supprimant tous les vides entre les grains. La masse volumique absolue est calculée en fonction du rapport des différents volumes et masses enregistrés du matériau selon la norme EN 1097-6 [38].

Elle est déterminée en suivant le protocole suivant :

- 1) Tout d'abord, il convient de faire un bon nettoyage du matériau utilisé pour éliminer les particules fines, de laisser l'échantillon s'égoutter et le sécher pendant 24 heures.
- 2) Une fois que le sable a été séché, on entame les mesures et la préparation des échantillons.
- 3) Peser le pycnomètre sec, vide et propre avec son couvercle, on note m_0 , comme indiqué dans la figure 2.6.
- 4) Incorporer la quantité de matériau préparé auparavant dans le pycnomètre et peser, soit m_1 .
- 5) Incorporer une quantité d'eau et agiter le pycnomètre afin de retirer l'air.
- 6) Remplir le pycnomètre avec de l'eau et peser, soit m_2 .
- 7) Remplir le pycnomètre uniquement avec de l'eau et peser, en notant m_3 . Le tableau 2.4, résume la mesure de la masse volumique absolue du sable naturel.

Déterminer la valeur de la masse volumique absolue par la relation suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{m_1 - m_0}{(m_3 - m_0) + (m_2 - m_1)} \rho_e$$

Tableau 2.4 : Masse volumique absolue du sable combiné.

Masse volumique absolue	m_0 (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	ρ_s (kg/l)
Sable combine	330,4	360,55	1293,65	1275,15	2,588



Figure 2.6 : Pycnomètre utilisé pour déterminer la masse volumique absolue d'un sable.

2.2.2.5. Équivalent de sable

L'importance de cet essai réside dans sa capacité à mettre en lumière la proportion relative de poussière fine nuisibles ou d'éléments argileux présents dans les sables, ce qui nous permet de déterminer le type de sable. Il existe des sables qui renferment une proportion plus ou moins importante d'argiles fines nuisibles.

Le test de l'équivalent de sable permet de mesurer la qualité du sable. Ce test vise à séparer les particules fines du sable. Le coefficient d'équivalent sable peut être calculé en utilisant la méthode standard, qui permet de mesurer sa propreté.

L'essai est réalisé en respectant la norme EN 933-8 [35]. Cela implique de verser un poids spécifique de sable dans une éprouvette normalisée remplie d'une solution défloculante. Une fois agité, le mélange est laissé décanter pendant 20 minutes, puis on évalue la hauteur du sédiment +floculant (H_1) et du sédiment (H_2), voir la figure 2.8. Le coefficient d'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$E_s = \frac{H_2}{H_1} 100$$

L'équivalent de sable permet de quantifier la notion de propreté d'un sable ; une surabondance d'argile peut entraîner une augmentation du retrait et une forte demande en eau, ce qui entraînera une diminution de la résistance mécanique. Cependant, un manque total de fines entraîne des bétons peu maniables et de faible compacité. Le matériel utilisé pour équivalent de sable comprend :

- Eprouvettes cylindrique portant deux repères (un repère inférieur et un repère supérieur);
- Récipients pour mesure de l'échantillon à tester ;
- Tamis d'ouverture de 4 mm ;
- Récipient pour contenir la solution lavante ; muni d'un tuyau et pipettes de lavage ;
- Bouchon en caoutchouc ;
- Règle métallique graduée ;
- Entonnoir ;
- Agitateur électrique ;
- Piston muni d'un contre poids.

Mode opératoire :

- Le processus consiste à remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au trait inférieur, comme illustré dans la Figure 2.7.
- Ensuite, à l'aide d'un récipient de mesure, on introduit une masse séchée de 120 g de matériau dans l'éprouvette à l'aide d'un entonnoir.
- Ensuite, on frappe vigoureusement la base de l'éprouvette avec la paume de la main pour déloger les bulles d'air.
- Ensuite, on utilise un bouchon en caoutchouc pour boucher l'éprouvette, on agite l'éprouvette à l'aide d'un agitateur électrique (figure 2.8) avec 90 cycles en 30 secondes.
- Nettoyer attentivement le sable et le bouchon jusqu'à ce qu'ils atteignent le trait supérieur.
- Laissez-le reposer pendant 24 heures.
- Mesurez avec une règle la hauteur H_1 (sable + flocculat); et avec un piston la hauteur H_2 (sable). Les résultats du calcul de l'équivalent sont résumés dans le tableau 2.5

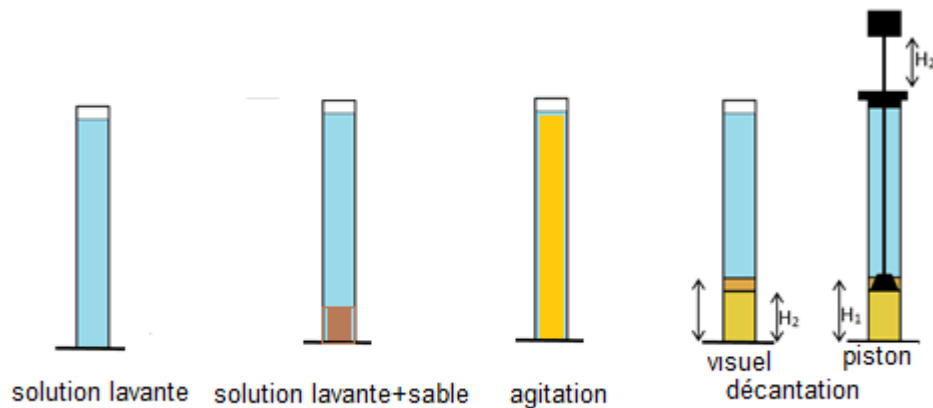


Figure 2.7 : Essai d'Equivalent de sable.



Figure 2.8 Essai de l'équivalent de sable.

Tableau 2.5 : Résultats de mesure de l'équivalent de sable naturel.

Essai	H_1	H_2	H'_2	ES(%)	ES(%) par piston	Qualité
1	9,5	8,8	8,6	92,6	90,5	Sable propre
2	9,5	8,8	8,7	92,6	91,57	Sable propre

2.2.3. Fractions Fines issues de déchets de chantier

Les déchets de chantier font référence aux matériaux résiduels générés lors de la construction, de la rénovation ou de la démolition de bâtiments et d'infrastructures. Cependant, peu de données sont disponibles concernant l'avenir des déchets de chantier ; qui représentent la majorité des déchets de construction et de déconstruction.

D'un côté, sur le plan technique, les déchets de chantier sont presque complètement recyclés en tant que composants d'un matériau de maçonnerie. Par ailleurs, il y a une quasi-absence de réglementations régissant la fabrication et l'utilisation des déchets de chantier. La valorisation de la matière consiste à exploiter les déchets pour les valoriser et les réintroduire dans le cycle économique. Elle englobe le renouvellement, la réutilisation, la régénérescence et le recyclage des matériaux.

2.2.3.1. Broyage de déchets de chantiers

Afin de mieux utiliser les déchets de chantier comme substitution de ciment un broyage et un calibrage des fines est nécessaire. Après avoir trier les différents types de matériaux utilisés (céramique, brique et béton), le recyclage des déchets de chantier a été effectué manuellement, puis il a été introduit dans un broyeur à disque et finalement dans le Micro Duval jusqu'à ce qu'ils atteignent une finesse similaire à celle du ciment comme il est illustrée sur la figure 2.9.

Le processus de broyage des matériaux en fines est le même pour les trois types de déchets de chantier, les étapes comme suit :

- Mettre 3 kg de matériau concassé dans chaque cylindre (4 cylindres).
- Ajoutez 3 grosses boules et 1.5 kg de petites boules dans chaque cylindre.
- Régler le chronomètre pour une période appropriée.
- Broyez-le pendant une dizaine de jours, par intermittence, pendant une durée de 3 heures à 6 heures, jusqu'à ce que nous obtenions la finesse désirée.

- Tamiser les fines en utilisant un tamis de 0,08 mm.



Figure 2.9 : Etapes d'obtention des fines de déchets de chantiers.

2.2.3.2. Masse volumique des poudres

Une fois que les poudres ont été broyées, il est indispensable de leur faire subir quelques tests d'identification. On réalise l'analyse de masse volumique absolue sur les trois types de poudre (céramique, brique et béton). Concernant la poudre de béton, on remplace l'eau par une solution neutre qui ne réagit pas avec le ciment anhydre qui est bloqué dans le mortier attaché. L'essai se déroule conformément au protocole illustré dans la figure 2.10 ci-dessous [38]. Les résultats sont regroupés sur le tableau 2.6.

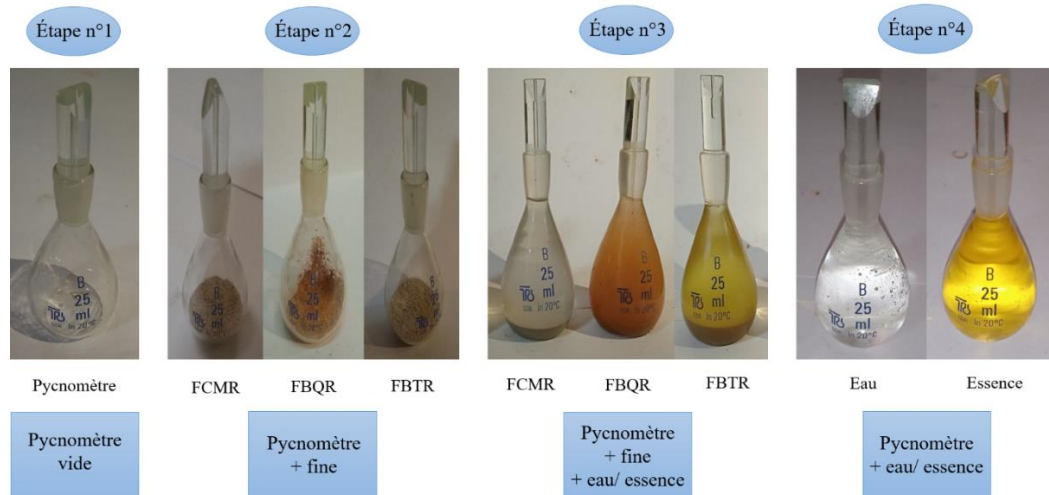


Figure 2.10 : Etapes de mesure de la masse volumique absolue des fines de déchets de chantier.

Tableau 2.6: Valeurs des masses volumiques absolues des poudres utilisées

Type de poudre	m ₀ (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	ρ ($\frac{g}{ml}$)
FCMR	25,72	27,04	77,42	76,61	2,55
FBQR	38,64	41,44	90,76	88,99	2,71
FBTR	74,57	81,36	171,30	166,76	2,77

2.2.3.3. Surface spécifique Blaine

Cette approche implique de mesurer le temps nécessaire pour un volume d'air spécifique à traverser un échantillon, comme illustré dans la figure 2.11.

Le tableau 2.7 présente le calcul de la durée nécessaire pour un gaz sous pression à traverser un volume spécifique de granules. Ainsi la surface des granules peut être déduite. Plus le broyage est fin, plus la surface calculée est importante, plus le temps mesuré est élevé [39].

$$SSB = k \frac{\sqrt{e^3} \sqrt{t}}{\rho(1 - e) \sqrt{\eta}}$$

Avec :

- SSB : Surface spécifique (cm²/g).
- k : constant de l'appareil.
- ρ: densité de la poudre (r=3.1).
- e : porosité de la poudre (e=0.5 pour notre cas).

$$e = 1 - \frac{m_2 - m_0}{\rho V} \rightarrow V = \frac{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)}{\rho_{Hg}}$$

- η : viscosité de l'air sous les conditions de l'essai.



Figure 2.10 : Appareil de Blaine.

Tableau 2.7 : Résultats de mesure de la surface spécifique.

	m_0 (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	T °C	ρ (Hg)	η (air)	V (cm ³)	e	Temps (s)	SSB (cm ² /g)
FCMR	42,6	127,48	45,09	98,33	19	13,55	0,00018	2,335	0,582	154,28	4620
FBQR	42,66	127,63	45,69	101,8	16	13,56	0,0001788	2,128	0,475	143,57	4321
FBTR	42,2	127,9	45,69	101,8	16	13,56	0,0001788	2,182	0,423	111,05	3117

2.2.4. Eau de gâchage

En général toutes les eaux conviennent si elles ne contiennent pas d'éléments nocifs qui influenceraient défavorablement sur le durcissement. On évitera toujours l'approvisionnement en eaux stagnantes odoriférantes [40]. Et donc, pour cette recherche il a été employé une eau provenant du réseau d'eau potable de la ville de Chlef, une eau potable et propre. Celle-ci comporte toutes les prescriptions que dicte la norme EN 1008 [40]. Sa composition chimique est mentionnée dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Composition minérale de l'eau de gâchage.


Echantillon	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	Résidussecs	pH
Concentration (mg/l)	53	6.6	5.8	0.5	11	9	168	2	160	7.3

2.2.5. Superplastifiant

Afin d'obtenir l'ouvrabilité nécessaire pour l'étude du mortier, il est indispensable d'utiliser un superplastifiant aussi appelé haut réducteur d'eau de nouvelle génération surnommé « SUPERIOR 9 WG ». Ce réducteur d'eau réputé pour être à l'origine des poly-carboxylates, celle-ci améliore largement les attributs rhéologiques et mécaniques de la pâte de ciment, qui permettent de réaliser des bétons très fluides avec des rapports E/C

très réduits. Il est compatible tous les types de ciment. Quelques caractéristiques de ce produit sont fournies dans le tableau 2.9 ci-dessous :

Tableau 2.9 : *Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant (SUPERIOR 9 WG).*

	Super-plastifiant SUPERIOR 9 WG						
	Extraitsec	Etat physique	Couleur	PH (20°C)	Densité	Dosage recommandé	Nature chimique
	27,5%	Liquide	Brun foncé	5,5 ± 1	1.01 ± 0,03g/cm ³	0.6% à 2.0 %	Poly-carboxylates

2.3. Programme expérimental

Le laboratoire de recherche Géo-matériaux de l'université de Hassiba Benbouali de Chlef a pris en charge le protocole d'essais. L'objectif était de déterminer certaines propriétés des mortiers plastiques. Le ciment est substitué avec les fractions de fines de déchets de construction (céramique, brique et béton) avec un taux de 0%, 10%, 20% et 30%. On procède à la substitution par volume en prenant en compte les masses volumiques de chaque composant.

