

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Boudiaf - M'Sila

Faculté De Technologie

Département De Génie Civil

N° :.....



DOMAINE : Technologie

FILIERE : Génie civil

OPTION : Matériaux

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : LAMARA FOUAD

Intitulé

*Réutilisation des céramiques comme granulats
dans le béton ordinaire
-Etude bibliographique-*

Soutenu devant le jury composé de

RAHMOUNI Zine El Abidine
CHIKOUCHE Mohamad Aziz
BOUALLEG Saida

Université de M'sila
Université de M'sila
Université de M'sila

Président
Rapporteur
Examineur

Année Universitaire : 2022 /2023

Remerciements

Au nom d'Allah clément et miséricordieux

Je ne remercierai jamais assez Allah pour m'avoir donné la force et la patience afin de conclure ce travail.

Le messager de dieu, Mohammed (que la paix et la bénédiction d'Allah soient sur lui) à dit : " Celui qui ne remercie pas les gens n'a pas remercié Allah"

*Je remercie mon encadreur **Dr. Chikouche Mohamed Aziz** pour l'effort qu'il a fait avec moi et le temps qu'il m'a accordé.*

Merci, appréciation et respect à vous Monsieur

Des remerciements sont également adressés à tous les professeurs et aux personnels du Département de génie civil.

Dédicace

A ma chère Mère, que Dieu la bénisse et prolonge sa vie.

Au grand général, mon cher père, que Dieu le protège.

Au bouquet de roses lumineuses de lumières étincelantes,

Ma femme hanane et mes enfants Enas Ihsan et Fatih, que Dieu les protège.

A toute ma grande famille, mes frères lamri et lotfi, et mes soeurs

Naima Fatma et Samia

A mon estimé collègue Bouaziz Abd elSamad

A tous ceux qui connaissent Lamara Fouad, à ceux qui sont heureux de mon bonheur et tristes de ma tristesse A tous ceux-ci je dédie le fruit de ce travail.

lamara fouad

ملخص:

تتكون الخرسانة من الاسمنت، الماء، الحصى والرمل. تعتبر هذه المادة ملوثة للبيئة، فالإسمنت يتم تصنيعه بالصلصال والكلس، أما الحصى والرمل فيستغرق تكوينها ملايين السنين. لهذا تقوم مصانع الاسمنت بإضافة بعض المواد التي تعتبر نفايات لمواد مصنعة للإسمنت من أجل تقليل التأثير على البيئة كخبث الأفران، الرماد المتطاير وغبار السيليكات. بالنسبة للحصى والرمل فاستعمال المواد الطبيعية يؤثر يوما بعد يوم على البيئة، لذلك يوصي بعض الباحثين باستعمال النفايات المدورة بنسب متفاوتة كالخرسانة المدورة والإطارات المستعملة.

في هذه الدراسة البيبليوغرافية تناولنا استعمال نفايات الخزف الصحي كحصى أو رمل وتأثيره على مختلف خصائص الخرسانة.

من أجل الوصول إلى الخاتمة العامة، قسمنا العمل إلى ثلاث فصول بالإضافة إلى مقدمة عامة. تناول الفصل الأول التعريف الخزف، طريقة تصنيعه وأنواعه، والفصل الثاني تحدث عن استعمال مختلف النفايات في الهندسة المدنية. الفصل الثالث تحدثنا فيه عن الدراسات التي تناولت استعمال نفايات الخزف الصحي كحصى ورمل في الخرسانة.

كلمات مفتاحية: الخرسانة، تدوير النفايات، الخزف الصحي، الحصى، الرمل.

Résumé :

Le béton est composé de ciment, d'eau, des granulats et du sable. Ce matériau est polluant, car le ciment est fabriqué par de l'argile et du calcaire, et les granulats et le sable mettent des millions d'année pour se former. Pour cela les cimenteries ajoutent des sous-produits d'autre domaine afin de réduire l'impact environnemental comme le laitier de hauts fourneaux, la cendre volante et la fumée de silice. L'utilisation des matériaux naturelles affecte l'environnement, pour cela les chercheurs recommandent l'utilisation des déchets comme le béton recyclé ou les pneus usagés.

Dans ce projet de fin d'étude nous avons recueillis différents travaux exposant l'utilisation des déchets céramique de type sanitaire et leurs effets sur les propriétés du béton.