Dans le but de rendre le mortier plastique, on établit la quantité de sable et le rapport eau-ciment, puis on ajoute un superplastifiant. Pour un mélange spécifique, on évalue l'étalement sur une table à secousses en ajustant le dosage en superplastifiant jusqu'à ce que l'étalement souhaité soit obtenu. L'organigramme de la figure 2.12 récapitule les étapes pour trouver le dosage optimal en superplastifiant. L'objectif de la première étape du programme, connue sous le nom de test de propriété, est d'identifier toutes les caractéristiques des matériaux conformément aux normes en vigueur avant de passer aux tests de mortier. Finalement, le mortier préparé a fait l'objet de tests mécaniques, physiques et de durabilité.

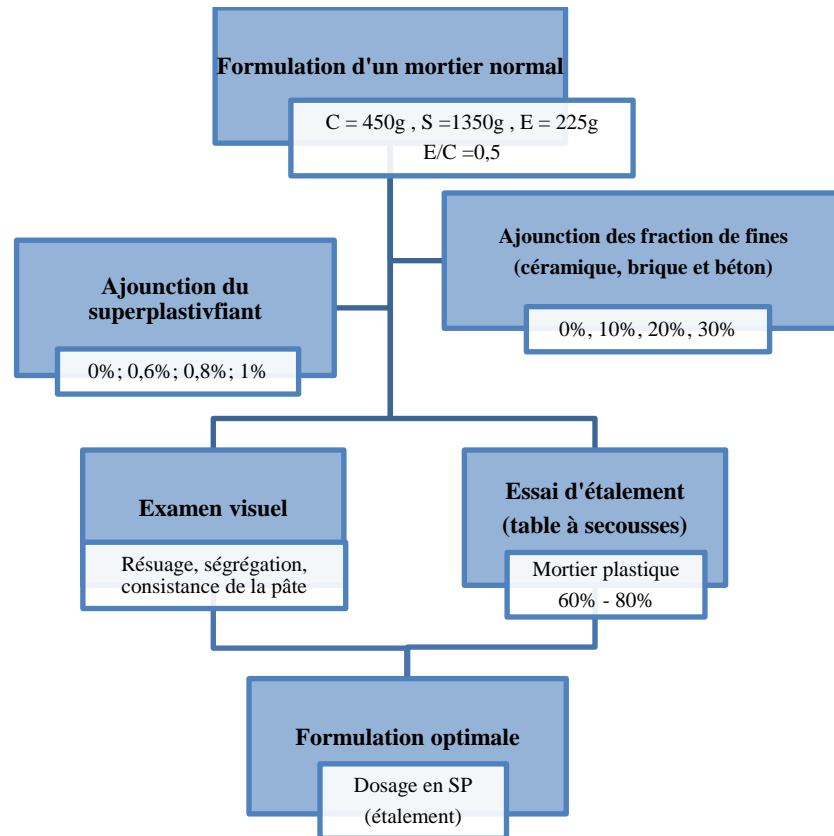


Figure 2.11 : Organigramme pour déterminer le dosage en superplastifiant.

On a obtenu dix formulations de mortiers, le tableau 2.10 résume les combinaisons examinées lors de cette étude.

Tableau 2.10 : Compositions des mortiers testés.

Matériaux	Sable naturel(g)	Ciment(g)	Fraction fines			Eau (g)	Superplastifiant(g)
			Céramique	Brique	Béton		
MT0 (0%)	1350	450	0	0	0	221,6	4,5
MCMR1(10%)	1350	405	37,0	0	0	221,6	4,5
MCMR2 (20%)	1350	360	74,0	0	0	221,6	4,5
MCMR3 (30%)	1350	315	111,1	0	0	221,6	4,5
MBQ1 (10%)	1350	405	0	39,3	0	221,6	4,5
MBQ2 (20%)	1350	360	0	78,7	0	221,6	4,5
MBQ3 (30%)	1350	315	0	118,0	0	221,6	4,5
MBTR1 (10%)	1350	405	0	0	40,2	221,6	4,5
MBTR2 (20%)	1350	360	0	0	80,4	221,6	4,5
MBTR3 (30%)	1350	315	0	0	120,6	221,6	4,5

2.4. Préparation des échantillons

Pour assurer l'obtention d'un mortier plastique et homogène, l'étape de malaxage a un grand impact sur ses propriétés désirées. Après la fixation des différents dosages des

différents constituants qui composent le mortier, on suit l'étape de préparation du mortier lui-même en malaxant ces produits. Le malaxage d'après la norme EN 196-1 [33] s'exécute en tous pendant une durée de 4 minutes divisée en 4 étapes. Le mode opératoire est présenté sur le tableau 2.11 et décrit comme suit :

1. Pendant 1 minute malaxer à sec le ciment plus les fines (céramique recyclé, brique recyclé et béton recyclé) et le sable pendant une durée d'une minute afin d'homogénéiser le mélange, (figure 2.13) ;
2. Additionner les 2/3 de la quantité d'eau pendant 1 minute ;
3. Ajouter 1/3 de l'eau restante avec le superplastifiant et mélanger pendant 1 minute ;
4. Changer à la deuxième vitesse et malaxer les matériaux pendant 1 minute ;
5. Test de l'étalement et mise en place des mortiers dans les moules.

Tableau 2.11: Différentes étapes de malaxage du mortier.

Constituants	Ciment+fractions fines + sable	2/3 Eau	1/3 Eau+SP	/
Temps (min)	1	2	3	4
Vitesse	Lente	Lente	Lente	Rapide



Figure 2.12 : Malaxeur pour mortier.

2.4.1. Remplissage des moules

Une fois les mortiers préparés, il faut mouler les éprouvettes en deux couches. Introduire la première couche dans chacun des compartiments du moule, placer alors le

moule sur la table à chocs (figure 2.14) et compacter la couche par 60 chocs. Ensuite, introduire une seconde couche et compacter à nouveau par 60 chocs. Retirer le moule de la table à chocs et retirer le surplus de mortier à l'aide d'une truelle.



Figure 2.13 : Table à chocs.

2.4.2. Conditions de conservation des éprouvettes

Après le remplissage, les moules ont été conservés dans l'ambiance du laboratoire. Comme illustré dans la figure 2.15.



Figure 2.14 : Remplissage des moules et conservation des éprouvettes.

Après 24 heures, ils sont démoulés et conservés sous les conditions relatives à chaque essai. La figure 2.16 illustre la mise en place des éprouvettes, leur protection à l'état frais et leur conservation à l'état durci.



Figure 2.15: Conservation des éprouvettes à l'air libre et sous l'eau.

- Les échantillons destinés à l'essai de retrait sont conservés dans les conditions de laboratoire à l'air libre.
- Les échantillons destinés aux essais mécaniques sont conservés dans l'eau dans l'ambiance de laboratoire jusqu'au jour de l'essai.
- Les échantillons destinés à l'essai d'absorption et de capillarité sont conservés dans l'eau jusqu'à 28 jours.

2.5. Essais réalisés sur mortier

2.5.1. Essai d'étalement

On utilise l'essai d'étalement afin de saisir le comportement des fines lorsqu'elles sont mélangées avec le ciment. Les diamètres d'étalement des pâtes fraîches sont mesurés sur une surface plane afin de vérifier la consistance et de suivre la maniabilité des formulations comme le montre la figure 2.17.

L'essai d'étalement est basé sur la norme EN 1015-3 [41]. La valeur d'étalement est définie par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais. Celui-ci est mis en place à l'aide d'un moule sur une table à secousses et soumis à un nombre donné de secousses verticales en soulevant la table à secousses et la laissant retomber librement d'une hauteur donnée. Deux mesures sont réalisées sur deux diamètres perpendiculaires (d_1 et d_2). La formule permet de déterminer la valeur d'étalement :

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Avec d_1 et d_2 les deux diamètres perpendiculaires (en cm)

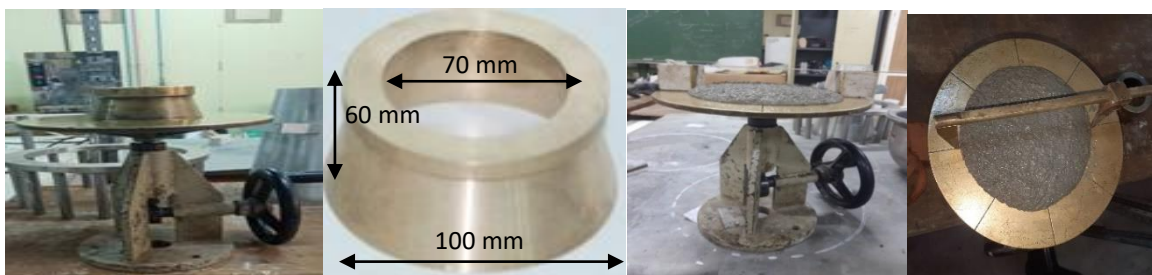


Figure 2.16 : Essai d'étalement du mortier sur la table à secousses.

2.5.2. Essai de la prise

L'essai du temps de prise du mortier a été fait conformément à la norme NF P 15-431 [42] à l'aide de l'appareil de Vicat représenté sur la figure suivante (figure 2.18):



Figure 2.18: Appareil de Vicat utilisé pour déterminer la période de prise du ciment.

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte ; on le détermine à l'aide de l'aiguille de Vicat (essai normalisé EN 196-3 [43]).

La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide (il n'existe pas d'essai normalisé), elle ne peut pas se définir avec précision. Les temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes, pour les ciments prompts, à plusieurs heures pour les ciments à prise lente. Pour la plupart des ciments courants, le début de prise à 20 °C se situe entre 2 et 5 heures [44].

2.5.3. Masse volumique du mortier frais et durci

La masse volumique est une propriété physique, également connue sous le nom de densité volumique de masse. Elle permet d'évaluer la masse ou le volume des diverses catégories de granulats. Selon la norme EN 12350-6 [45], c'est la masse du matériau par volume unitaire.

2.5.4. Analyse calorimétrie semi adiabatique

L'analyse calorimétrique EN 196-9 [46] inspire à la détermination du flux et la quantité de chaleur émise par toutes les réactions qui se produisent lors de l'hydratation de la pâte de ciment. Le calorimètre Langavant (figure 2.19) est un essai effectué sur un mortier qui va être disposé dans un support métallique fermé connecté à un thermomètre relié à un capteur permettant de mesurer et enregistrer la variation de température dégagée par l'hydratation. Le tout isolé dans une bouteille semi adiabatique. Les valeurs de température fournies vont être utilisées calculer la chaleur et son flux en fonction du temps.

Le banc d'essai comporte deux calorimètres semi adiabatiques dont les thermocouples sont reliés à une chaîne de mesure, multivoies à microprocesseur, permettant de mémoriser les températures en cours d'essai. Pour calculer la chaleur dégagée, on doit mesurer l'échauffement de l'éprouvette $\Delta\theta$ et connaître la capacité thermique du calorimètre vide μ et avec l'éprouvette C d'où on obtient la chaleur dégagée par l'expression suivante [46] :

$$q(t) = \frac{C}{m_c} \Delta\theta + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \Delta\theta dt$$

Chaleur (t) = Echauffement + Diperdition

Avec :

m_c : masse de ciment ou liant contenu dans l'éprouvette

$C(J/^\circ C)$: capacité thermique du calorimètre et de l'éprouvette

$\alpha (J/h \ ^\circ C)$: coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre donné par l'étalonnage.

$\Delta\theta$: échauffement de l'éprouvette par rapport à la température ambiante.

Une fois les mesures de l'échauffement faites, on évalue la chaleur d'hydratation en utilisant l'équation ci-dessus et en introduisant les différents paramètres de l'essai. Dans cette recherche, l'essai a été effectué afin d'étudier l'impact de la substitution du ciment par différentes fraction fines (céramique, brique et béton).



Figure 2.19 : Essai d'analyse calorimétrique.

2.5.5. Résistance à la flexion

L'essai de flexion trois points est effectué sur des éprouvettes de mortier prismatiques (4×4×16) cm. L'éprouvette est placée sur un bâti de flexion et chargée par une force concentrée jusqu'à la rupture selon la figure 2.20. La formule suivante est utilisée pour calculer la résistance à la traction par flexion [33].

$$R_f = \frac{3 P L}{2 a^3}$$

Avec :

- R_f : la résistance à la flexion en Méga Pascal(N/mm²).
- P : la charge maximale en Newton.
- L : l'écartement entre les deux rouleaux d'appui en millimètres.
- A : est la dimension de la section transversale de l'éprouvette, en millimètre.

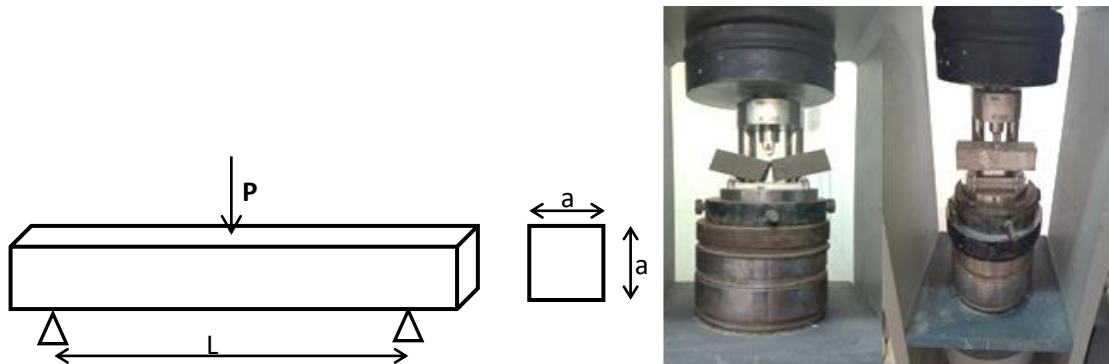


Figure 2.20 : Essai de flexion sur une éprouvette de mortier.

2.5.6. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme EN 196-1 [33] par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques après rompre en flexion à l'âge de 3, 7, 28 et 90 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 kN (Figure 2.21).

La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois (03) demi-prismes de trois éprouvettes. La formule suivante permet de calculer la résistance à la compression [33]:

$$R_c = \frac{P}{S}$$

Avec :

- R_c : Contrainte de rupture en compression (MPa).

- P : charge de la rupture (N).
- S : Section de l'éprouvette (mm²).



Figure 2.21 : Essai de compression sur une éprouvette de mortier.

2.5.7. Porosité accessible à l'eau

L'essai d'absorption par immersion suivant norme belge NBN B 15-215 [47], consiste à noyer progressivement une éprouvette âgée de 28 jours séchée auparavant dans une étuve à une température de 80-85 °C pendant 24h et mesurer son poids après une durée d'absorption de 24 h. Le mode opératoire est présenté sur la figure 2.22 et décrit comme suit :

- Sécher les éprouvettes dans une étuve à une température de 85°C au moins 24h jusqu'à atteindre une masse constante.
- Retirer l'éprouvette de l'étuve et laisser refroidir à l'air libre à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, noter la masse sèche M_1 .
- Immerger l'éprouvette dans l'eau progressivement pour libérer l'air se trouvant dans les pores, sous une température d'environ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant une durée de 24h.
- Après l'écoulement du temps, éliminer avec serviette l'eau superficielle sur l'éprouvette (l'eau adsorbée) et mesurer la masse M_2 .
- Le coefficient d'absorption qui est défini par le rapport suivant :

$$\text{Abs}\% = \frac{M_2 - M_1}{M_1} 100$$



Figure 2.22 : Essai d'absorption sur une éprouvette de mortier.

2.5.8. Absorption d'eau par capillarité

Selon la norme EN 13057 [48], l'essai de capillarité ou de sportivité vise à évaluer le taux d'absorption d'eau d'un mortier ou d'un béton sans aucune pression. L'expérience comporte la mise en place d'une éprouvette avec des surfaces latérales étanchement protégées pour inviter l'évaporation d'eau par ces parois. Le mode opératoire est illustré sur la figure 2.23 et décrit comme suit :

- Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans une cure sous des températures de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'au 28 jours.
- Quand les 28 jours sont atteints, les échantillons sont étuvés à $85-100^\circ\text{C}$ pendant 24h.
- Après refroidissement, les surfaces latérales des éprouvettes sont enduites de résine afin d'empêcher l'évaporation l'eau absorbée par ces facettes, noter les masses initiales de chaque éprouvette.
- Immerger les éprouvettes dans une eau à des profondeurs de (1 à 2) mm
- Mesurer la variation de la masse des éprouvettes plongées suivant : 0min, 12min, 30min, 1h, 2h, 4h, 5h et 24h.



Figure 2.23 : Essai d'absorption capillaire sur une éprouvette de mortier.

2.5.9. Perte de poids

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans une salle à une température ambiante de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Les éprouvettes ainsi préparées sont exposées depuis le premier jour, jusqu'à 90 jours à l'air libre et pesées régulièrement durant la durée de l'essai comme illustré dans la figure 2.24.

Il faut souligner que le traitement en salle sèche est absolument nécessaire afin que l'eau contenue dans des pores non interconnectés puisse quitter l'éprouvette. Dans le cas contraire, cette eau sera comptabilisée comme eau absorbée. On peut définir la perte de masse en utilisant le rapport suivant :

$$\Delta M = \frac{M_0 - M_1}{M_0} 100\%$$

Avec :

- ΔM : La perte de masse en pourcentage
- M_0 : masse initiale de l'éprouvette
- M_i : masse de l'éprouvette du jour i



Figure 2.24 : Suivi du poids des éprouvettes de mortier au cours de séchage.

2.5.10. Retrait de séchage

Le phénomène de retrait de dessiccation, également connu sous le nom de retrait de séchage, est un processus physique qui se produit au sein du mortier après la période de

prise, le retrait représente une diminution du poids et une baisse de volume ; engendrés par l'évaporation l'eau qui reste piégée au sein des pores.

L'essai consiste à la confection d'éprouvettes prismatique menues d'un plot qui servira à faciliter les lectures des variations de longueur des éprouvettes, après le démoulage les éprouvettes sont conservées dans des conditions ambiantes en position verticale. Les deux bords des éprouvettes sont recouverts de résine imperméable pour éviter toute évaporation par ces bords. Les mesures de variation de masse (perte de poids) et de variation de longueur vont être relevées depuis l'âge de 1 jour jusqu'à atteindre les 90 jours. La figure 2.25 montre l'instrumentation d'une éprouvette de mortier sous l'essai de retrait. Le retrait est défini par le rapport suivant [49]:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta L}{L}$$

Avec :

- ΔL : variation de longueur exprimée en μm .
- L : longueur entre les deux bords de l'éprouvette égale à 160 mm
- ε_r : déformation de retrait exprimée en $\mu\text{m/m}$.



Figure 2.25 : Essai de retrait au cours de séchage sur une éprouvette de mortier.

2.6. Conclusion

Pour caractériser un matériau ou un mortier, il est nécessaire d'effectuer et de répéter plusieurs essais au fur et à mesure que le matériau est disponible. La plupart des tests ont été réalisés dans de bonnes conditions et les résultats sont présentés et discutés dans le chapitre suivant.



***Résultats et
Discussions***



3.1. Introduction

La valorisation des déchets de construction et de démolition (CDW) est un nouveau processus de production récemment émergé pour un but économique et environnemental. Mais jusqu'à présent, la valorisation se limite à utiliser peu de type de ces déchets dans le domaine de la construction.

Les progrès environnementaux et économiques restent au premier plan, en particulier dans les pays à forte production de déchets. Ce travail vise à déterminer la faisabilité de l'utilisation des fractions fines des déchets issus de béton rejetés, Briques cassées ou céramiques devenues inutilisables comme substituant partiel au ciment ordinaire dans la formulation du mortier. Le ciment ordinaire est remplacé avec différentes fractions volumiques de ces déchets et certaines propriétés de ces mortiers ont été testées.

3.2. Présentation des résultats

3.2.1. Étalement

Les résultats de l'étalement des mortiers plastiques à la table à secousses sont représentés sur la figure 3.1. Les mortiers malaxés avec un E/C de 0.5 et contenant 1% de superplastifiant présentent un étalement croissant en fonction de leurs teneurs en fraction fines des différents déchets. Chaque 10% de déchet de céramique ou de briques engendre une hausse de 9 et 7 % d'étalement. Par contre les fines de béton recyclé n'engendrent qu'une amélioration moyenne de 4% pour les trois taux utilisés.

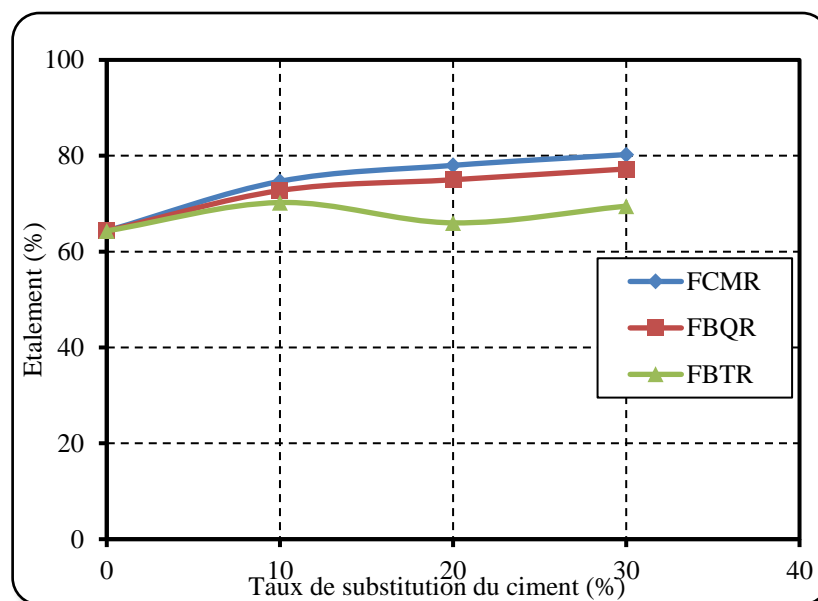


Figure 3.1 : Evolution de l'étalement des mortiers sur la table à secousses en fonction du taux de substitution du ciment.

3.2.2. Prise du ciment

La période de prise du béton représente la transition caractérisant le passage du béton de l'état fluide à l'état solide. Elle commence lorsque le béton perd sa plasticité et devient non ouvrable, et se termine dès qu'il acquit une résistance pour supporter les charges extérieures. Le processus de prise est un phénomène physique dû à l'hydratation du ciment, il est influencé par le rapport E/C, la qualité de ciment, la température, l'évaporation et la présence des additions. Dans ce travail, nous étudierons les modifications apportées par la présence de certains déchets de construction sur la prise des mortiers.

Les résultats obtenus concernant le début et de la fin de prise sont déduits des figures 3.2, 3.3 et 3.4. Le temps du début de prise correspond à un enfoncement de l'aiguille de Vicat qui s'arrête à 2 mm du fond. Par contre, le temps de fin de prise correspond au temps où l'aiguille s'arrête à s'enfoncer dans le mortier. Tous les temps de début de prise enregistrés se situent entre 40 minutes et 1h40min, ce qui représente le temps minimal exigé par les Normes. Le temps de fin de prise varie entre 220 à 440 minutes selon la composition utilisée. Les conditions de laboratoire au moment des essais ont sûrement favorisé l'accélération de la prise. On peut citer qu'on a senti un temps plus au moins chaud durant cette période.

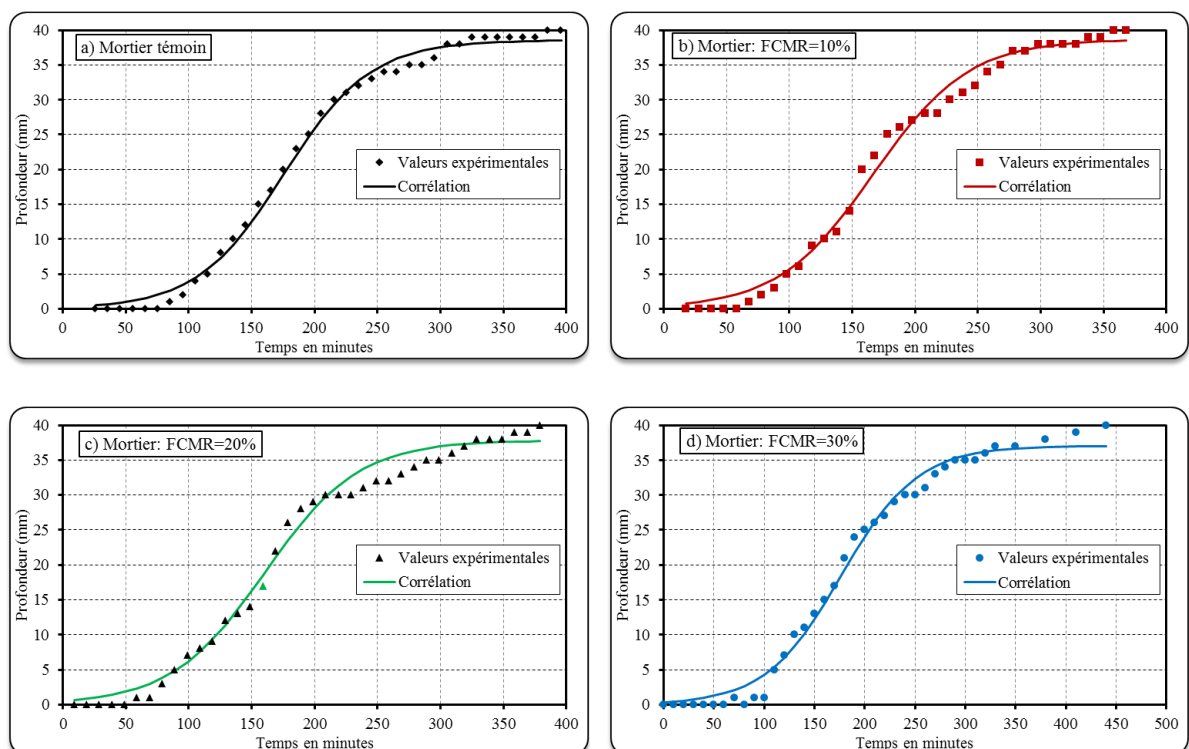


Figure 3.2 : Evolution de l'enfoncement de l'aiguille de Vicat dans les mortiers à base de FCMR.

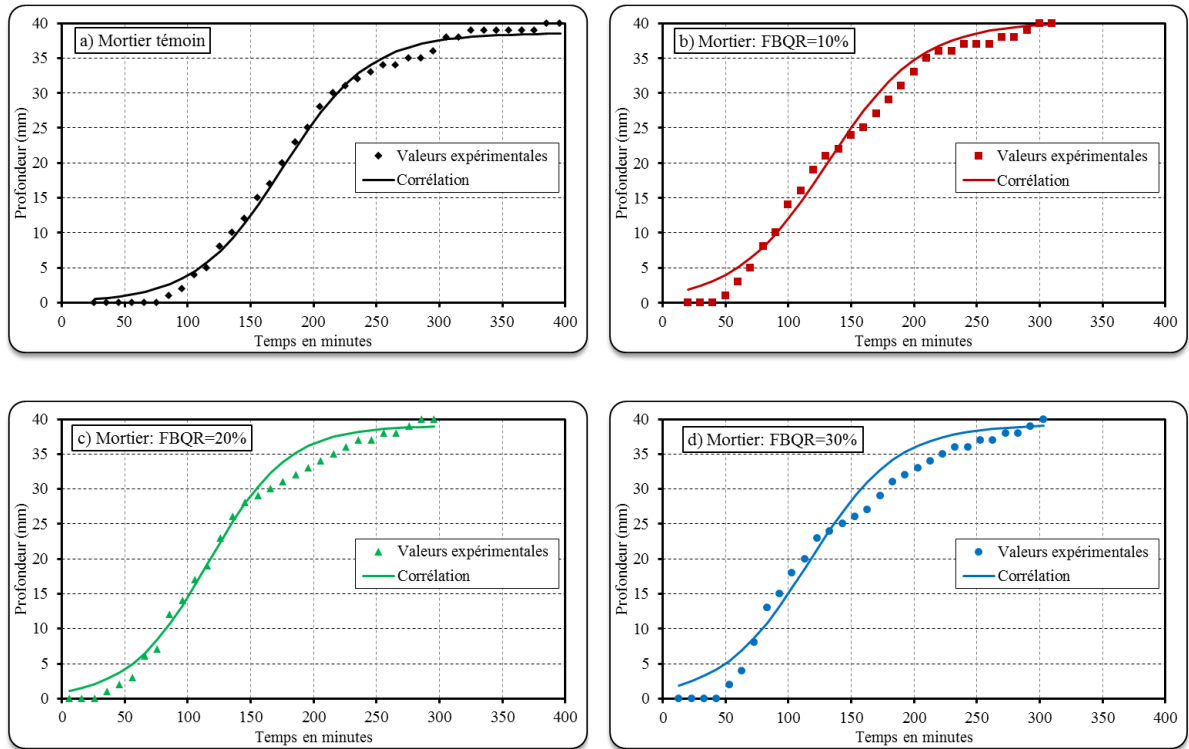


Figure 3.3 : Evolution de l'enfoncement de l'aiguille de Vicat dans les mortiers à base de FBQR.