Notre travail est divisé en trois chapitres plus une introduction et une conclusion générale. Le premier chapitre traite la fabrication des céramiques et leurs types et le deuxième chapitre aborde les différents déchets utilisés dans le génie civil. Le troisième chapitre retrace les différentes études menées sur la valorisation des céramiques sanitaires comme granulat ou sable dans les bétons.

Mots clés : Béton, valorisation des déchets, céramique sanitaire, granulats, sables.

Abstract:

Concrete is made up of cement, water, aggregates, and sand. This material is polluting, because cement is made from clay and limestone, and aggregates and sand take millions of years to form. For this, cement plants add by-products from other fields to reduce the environmental impact, like blast furnace slag, fly ash, and silica fume. The use of natural materials affects the environment, for this, the researchers recommend the use of waste like recycled concrete or used tires.

In this project, we have collected various works exposing the use of sanitary ceramics wastes and their effects on the properties of concrete.

Our work is divided into three chapters plus an introduction and a general conclusion. The first chapter deals with the manufacture of ceramics and their types, and the second chapter deals with the different wastes used in civil engineering. The third chapter traces the various studies carried out on the valuation of sanitary ceramics as aggregate or sand in concrete.

Keywords: Concrete, waste recycling, sanitary ceramics, aggregates, sands.

Sommaire

Remerciements	I
Dédicace	II
:ملخص.....	III
Résumé :	IV
Abstract:	V
Sommaire.....	VI
Liste des Figures.....	IX
Liste des Tableaux	XII
Introduction générale.....	1

Chapitre I: La céramique

1-Définition	4
2-Historique.....	4
2-1-Les poteries	4
2-2-Les faïences	5
2-3-Les porcelaines	5
3-Processus de fabrication.....	6
3-1-Matières premières	6
3.2. Description générale du procédé de fabrication.....	7
3.2.1. Stockage et transport des matières premières	7
3.2.2. Préparation des matières premières.....	8
3.2.3. Mélange des composants.....	8
3.2.4. Façonnage/formage des produits	8
3.2.5. Séchage des produits céramiques.....	9
3.2.6. Traitement de surface et décoration des produits céramiques	10
3.2.7. Cuisson.....	11
3.2.8. Traitements ultérieurs (finition des produits).....	12

3.2.9. Ajout de matériaux auxiliaires	12
3.2.10. Conditionnement et stockage	12
4. Types de céramique.....	12
4.1. Les grès.....	12
4.2 La terre cuite.....	13
4.3 La porcelaine	14
4.4. La majolique.....	14
4.5. La brique.....	15
4.6. La tuile.....	16
5. Caractéristiques des céramiques	16
5.1. Dureté et fragilité	17
5.2. Fragilité et ductilité	18
5.3. Frottement, usure et abrasion	19
5.4. L'élasticité	19
6. Quelques données économiques sur le marché des céramiques	19
6.1. La céramique en Algérie	21

Chapitre II: Utilisation des déchets dans le génie civil

1- Introduction.....	23
2- Laitier de haut fourneau	23
2-1- Définition.....	23
2-2-Historique	24
2-3- Caractéristiques des bétons aux laitiers.....	24
3-Fumée de silice	27
3-1-Définition.....	27
3-2-Historique	28
3-3- Caractéristiques des bétons au fumée de silice	28
4-Cendre volante	30
4-1-Définition.....	30
4-2-Historique	31

4-3- Caractéristiques des bétons aux cendres volantes	31
5-Déchets de verre.....	34
5-1-Définition.....	34
5-2-Historique	34
5-3- Caractéristiques des bétons au déchets de verre.....	35
6-Pneus usagés	38
6-1-Définition.....	38
II-6-2- Caractéristiques des bétons à pneus usagés.....	39
7- La boue de papeterie	41
7-1-Définition.....	41
7-2- Caractéristiques des bétons à boue de papeterie	41
8-La cendre de bagasse	44
8-1-Définition.....	44
8-2- Caractéristiques des bétons à cendre bagasse.....	45

Chapitre III: Valorisation des céramiques dans les bétons

III.1. Effet des granulats en céramique sanitaire.....	48
III.2. Effet des sables en céramique sanitaire.....	58
III.3. Effet des poudres en céramique sanitaire.....	66
Conclusion générale	70
Référence bibliographie	73