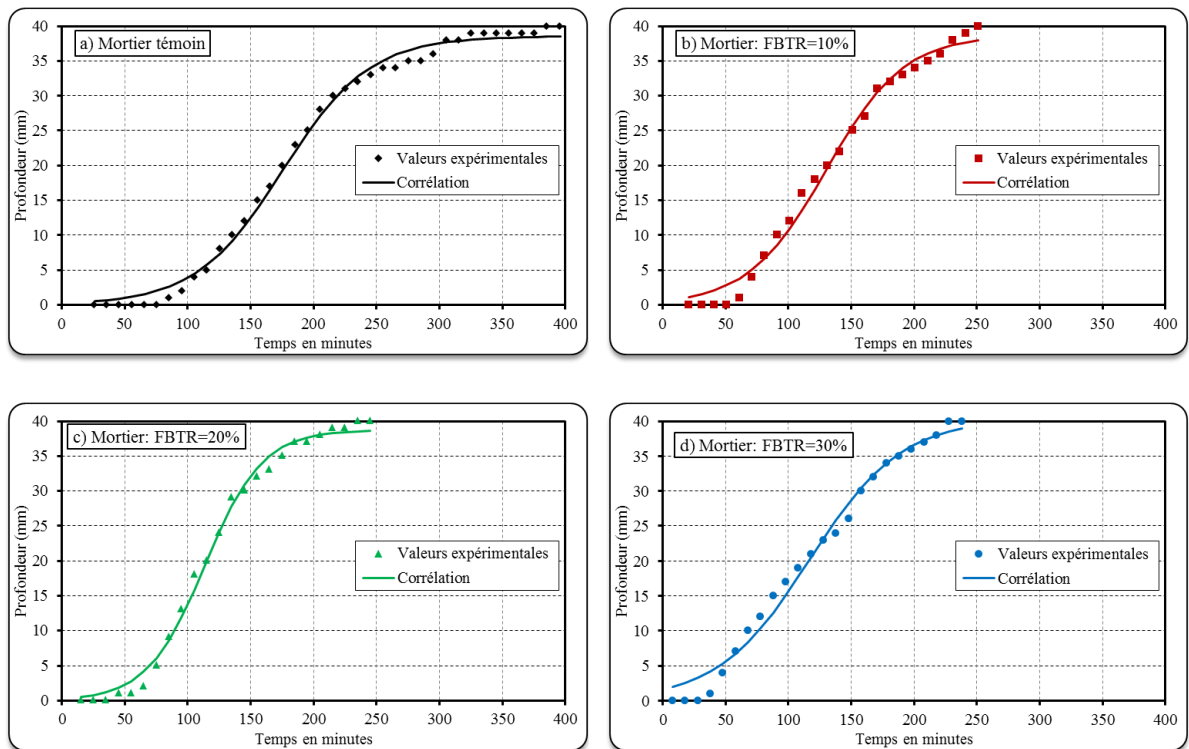


Figure 3.4 : Evolution de l'enfoncement de l'aiguille de Vicat dans les mortiers à base de FBTR.

L'addition d'une substance minérale issue de déchets de construction au ciment entraîne un accroissement du temps de prise attribuable en partie à l'effet de dilution (dilution de l'ingrédient le plus actif) et à l'augmentation de la teneur en eau nécessaire pour préparer une pâte de consistance normale. La figure 3.5 récapitule les résultats de début et de fin de prise des différents mortiers étudiés.

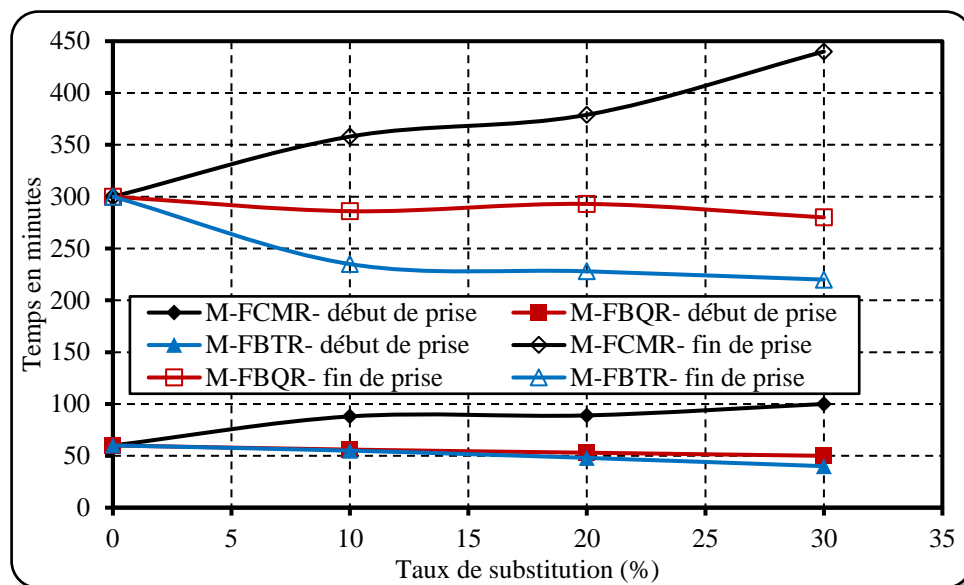


Figure 3.5 : Evolution des temps de début et de fin de prise des différents mortiers.

L'incorporation de la céramique comme substituant d'une partie de ciment entraîne un prolongement du temps de prise. Cette augmentation est presque proportionnelle au taux utilisé. Le temps de début de prise passe de 60 minutes pour un mortier témoin vers 80, 89 et 100 minutes pour des mortiers contenant respectivement 10, 20 et 30 % de FCMR. Le temps de fin de prise se prolonge de 58, 79 et 140 minutes pour les mêmes mortiers.

L'utilisation de la poudre de brique n'apporte aucune modification sur le temps de prise. Son effet de dilution est rapidement compensé par son effet filler et de nucléation qui accélère l'hydratation du ciment. Le temps de début de prise enregistre une légère accélération de 60 minutes pour un mortier témoin vers 56, 53 et 50 minutes pour des mortiers contenant respectivement 10, 20 et 30 % de FBQR. Le temps de fin de prise enregistre une valeur de 300 minutes pour un mortier témoin avec une légère accélération de 6 à 20 minutes pour les mortiers à base de FBQR.

Par contre l'utilisation de la poudre de béton recyclé apporte une accélération et sur le temps de début de prise et sur le temps de fin de prise. Le ciment anhydre et la chaux présents dans l'ancien mortier favorise un milieu propice pour l'hydratation du ciment en lui conférant une prise plus rapide. Le temps de début de prise passe de 60 minutes pour un mortier témoin vers 40 minutes pour le mortier contenant 30% de FBTR. Le temps de fin de prise diminue de 65, 72 et 80 minutes pour les mortiers contenant 10, 20 et 30% de FBTR.

3.2.3. Masse volumique du mortier frais et durci

D'après les résultats de la masse volumique des différents mortiers qui sont présentés sur la figure 3.6, on remarque que la masse volumique de tous les mortiers décroît en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment. Cette diminution atteint 3.6%, 3.4% et 1.2% pour un taux de substitution de ciment de 30% respectivement par les fines de la céramique, de la brique et du béton recyclé. Cela est dû à la faible densité de ces additions en comparaison avec celle du ciment ordinaire. Une fois les éprouvettes durcies, une autre mesure a été effectuée après 28 jours de cure à l'air libre où on a constaté une légère diminution de leurs poids causée par une dessiccation continue. La figure 3.6 présente les résultats de la masse volume des mortiers durcis où chaque 10% de ciment substitué entraîne une diminution de 1.3, 0.95 et 1.2% de la masse volumique respectivement pour chaque 10% de ciment remplacé par du FCMR, FBQR ou FBTR.

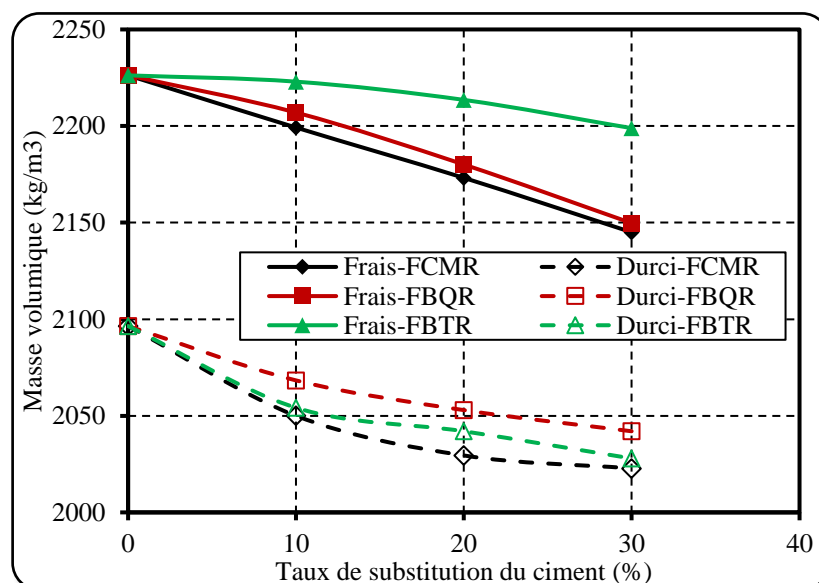


Figure 3.6 : Variation des masses volumiques des mortiers à l'état frais et durci en fonction du taux de substitution du ciment par les fines.

3.2.4. Chaleur d'hydratation

Parmi les facteurs qui régissent la performance du ciment contenant des déchets de construction est son hydratation. Celle-ci représente la conversion de masse entre les différentes phases dans la pâte de ciment. En plus de la complexité de l'hydratation d'un ciment ordinaire, il vient s'ajouter l'interférence de la réaction de ces fractions fines issues des déchets de construction avec celle du ciment. La plupart des réactions d'hydratation sont accompagnées par un dégagement de chaleur servant à les quantifier. La chaleur enregistrée par un calorimètre donne des valeurs de dégagement continues qui conviennent à estimer l'hydratation de ce système ciment-fines de déchet de construction.

Une fois les mesures de l'échauffement faites, on évalue la chaleur d'hydratation en convertissant l'équation intégral-différentielle du dégagement de chaleur en une équation algébrique et en introduisant les différents paramètres de l'essai. Les résultats du calcul sont regroupés dans le tableau 3.1 ci-dessous.

Tableau 3.1 : Valeurs de la chaleur d'hydratation dégagée en J/g pour différents types de déchets de construction

Mortier Témoin	CEM II	FCMR			FBQR			FBTR		
	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
1 jour	192.5	199.6	171.9	121.1	167.7	143.9	139.4	162.5	130.7	127.7
2 jours	237.9	234.7	210.7	161.5	202.7	181.4	166.0	199.3	169.5	146.0
3 jours	264.4	257.0	233.4	185.2	225.8	203.4	181.8	218.4	186.1	161.8
4 jours	283.3	272.7	249.5	202.0	242.2	218.9	193.0	231.7	194.9	173.0
5 jours	297.9	285.0	262.0	215.0	254.9	231.0	201.7	251.6	208.0	181.7

D'après les résultats obtenus, les ciments avec différents taux de déchets de construction présentent une évolution de la chaleur d'hydratation continue avec des valeurs rapprochées durant le premier jour. Après le premier jour, les courbes illustrées sur la figure 3.7, correspondant aux taux de 20% des trois déchets, se divergent tout en restant inférieure à la chaleur émise par le mortier de référence. A cinq jours, la chaleur d'hydratation pour des ciments contenant 20% FCMR, FBQR ou FBTR représente 88, 77 et 70% de celle du ciment ordinaire. Ceci montre un effet bénéfique de ces additions pour lutter contre l'élévation de température et rendre ces mortiers plus performant en climat chaud.

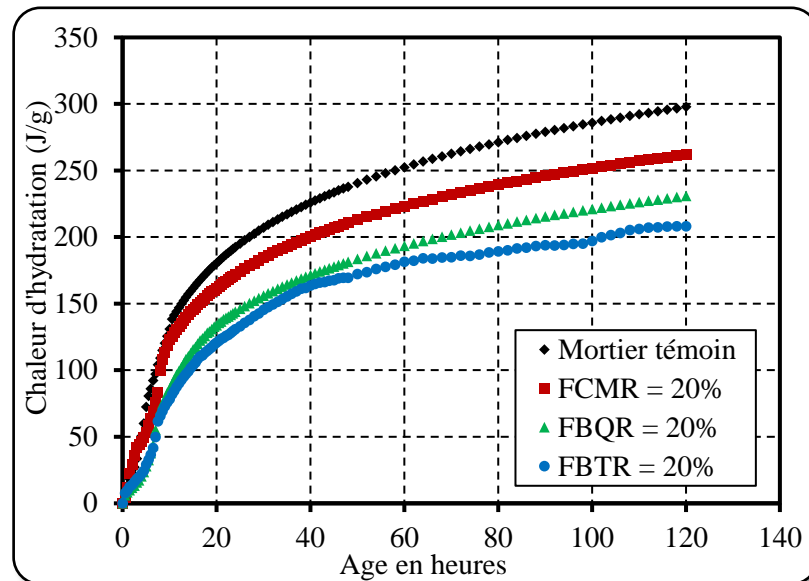


Figure 3.7 : Evolution des chaleurs d'hydratation des mortiers contenant des déchets de construction.

En utilisant les résultats obtenus des chaleurs d'hydratation, on peut représenter le flux dégagé par un simple rapport de l'incrément de chaleur sur le pas de temps correspondant. La figure 3.8 illustre les résultats obtenus où il paraît clairement les différentes phases de l'hydratation. La première remarque met en lumière le rabatement du second pic de l'hydratation. Ceci montre une réduction de chaleur pour les trois additions utilisées. La deuxième remarque consiste à un prolongement du dégagement de chaleur avec un retard sur l'apparition du deuxième pic de 2 à 3 heures. Ceci confirme l'intérêt de combiner le ciment ordinaire avec d'autres additions et surtout si elles sont issues du recyclage.

3.2.5. Résistance à la flexion

La Figure 3.9 montre que les différentes résistances à la flexion varient avec le taux de substitution du ciment avec les fines de déchets de construction. Ces résistances correspondent à différents mortiers, fabriqués en remplaçant une partie de ciment avec ces fines. D'après l'illustration des résultats, il est évident que cette évolution dépend du type de déchet et de leurs taux incorporés. D'après ce graphique, on peut constater que la substitution jusqu'à 20% de ciment par ces fines n'engendre qu'une légère diminution de la résistance. Après trois jours de cure, les mortiers contenant 20% de FCMR, FBQR ou FBTR enregistrent des baisses de résistance à la flexion respectivement de 0%, 7% et 12%. Après 28 jours de cure, cette chute n'est que de 6%, 6% et 3% pour 20% de chaque addition.

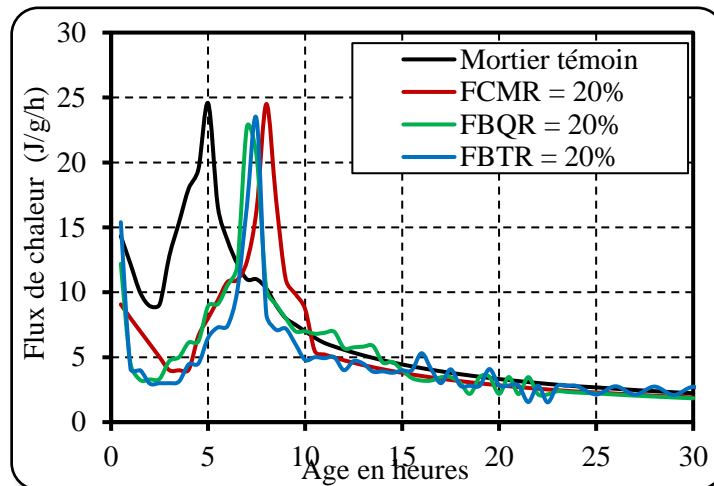


Figure 3.8 : Evolution des flux de chaleur d'hydratation des mortiers contenant des déchets de construction.

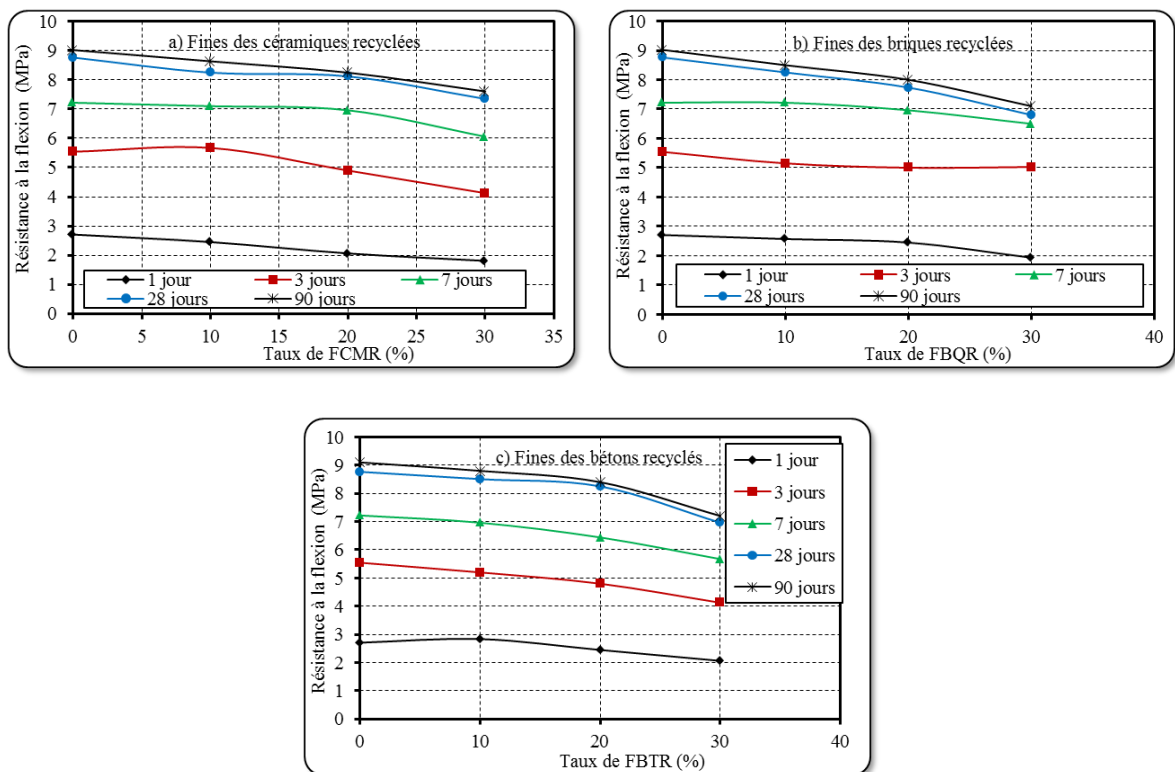


Figure 3.9 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du taux de substitution du ciment par les fines.

3.2.6. Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression à différents âges des mortiers testés en fonction du pourcentage de substitution du ciment par des fractions fines des déchets de construction sont représentés dans la figure 3.10.

Selon les résultats présentés, il est clair que l'utilisation des fractions fines des déchets en tant que substituant d'une partie de ciment apportent un effet favorable au jeune âge et les résistances à un jour sont équivalentes à celle d'un ciment ordinaire.

Au cours du temps, les additions présentent une efficacité inférieure à celle de ciment toute en restant dans la limite de la pratique d'utilisation. L'incorporation de 10%, 20% ou 30% de céramique provoque une chute de résistance à 28 jours respectivement de 9%, 21% et 27%. Lorsqu'on utilise les fractions fines de la brique recyclé on rencontre des baisses de 6%, 15% et 17% pour les mêmes taux. En utilisant les fines issues du béton recyclé on enregistre des chutes de résistances de 7%, 16% et 38%.

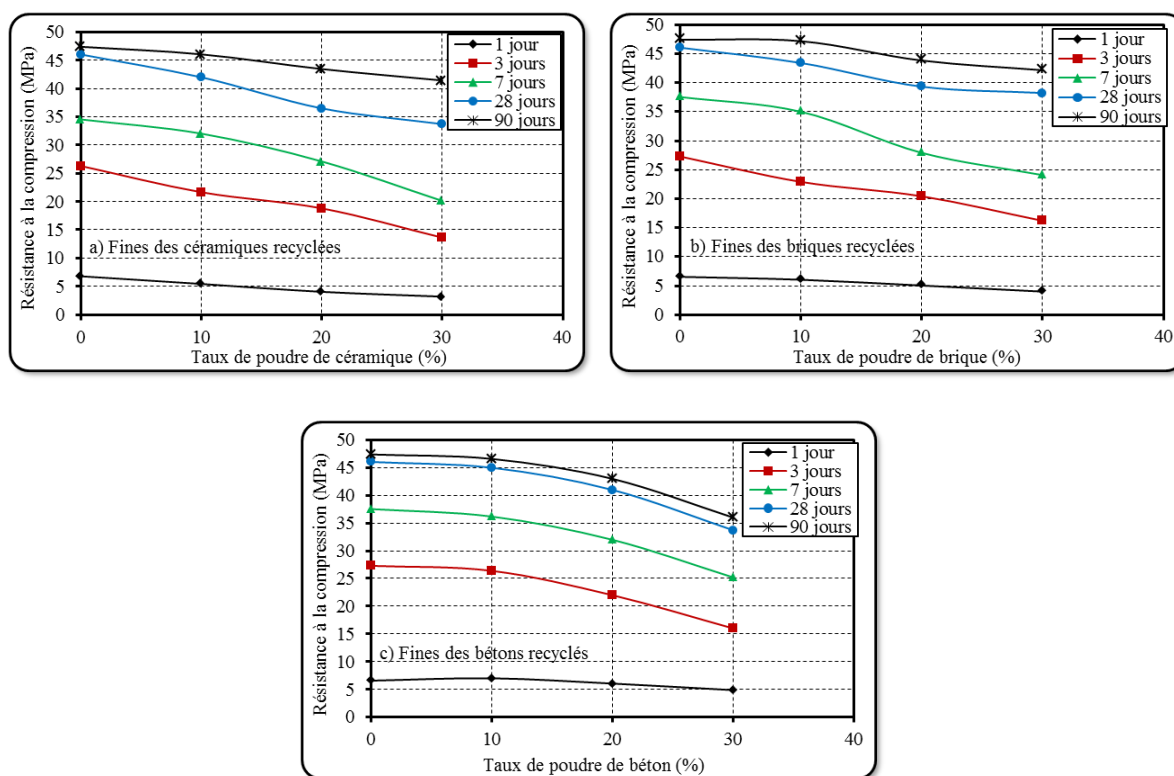


Figure 3.10 : Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution du ciment par les fines de déchets de construction.

3.2.7. Porosité accessible à l'eau

La durabilité des bétons dépend beaucoup de la porosité, cette dernière conditionne l'intensité des interactions du béton avec les agents agressifs. Les pores à l'intérieur de l'ouvrage facilitent le processus d'endommagement, lequel s'initie généralement en surface. Les résultats de la porosité en fonction du taux des fractions fines utilisées sont

présentés dans la figure 3.11. Au premier regard, on observe que la porosité augmente avec l'utilisation de ces déchets grâce à leurs poids légers et à leurs faibles activités. Une analyse détaillée des graphes prouve que les mortiers composés avec ces déchets sont plus poreux que les mortiers témoins au jeune âge et à long terme quel que soit les taux utilisés.

Cette porosité élevée est un souci pour la fabrication des mortiers à base de ces déchets, en effet cette porosité revient à deux facteurs importants :

- La porosité initiale de ces fractions fines.
- La faible activité de ces additions par rapport à un ciment plus actif

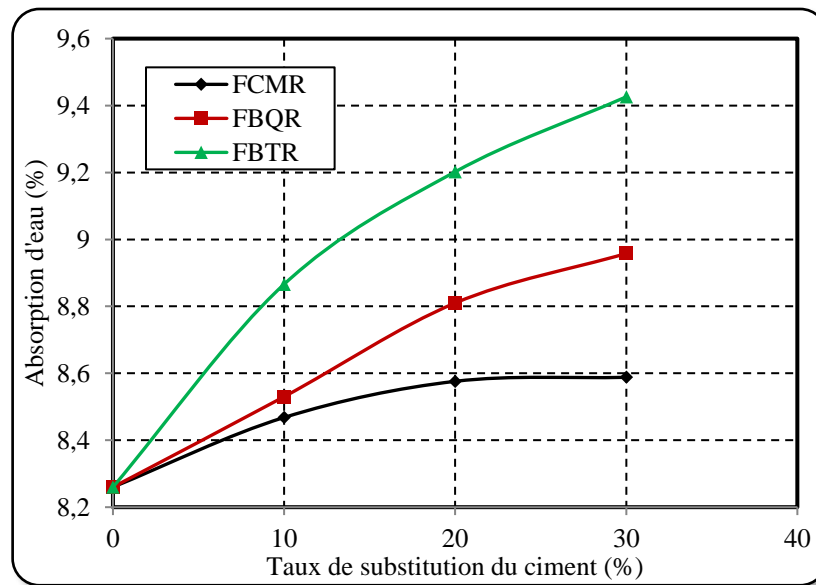


Figure 3.11 : Evolution de l'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution du ciment par les fines de déchets de construction.

3.2.8. Absorption d'eau par capillarité

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par capillarité des différents mortiers sont résumés dans la figure 3.12. Selon ces résultats, on observe que la porosité diminue avec l'âge où les courbes sont presque asymptotiques et tendent à garder une absorption capillaire constante à long terme.

Il est clair que l'utilisation des fines des déchets de la construction modifie l'absorption capillaire en modifiant la microstructure de la pâte. Ce changement est consigné par l'effet de dilution de chaque addition et par sa réactivité dans le processus de l'hydratation des mélanges cimentaires. Pour bien analyser ce phénomène, on calcule le

coefficient de capillarité évalué comme la pente de la droite monotone établie en fin de l'essai. En général l'absorption capillaire est déduite comme suit :

$$Abs_c = Ca S \sqrt{t}$$

Avec :

- Ca : Coefficient d'absorption capillaire ($kg/m^2/\sqrt{heure}$)
- S : Surface de contact de l'éprouvette ($0.0016 m^2$)
- t : temps en heures
- Abs_c : Quantité d'eau absorbée par capillarité en kg ($M_i - M_0$)

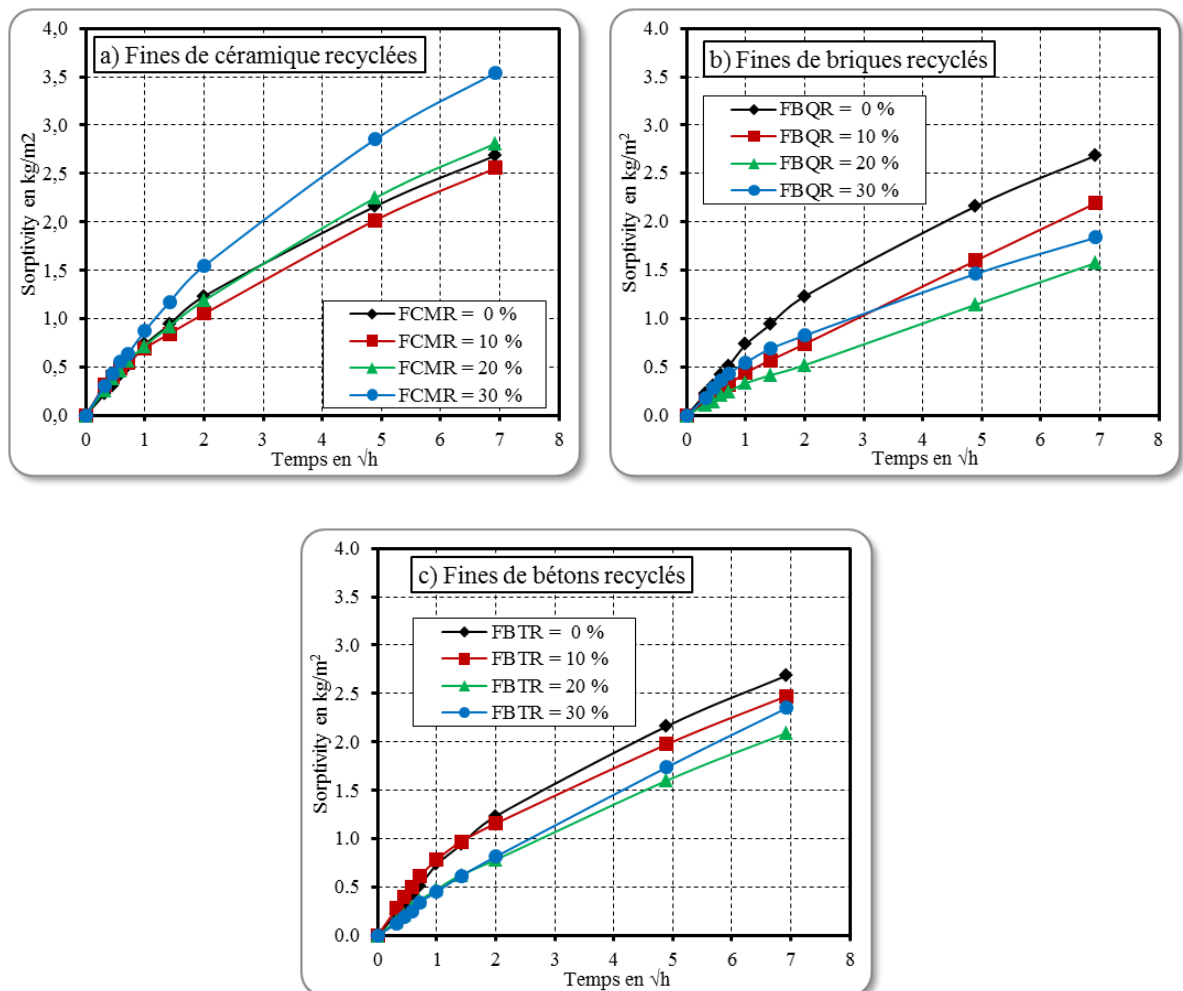


Figure 3.12 : Evolution de l'absorption capillaire des différents mortiers au cours du temps.