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I. 1: Microphotographie en MEB d'une céramique.	4
Figure I. 2: Plat tripode, de dynastie Tang en terre cuite à glaçure trois couleurs « sancai ».	5
Figure I. 3: Différents espèces minérales : Kaolinite, monmorillonite, halloysite (de gauche à droite).....	6
Figure I. 4: Extraction de la matière première. Figure I. 5: Convoyeur à bande.	7
Figure I. 6: Façonnage de la brique perforés Figure I. 7: Façonnage de tuiles	9
Figure I. 8: Séchage industriel pour céramique.....	10
Figure I. 9: Emaillage de céramiques.....	11
Figure I. 10: Les grés comme revêtement de sols.	13
Figure I. 11: Pavé en terre cuite	14
Figure I. 12: Creuset de laboratoire en porcelaine	14
Figure I. 13: La majolique.....	15
Figure I. 14: Les différentes formes de briques.....	15
Figure I. 15: Forme de tuile espagnole (en haut) et italienne (en bas).	16
Figure I. 16: Répartition des chiffres d'affaires des céramiques en Europe par secteur en 2008. .	20

Chapitre II

Figure II. 1: Résistance à la compression étudiés selon Gupta.	27
Figure II. 2: Résistance à la compression étudiés selon Gupta.	29
Figure II. 3: Comportement rhéologique des bétons étudiés selon Wu et al.....	30
Figure II. 4: Schéma de fonctionnement des chaudières à lit fluidisé circulant.....	31
Figure II. 5: Résistance à la compression série A (à gauche) série B (à droite) selon Nath & Sarker.....	32
Figure II. 6: Résistance à l'abrasion des bétons selon Siddique.	33
Figure II. 7: Résistance à la compression (à gauche) à l'abrasion (à droite) des bétons selon Siddique & Khatib.	34
Figure II. 8: Résistance à la compression des bétons de verre selon Shao et al.....	35
Figure II. 9: Affaissement des bétons en cas de remplacement (à gauche) et addition (à droite) du ciment par la poudre de verre selon Aliabdo et al.	36
Figure II. 10: Résistance à la compression des bétons en cas de remplacement (à gauche) et addition (à droite) du ciment par la poudre de verre selon Aliabdo et al.	37

Figure II. 11: Variation de la résistance à la compression des bétons de verre selon Topçu & Canbaz.	38
Figure II. 12: Variation de la résistance à la compression des bétons de verre selon Gautam et al.	38
Figure II. 13: Résistance à la compression des bétons caoutchouteux selon Eldin & Senouci.	39
Figure II. 14: Courbe contrainte-déformation du béton normal (à gauche) et caoutchouteux (à droite) selon Eldin & Senouci.	40
Figure II. 15: Courbe contrainte-déformation des bétons VS (à gauche) et CS (à droite) selon Moustafa & ElGawady.....	41
Figure II. 16: Affaissement (à gauche) et résistance à la compression (à droite) des bétons à cendre de boue de papeterie selon Ahmad et al.....	43
Figure II. 17: Affaissement des bétons et pâtes avec poudre de boue de papeterie selon Wong et al.....	43
Figure II. 18: A gauche pâte avec 50 % de PSA. A droite gouttelette d'eau (1) placée sur PSA, outtelette (2) recouverte d'un film mince de PSA selon Wong et al.	44
Figure II. 19: La fibre de bagasse.	44
Figure II. 20: Résistances à la compression des bétons à SCBA selon Jha et al.	45
Figure II. 21: Etude de la pouzzolanité des SCBA selon Ribeiro & Morelli.	46

Chapitre III

Figure III. 1: Affaissement des bétons selon Rashid et al.	48
Figure III. 2: Résistance à la compression des bétons selon Rashid et al.....	49
Figure III. 3: Résistance à la compression et à la traction des bétons à 28 jours selon Medina et al.	50
Figure III. 4: Rapport de résistance à la compression des bétons à 28 jours selon Medina et al.	50
Figure III. 5: Résistance à la compression, flexion et module d'élasticité dynamique des bétons selon Canbaz.	51
Figure III. 6: Image en microscope électronique au milieu et DRX des faces au alentours selon Medina et al.....	53
Figure III. 7: Microscopie électronique à balayage et étude à rayon X de (CSH) selon Medina et al.	54