Les valeurs trouvées sont illustrées sur la figure 3.13. Un mortier témoin enregistre un coefficient de capillarité de $0.34 kg/m^2/\sqrt{h}$. Ce coefficient décroît lorsque le mortier contient 10% des fines de constructions; sa valeur atteint $0.32 kg/m^2/\sqrt{h}$ pour les fines de

FCMR et $0.29 \text{ kg/m}^2/\sqrt{h}$ pour les fines FBQT et FBTR. Au-delà de ce taux, seules les FCMR engendrent une hausse du coefficient de capillarité qui peut atteindre $0.46 \text{ kg/m}^2/\sqrt{h}$ pour le mortier avec 30% de fines. Les autres déchets apportent une amélioration considérable de la capillarité qui peut atteindre des valeurs de $0.22 \text{ kg/m}^2/\sqrt{h}$ dans le cas des briques recyclées.

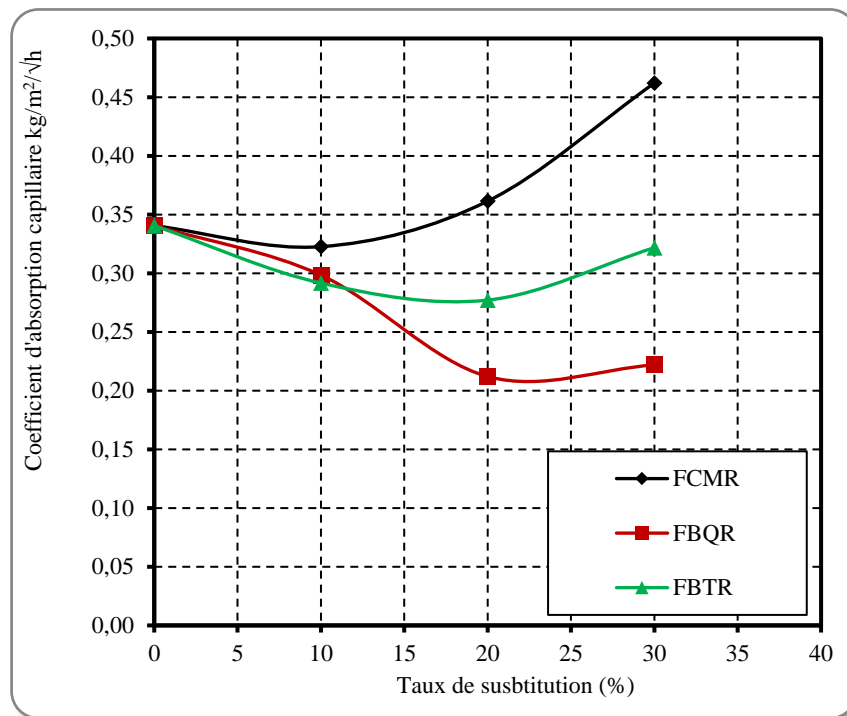


Figure 3.13 : Evolution du coefficient de l'absorption capillaire en fonction du taux de substitution du ciment par les fines de déchets de construction.

3.2.9. Perte en poids

Lorsque les mortiers sont soumis aux conditions du laboratoire, ils subissent un séchage au cours du temps et qui se trouvent avec un poids légèrement décroissant. Cette perte de poids est le témoin de la présence des gros pores qui laissent échapper l'eau et favorisant le séchage et évidemment le retrait de dessiccation. La figure 3.14 illustre la variation de la perte de masse enregistrée pour les dix mortiers durant 90 jours d'exposition à l'air libre.

Pour tous les mortiers testés, cette chute de poids est très rapide durant la première semaine où 4% de poids équivalent à l'eau évaporée sont enregistrés. Par la suite, cette valeur tend vers une stabilisation où elle ne progresse que de 2% jusqu'à l'âge de 90 jours. Il est bien noté, que les différentes fractions fines des déchets apportent une perte en poids proportionnelle aux taux de substitution du ciment.

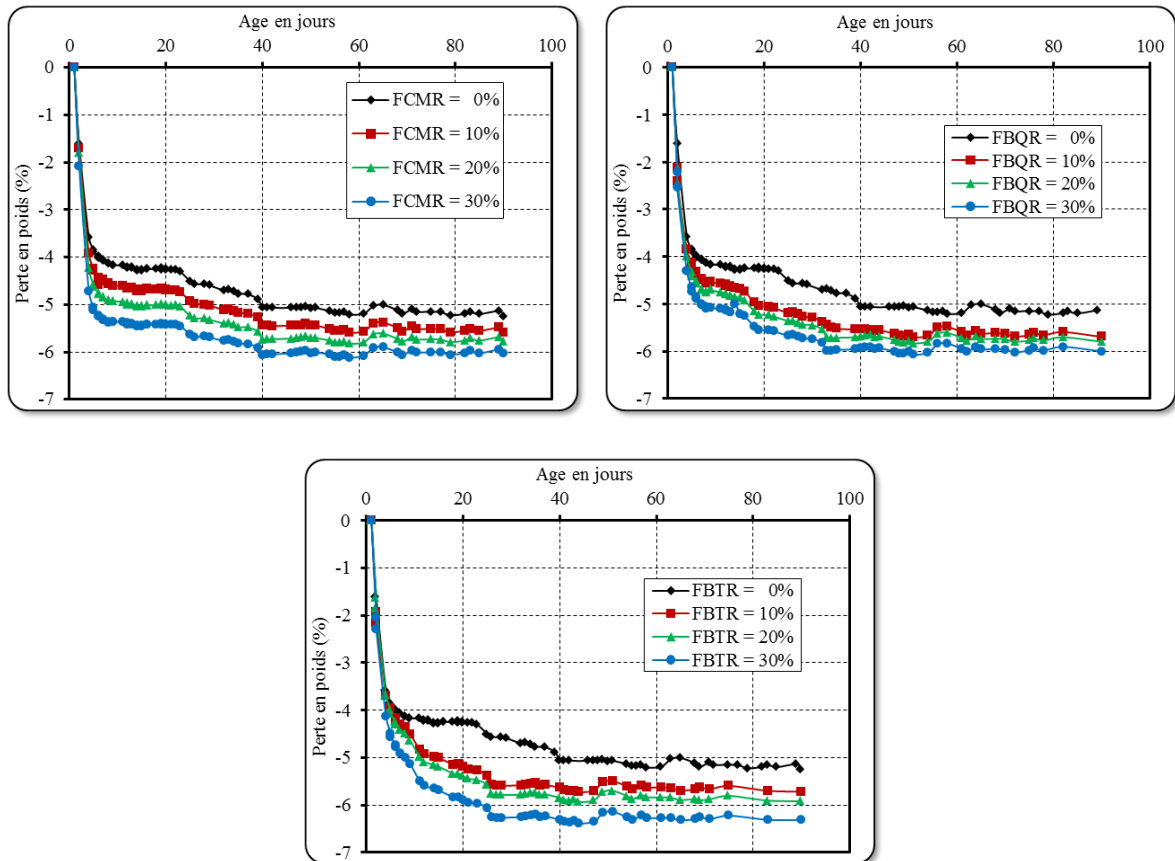


Figure 3.14 : Evolution de la perte en poids des différents mortiers conservés à l'air libre.

3.2.10. Retrait

Le retrait du béton peut être défini comme la déformation d'un élément de béton libre de toute sollicitation mécanique extérieure dans une ambiance thermodynamique constante, ainsi on distingue le *retrait* dans une ambiance sèche et le *gonflement* dans une ambiance saturée. La prédiction de cette déformation est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en béton (ponts, ouvrages hydrauliques, etc.). En effet, elle peut être à l'origine de la fissuration, de pertes de précontrainte, d'une redistribution des contraintes, et même, plus rarement, de la ruine de l'ouvrage. Cette variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton, la qualité de ses constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de conservation.

Les déformations du retrait des différents mortiers enregistrées sont illustrés sur les figures 3.15 ; 3.16 et 3.17. Il est bien clair que le retrait est croissant en fonction de l'âge avec une vitesse décroissante. De même, la présence des fractions fines des déchets de construction entraîne une augmentation de la porosité qui favorise le départ de l'eau et augmente ainsi le retrait.

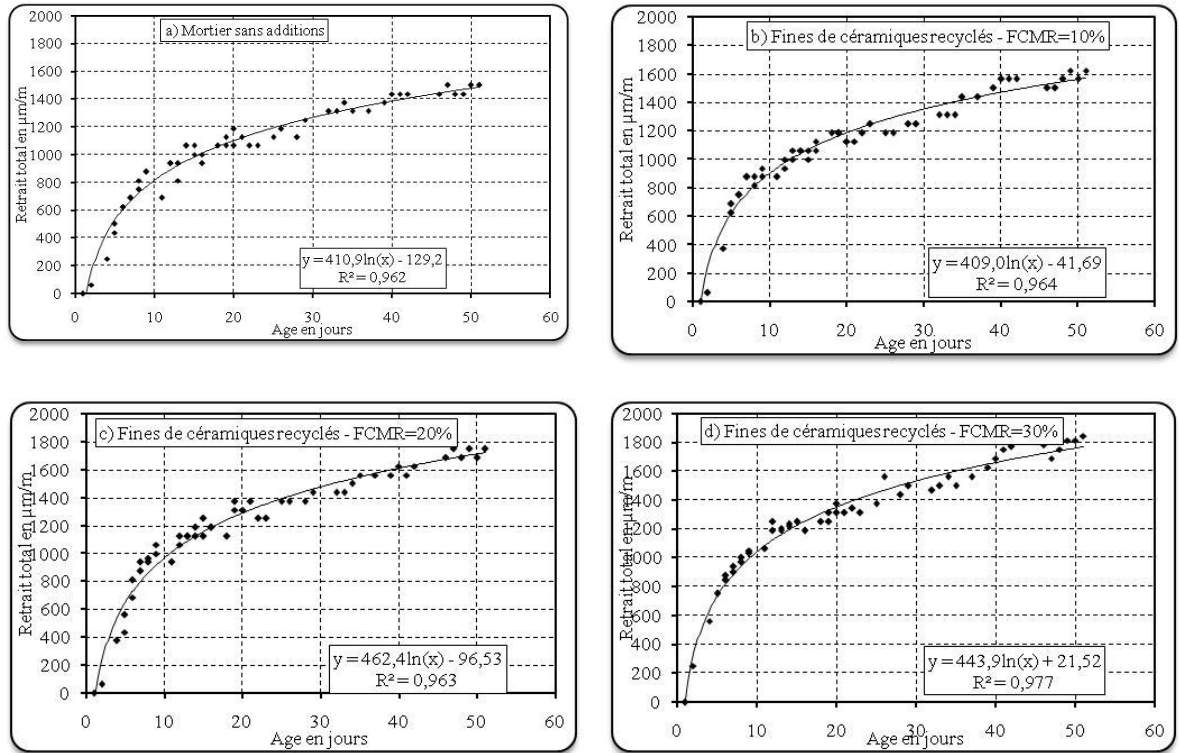


Figure 3.15 : Evolution de la déformation du retrait d'un mortier contenant des FCMR durcissant à l'air libre.

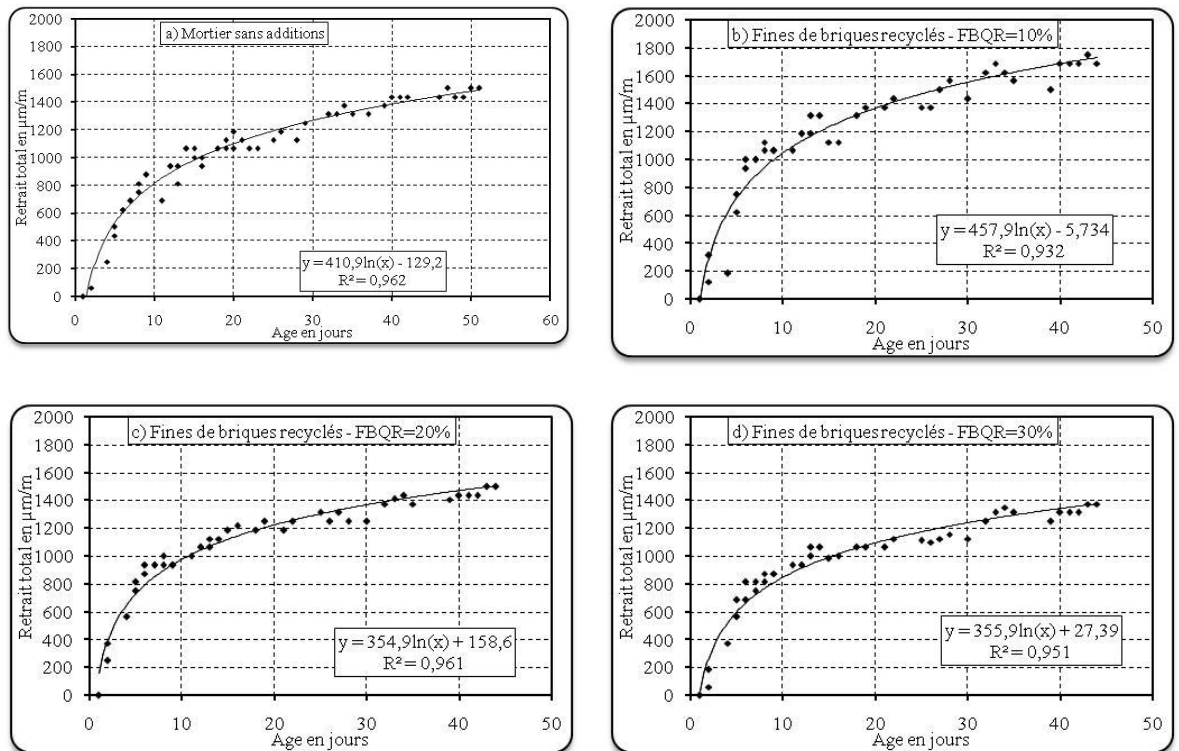


Figure 3.16 : Evolution de la déformation du retrait d'un mortier contenant des FBQR durcissant à l'air libre.

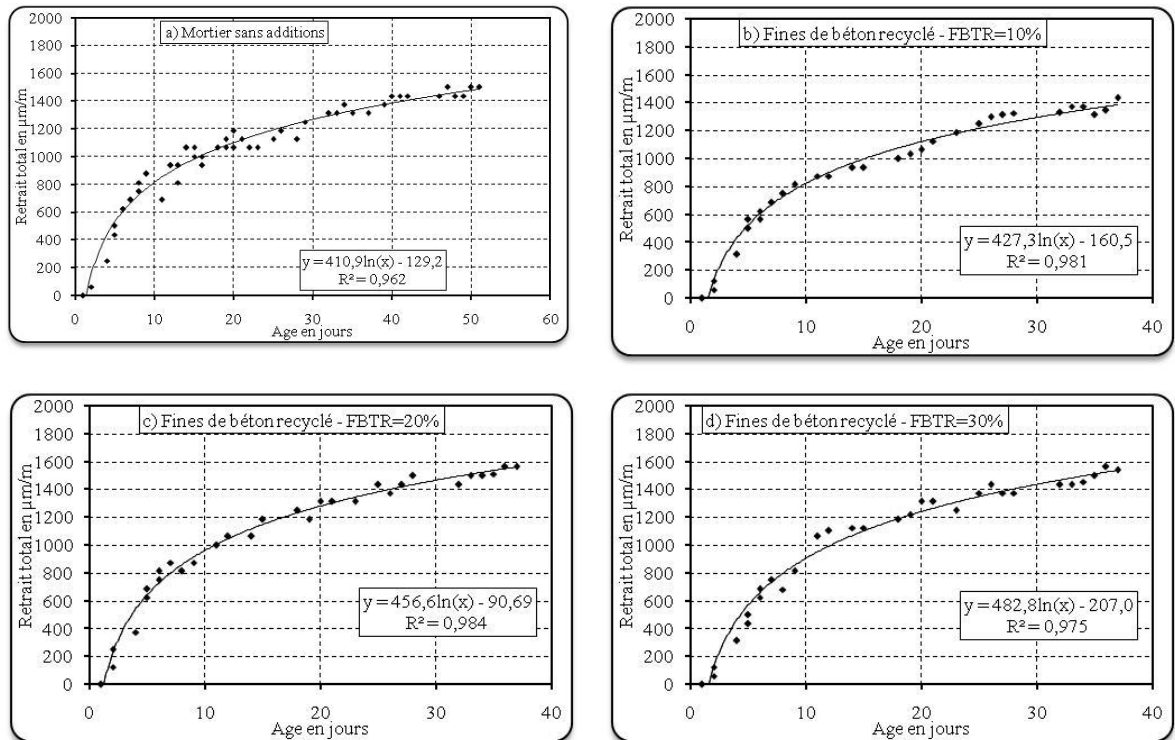


Figure 3.17 : Evolution de la déformation du retrait d'un mortier contenant des FBTR durcissant à l'air libre.

3.3. Analyse des résultats

3.3.1. Relation entre la résistance à la flexion et à la compression

Il est convenable d'étudier la variation de la résistance à la flexion en fonction de la résistance à la compression. Pour cela, on convertit les résultats trouvés de la résistance à la flexion en résistance à la traction en les multipliant par un coefficient de 0,6 qui prend en compte la plastification du mortier en phase de rupture. Le modèle Eurocode 2 [50] illustré dans l'Equation 3.1 a été utilisé pour vérifier les résultats obtenus dans lesquels une correction a été ajoutée pour mieux ajuster les données trouvées.

$$R_t = 0.3R_c^{2/3} \tag{3.1}$$

Avec R_c et R_t sont respectivement les résistances à la compression et à la traction

Les résultats représentés sur la figure 3.18 montrent un effet marginal du type des additions recyclées utilisées où les différents déchets engendrent un effet identique entre la compression et la traction. En faisant une comparaison avec le modèle EC2, on s'aperçoit une amplification des résistances expérimentales de 40%. Une nouvelle relation est

proposée avec un coefficient de corrélation de 0.96, ce qui donne une relation plus adéquate exprimée comme suit :

$$R_t = 0.42R_c^{2/3} \tag{3.2}$$

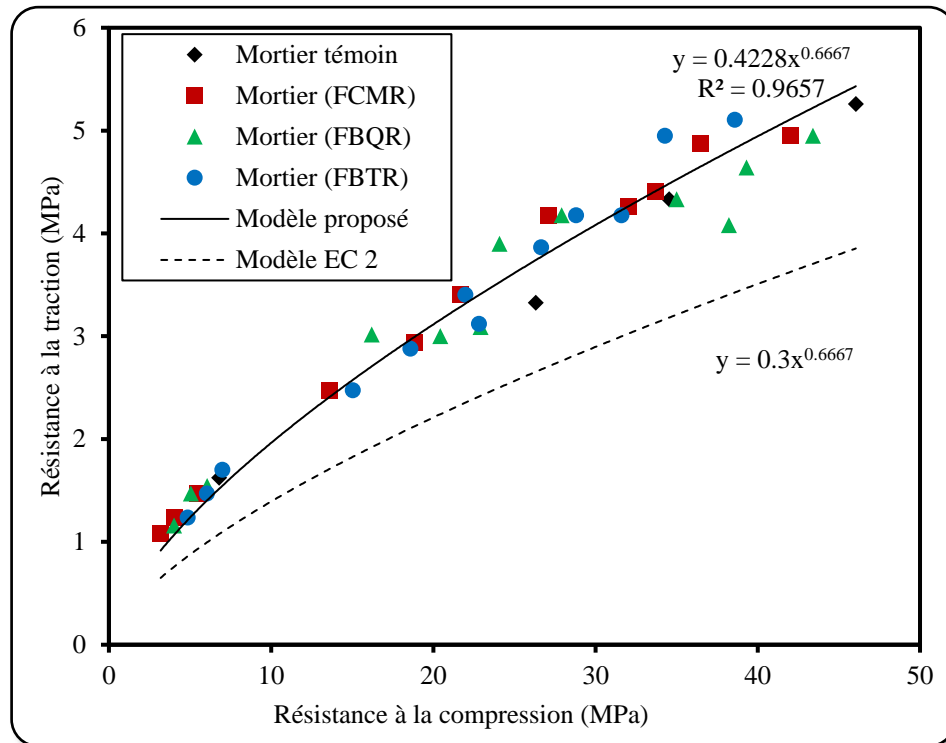


Figure 3.18 : Relation entre la résistance à la traction et celle à la compression.

3.3.2. Relation entre les résistances à la compression

La figure 3.19 illustre une comparaison des résistances à la compression avec celles du mortier témoin sans additions minérales mesurées à 90 jours. Il est bien clair que la relation linéaire est très convenable donnant lieu à des coefficients de corrélation proche de l'unité. L'addition de la poudre de céramique engendre une chute de résistance allant de 8% à 28% selon le taux de FCMR utilisé. D'un autre côté, cette variation est de 6 à 22% lorsqu'on utilise la poudre FBQR. En incorporant 10 à 30% de FBTR, les résistances sont 15% à 35% inférieures par rapport à celles du mortier témoin. Si on considère un indice d'activité limite de 0.75 comme suggéré par ASTM C 1697-21 [51]. On peut conclure que les taux limites de ces déchets sont de 20% pour les FCMR, 30% pour les FBQR et 20% pour les FBTR.

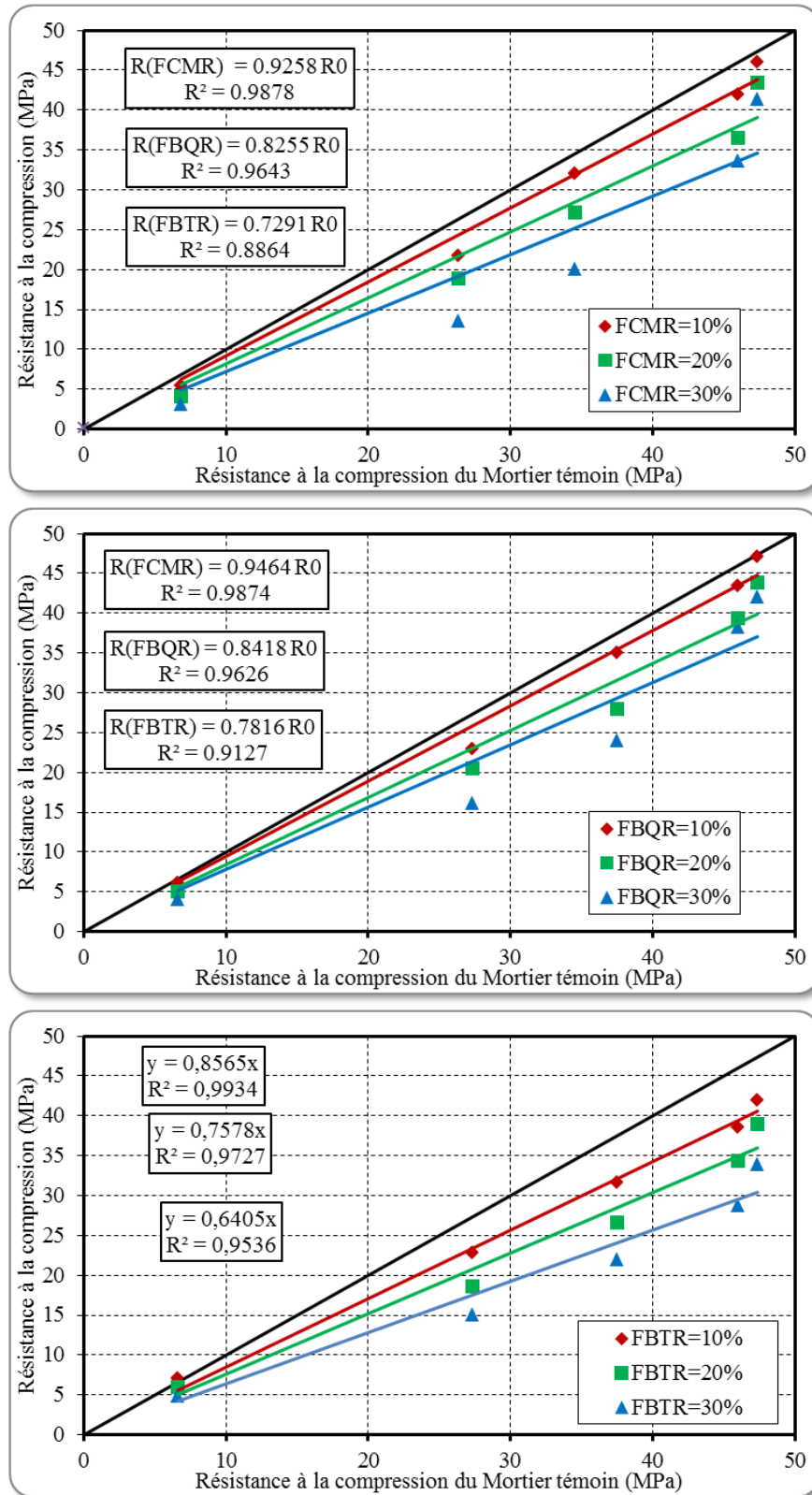


Figure 3.19 : Comparaison des résistances à la compression avec celles du mortier témoin.

3.3.3. Relation entre les retraits

L'incorporation des déchets de construction comme substituant au ciment entraîne des modifications physico-chimiques dans la microstructure de la pâte de ciment. Leur présence modifie la cinétique d'hydratation et joue un rôle déterminant sur l'hydratation du ciment par son effet physique ou chimique. Le séchage des mortiers produits conduit à une augmentation du retrait. Sur la figure 3.20 montre une variation linéaire entre les retraits des mortiers contenant des déchets avec celui d'un mortier témoin confectionné seulement avec du ciment. La substitution du ciment par 10%, 20% ou 30% de FCMR engendre une déformation de retrait respectivement de 6%, 14% et 18%. Cette augmentation est moins importante lorsque les FBQR sont incorporées où seulement des hausses de 5%, 11% et 0.1% sont enregistrées. Lorsque le mortier est malaxé avec des fines FBTR, le retrait progresse de 2%, 12% et 8% pour les mêmes taux.



Figure 3.20 : Comparaison des résistances à la compression avec celles du mortier témoin.

3.3.4. Relation entre les chaleurs d'hydratation

En comparant les chaleurs d'hydratation dégagées, on remarque que les déchets de construction contribuent à une baisse considérable des chaleurs ce qui les rend recommandés en climat chaud. La figure 3.21 montre des relations linéaires des chaleurs avec celle d'un mortier témoin avec des coefficients de corrélation avoisinant l'unité ce qui conforte ce choix. Lorsque 20% de ciment est remplacé par des fines de céramique recyclée, on constate une baisse de chaleur de 12%. Cette baisse est de 25% et 31% lorsqu'on substitue le ciment par les fines de briques ou de béton recyclés.

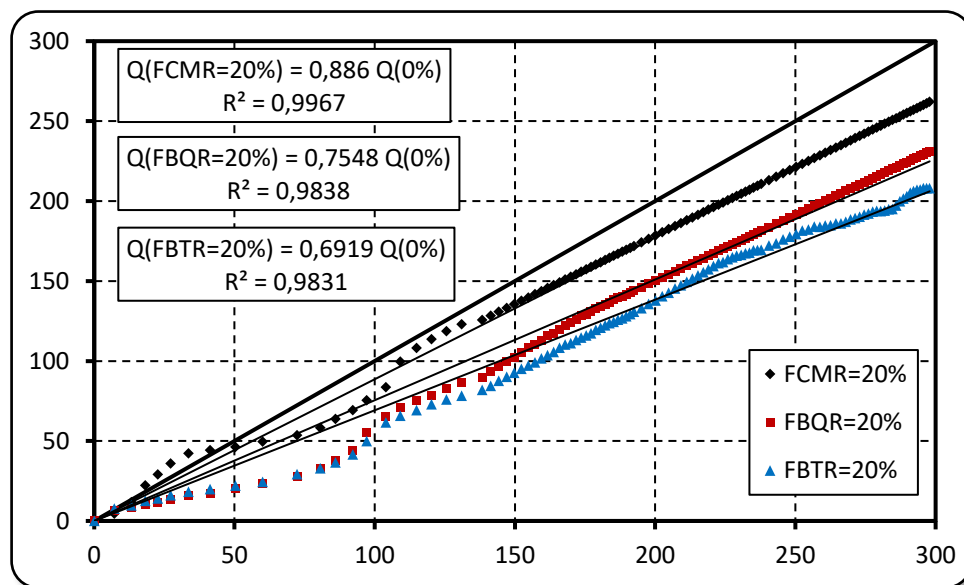


Figure 3.21 : Comparaison des chaleurs d'hydratation avec celle d'un mortier témoin.

3.4. Conclusion

A la lumière de ce travail, on peut conclure que les fractions fines de déchets de construction peuvent substituer le ciment ordinaire sans causer de chutes de performances considérables. Avec des taux modérés de 20%, les résistances mécaniques sont comparables au jeune âge et légèrement inférieures à long terme. Les essais de durabilité restent satisfaisants et faible chaleur d'hydratation dégagée très prometteuse en conditions climatiques extrêmes.



***Conclusions
générales***

4. Conclusions générales

Le ciment Portland est un matériau dont la production induit un impact environnemental important et une consommation en ressources naturelles conséquentes. La production de ciment constitue cependant une opportunité majeure pour la valorisation de plusieurs types de déchets, notamment en substitution des matières premières dans le cru cimentier. Cependant, ce recyclage ne doit pas affecter la qualité du ciment Portland, ni le processus de fabrication complexe. Pour le cru, une variation de la composition minéralogique, de la finesse ou la présence de certains éléments (alcalins par exemple), peut induire une aptitude à la cuisson moindre et donc à une consommation d'énergie plus élevée et/ou un rendement réduit.

Les déchets de construction et de démolition représentent également des flux et des quantités très élevées de matières. Selon leur origine, leur typologie et leur mode de traitement, les déchets de construction et de démolition présentent une variabilité très importante en termes de composition, de propriétés physiques et/ou chimiques.

A l'issue de cette étude expérimentale, certaines conclusions peuvent être tirées :

- Les déchets utilisés (céramique, brique, béton) sont considérés comme des matériaux minéraux ayant une dureté similaire à celle du clinker leur permettant d'être introduit comme addition minérale en cimenterie.
- Tous les temps de début de prise enregistrés, des trois déchets, se situent entre 40 minutes et une 1h40min, ce qui représente le temps minimal exigé par les Normes. Le temps de fin de prise varie entre 220 à 440 minutes selon la composition utilisée.
- La masse volumique de tous les mortiers décroît en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment. Cette diminution atteint 3.6%, 3.4% et 1.2% pour un taux de substitution de ciment de 30%. Une fois les éprouvettes durcies, on a constaté une légère diminution de leurs poids causée par une dessiccation continue. Chaque 10% de ciment substitué entraîne une diminution de 1.3, 0.95 et 1.2% de la masse volumique.
- A cinq jours, la chaleur d'hydratation pour des ciments contenant 20% FCMR, FBQR ou FBTR représente 88, 77 et 70% de celle du ciment ordinaire. Ceci montre

un effet bénéfique de ces additions pour lutter contre l'élévation de température et rendre ces mortiers plus performant en climat chaud.

- La substitution jusqu'à 20% de ciment par ces fines n'engendre qu'une légère diminution de la résistance à la flexion. Après trois jours de cure, les mortiers contenant 20% de FCMR, FBQR ou FBTR enregistrent des baisses de résistance à la flexion respectivement de 0%, 7% et 12%. Après 28 jours de cure, cette chute n'est que de 6%, 6% et 3% pour 20% de chaque addition.
- L'utilisation des fractions fines des déchets en tant que substituant d'une partie de ciment apportent un effet favorable au jeune âge et les résistances à un jour sont équivalentes à celle d'un ciment ordinaire. A 28 jours, l'incorporation de 10% de FCMR, FBQR ou FBTR engendre une baisse de résistance à la compression respectivement de 9% ; 6% et 7% seulement.
- Un mortier témoin enregistre un coefficient de capillarité de $0.34 \text{ kg/m}^2/\sqrt{h}$. Ce coefficient décroît lorsque le mortier contient 10% des fines de constructions ; sa valeur atteint $0.32 \text{ kg/m}^2/\sqrt{h}$, $0.29 \text{ kg/m}^2/\sqrt{h}$ et $0.29 \text{ kg/m}^2/\sqrt{h}$ respectivement pour les fines FCMR, FBQT et FBTR.
- La substitution du ciment par 10%, 20% ou 30% de FCMR engendre une déformation de retrait respectivement de 6%, 14% et 18%. Cette augmentation est moins importante lorsque les FBQR sont incorporées où seulement des hausses de 5%, 11% et 0.1% sont enregistrées. Lorsque le mortier est malaxé avec des fines FBTR, le retrait progresse de 2%, 12% et 8% pour les mêmes taux.

En fin de travail, on peut suggérer aux futurs chercheurs de s'approfondir davantage sur ces matériaux et identifier :

- Leurs effets sur la microstructure
- Leurs effets sur la durabilité
- Leurs combinaisons avec les additions minérales



Références bibliographiques



Bibliographie

- [1] J. MEHU et Y. PERRODIN, *Etude comparative et critique des normes et procédures Retenues au plan international pour évaluer le potentiel polluant de déchets solidifiés*, Villeurbanne (Fr), 1991, p. 128.
- [2] «Ciema,» [En ligne]. Available: WWW.ciema.fr. le 01/05/2024
- [3] *cours de gestion de déchets*, 755319840.
- [4] ADEME, *Etude sur le prix d'élimination des déchets inertes du BTP ADEME*, juin 2012.
- [5] «Vedure,» [En ligne]. Available: <http://www.vedura.fr/environnement/déchets/déchets-inerts..>Le 20/04/2024
- [6] «BS ENVIRONNEMENT,» valorisation et services, [En ligne]. Available: <https://www.bsenvironnement.fr/nos-prestations/dechets-pris-en-charge/27-dechets-non-dangereux.html>. Le 22/05/2024
- [7] «Vedura,» [En ligne]. Available: <http://www.vedura.fr/environnement/déchets,déchets-industriels-speciaux..>Le 15/05/2024
- [8] «Prevention btp,» [En ligne]. Available: <http://www.preventionbtp.fr/ressources/solutions/gerer-lesdechets-inertes-des-chantier..>Le 05/05/2024
- [9] : R.jin and Q.chen, "Investigation of concrete recycling in the U.S construction industry", *procedia Ery*.vol.118,pp.894_901,2015,doi:10.1016/j.procrj.2015_08/528..
- [10] SAADANI.S, "comportement des bétons à base de granulats recycles", université Mentouri Constantine, 2010..
- [11] ROUSSEAU.E, "Quantité et qualité des matières résiduelles de construction et de démolition", Belgique, Centre Scientifique et Technique de la Construction, 1998.
- [12] SENES CONSULTANTS LIMITED (1993). *Construction and demolition waste in Canada: Quantification of waste and identification of Opportunities for Diversion from Disposal*, Ottawa, Environment Canada, Office of Waste Management and National Resources Canada.
- [13] *Characterization of Municipal Solid Waste in the United States, 1960 to 2000, prepared for the U.S. Environmental Protection Agency by Franklin Associates Ltd., juillet 1986.*
- [14] Genest .G, 2010 « recyclage des débris de construction et de démolition (béton, brique et asphalte) » *façons de faire à l'extérieur du Québec dossier client no 40916 rapport technique nort-40916.*
- [15] *Revue de presse special, "catastrophes naturelles "2019,pp.92-95*
doi:10.3917/ifri.demon.2011.01.0092.
- [16] FFB,et ADEME 2014, "Guide de conception et de fonctionnement des installations de Traitement des

déchets du BTP", Paris : SEBTP.

- [17] C. Yang, J. Li, and L. Li, "Expansion responses of a cylindrical cavity in overconsolidated unsaturated soils: A semi-analytical elastoplastic solution," *Computers and Geotechnics*, vol. 130, p. 103922, 2021.
- [18] INSTITUT BRUXELLOIS pour la gestion de l'environnement Architectes et professionnels du secteur de la construction , Fiche 4.1; "l'utilisation de granulats issus du recyclage".
- [19] Evangelista, L., & de Brito, J. (2014). Concrete with fine recycled aggregates: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(2), 129–172.
- [20] BOUDINA.T, "Etude de l'influence de la granulométrie et de la nature des granulats recyclés sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons par la méthode des plans d'expériences", *Faculté des Sciences et de la technologie*, 2022.
- [21] Boulay, V. (2014). Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel, *Université de Sherbrooke*.
- [22] Bourema M, «Etude des caractéristiques d'un BHP à base de déchet de brique rouge à l'état frais et durci», *Master en génie civil, Filière : Matériaux de construction: Université du 20 Aout 1955 skikda*, 11 Juin 2015, p 68-69.
- [23] EN NF 12620 : AFNOR 12620, *Granulats pour béton*, Juin 2008.
- [24] L. Tan, F. Yu, X. Chen, *Recycling of ceramic wastes as resources*, *China Ceram. Ind.* 18 (3) (2011) 21–23. W.
- [25] Juan-Valdés, Andrés, et al. "Mechanical and microstructural properties of recycled concretes mixed with ceramic recycled cement and secondary recycled aggregates. A viable option for future concrete" *Construction and Building Materials*, vol: 270, p121455, 2021.
- [26] Shakouri, M., Exstrom, C. L., Ramanathan, S., Suraneni, P., & Vaux, J. S. (2020). Pretreatment of corn stover ash to improve its effectiveness as a supplementary cementitious material in concrete. *Cement and Concrete Composites*, vol: 112, p 103658..
- [27] Gaofeng Chen, Shujun Li, Cheng Liu, Yasong Zhao, Huixia Wu, ZhaohengGuo, Jianming Gao, *Rheological behavior and early-age hydration performance of blended, cement pastes incorporating recycled brick powder and slag*, *Construction and Building Materials*, 436 (2024) 136925.
- [28] Dongyu Chen, Meizhu Chen Yongwei Wu, Yunlong Zhang, Xinkui Yang, Jianwei Zhang, Yuechao Zhao, *Development of an environmental foamed concrete incorporating recycled cement concrete powder with carbonation*, *Construction and Building Materials* 422 (2024), 135833.
- [29] Mohsen Ebrahimi, AbolfazlEslami, Iman Hajirasouliha, MoeinRamezanpour, KyprosPilakoutas, *Effect of ceramic waste powder as a binder replacement on the properties of cement and lime-based mortars*, *Construction and Building Materials* 379 (2023),131146..
- [30] Shaodan Hou, Ruihan Hu, Li Xu, Youchao Zhang, Zhiming Ma, *Understanding the chloride migration in recycled powder concrete: Effects of recycled powder type, replacement rate and substitution pattern*,

Construction and Building Materials 436 (2024) 136825.

- [31] Xuyong Chen, Di Zhang, Shukai Cheng, Xiong Xu, Cheng Zhao, Xiangqing Wang, Qiaoyun Wu, Xixuan Bai, Sustainable reuse of ceramic waste powder as a supplementary cementitious material in recycled aggregate concrete.; Mechanical properties, durability and microstructure assessment, *Journal of Building Engineering* 52 (2022) 104418.
- [32] Le Li, Wenfeng Liu, Qinxi You, Mengcheng Chen, Qiang Zeng, Chunsheng Zhou, Mingzhong Zhang, Relationships between microstructure and transport properties in mortar containing recycled ceramic powder, *Journal of Cleaner Production* 263 (2020) 121384.
- [33] NF EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques, 1995, NORME EUROPEENNE.
- [34] Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats ; 2012-05.
- [35] EN 933-8 : Tests for geometrical properties of aggregates - Part 8: Assessment of fines - Sand equivalent test, 2012.
- [36] F DE LARRARD, *concrète mixture –proportioning- A scientific Approach-londres*, 1999.
- [37] NF EN 1097-3, Essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 3 : Méthodes pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter-granulaire, 2012, Normes Europeennes.
- [38] EN 1097-6 : Normes Françaises et européennes, Essais pour déterminer les caractéristique mécanique et physique des granulats-partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.
- [39] NA231 : «Méthodes d'essais des ciments, Détermination de la finesse»2ème édition /2006.
- [40] EN 1008 : Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton, juillet 2003, Norme Européenne.
- [41] NF EN 1015-3 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – Partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais (à la table à secousses), 1999, Norme Européenne.
- [42] NF P 15– 403 : «Sable normal et mortier normal » AFNOR – Paris – 1996..
- [43] NF EN 196-3 : Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité, 2009, Norme Européenne.
- [44] Dreux. G.. « Nouveau guide du béton et ses constituants ». Eyrolles, Paris 1998, 409p..
- [45] EN 12350-6 : 2009 ; Testing fresh concrete - Part 6: Density, 2009.
- [46] EN 196-9 : Méthodes d'essais des ciments - Partie 9 : chaleur d'hydratation - Méthode semi-

adiabatique, 2003, Norme Européenne.

[47] NBN B 15-215 : Essais sur béton durci - Absorption d'eau par immersion, 2015.

[48] BS EN 13057 : Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of resistance of capillary absorption, 2002.

[49] NF EN 12390-16, Essais pour béton durci - Partie 16 : détermination du retrait du béton, 2019, Norme Européenne.

[50] Eurocode 2 : Design of concrete structures Part 1: General rules and rules for Buildings DD ENV 1992-1-1:1992.

[51] ASTM C 1697-21 : Standard Specification for Blended Supplementary Cementitious Materials, West Conshohocken, PA.

[52] Evangelista, L., & de Brito, J. (2014). Concrete with fine recycled aggregates: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(2), 129–172.

[53] NF EN 196-1- Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques, 1995, NORME EUROPEENNE..