Figure III. 8: Micrographie de (CH) autour des granulats naturels (1) et granulat céramique recyclé (2) selon Medina et al.....	54
Figure III. 9: Micrographie de (AFt). (a) Béton de référence (b) Béton céramique recyclé selon Medina et al.....	55
Figure III. 10: Dégâts subit par l'ITZ: a) granulats/pâte naturel ; b) granulat céramique interne /pâte ; c) granulat céramique externe /pâte selon Medina et al.	56
Figure III. 11: Schéma de l'ITZ lors d'un chauffage des bétons avec granulat céramique selon Zegardło et al.....	57
Figure III. 12: Profondeur de pénétration et taux de carbonatation des bétons à 90 jours selon Medina et al.....	58
Figure III. 13: Résistance à la compression des bétons à 28 jours selon Alves et al.....	59
Figure III. 14: Affaissement des bétons selon Canbaz.	59
Figure III. 15: Masse volumique et UPV des bétons selon Canbaz.	60
Figure III. 16: Résistance à la compression des bétons étudiés par Pacheco-Torgal & Jalali.	60
Figure III. 17: Perméabilité à l'oxygène et l'eau à gauche ; Diffusion des ions chlorures à droite des bétons étudiés par Pacheco-Torgal & Jalali.....	61
Figure III. 18: Résistance aux cycles gel-dégel des mortiers étudiés par Klimak et al.	62
Figure III. 19: Répartition des microfissures à l'interface sable/pâte dans les échantillons des mortiers étudiés par Klimak et al.	63
Figure III. 20: Température des matériaux lors du refroidissement (première étape) étudiés par Ogrodnik et al.	64
Figure III. 21: Température pendant la deuxième étape étudiée par Ogrodnik et al.	64
Figure III. 22: La perte de masse en fonction du temps d'immersion en (5%HCl) à gauche et (5%H ₂ SO ₄) à droite selon Abadou et al.....	65
Figure III. 23: Résistance à la compression des bétons de classe M20 selon Atkuri & Rao.	66
Figure III. 24: Résistance à la compression des bétons de classe M40 selon Atkuri & Rao.	66
Figure III. 25: Résistance à la flexion des mortiers selon Jackiewicz-Rek et al.	67
Figure III. 26: Résistance à la compression des mortiers selon Jackiewicz-Rek et al.	67

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1: Exportations mondiales de céramique sanitaires (en tonnes), 2010-2021.	21
Tableau I. 2: Résistance à la compression des bétons étudiés (exemple 350 Kg/m ³) par Bilim et al.....	25

Chapitre II

Tableau II. 1: Résistance à la compression des mortiers étudiés selon Yun et al.	26
Tableau II. 2: Résistance à la compression des bétons étudiés par Mazloom et al.	29
Tableau II. 3: Affaissement des bétons étudiés par Nath & Sarker.....	32
Tableau II. 4: Résistance à la compression des bétons étudiés par Siddique.	33
Tableau II. 5: Consommation de l'hydroxyde de calcium par les boues de papeterie selon Pera & Amrouz.....	42
Tableau II. 6: Densité et résistance des bétons avec poudre de boue de papeterie selon Wong et al.....	44

Chapitre III

Tableau III. 1: Consistance et masse volumique des bétons élaborés par Medina et al.....	49
Tableau III. 2: Résistance à la compression des bétons étudiés par Ghos et al.....	51
Tableau III. 3: Coefficient de la perméabilité à l'oxygène selon Medina et al.	57
Tableau III. 4: Rapport E/C utilisés par Alves et al.....	58
Tableau III. 5: Masse volumique et résistances des bétons étudiés par Pitarch et al.	61
Tableau III. 6: Résistance à la compression des bétons selon Kumar & Reddy	68



Introduction générale

Introduction générale

Au début de la préhistoire, les hommes étaient nomades. Ils se déplaçaient en fonction des saisons, des migrations du gibier, ils suivirent les cours d'eau, etc. Il s'abrite à l'entrée des grottes ou habite des huttes faites de branchages, ossements et peaux. L'être humain cherchait et cherche toujours des abris sûrs et durables.

Avec l'évolution de la technicité et surtout la concentration démographique dans les villes. Le premier liant cimentaire est produit en Italie vers le deuxième siècle avant J.C. La pouzzolane a été utilisée pour lier les pierres entre elles. Utiliser comme sable, la pouzzolane réagit chimiquement avec la chaux et l'eau pour se solidifier en une masse rocheuse, même lorsqu'il est complètement submergé.

Lors de la conception des mélanges de liants, les Romains accordés beaucoup d'attention au broyage des mélanges des matières et la granulométrie des granulats avec une proportion importante de fines.

Après le déclin de l'Empire romain, l'amélioration des liants chaux-pouzzolane s'est ajournée. Cependant, les liants ont été progressivement remplacés par des liants à base de ciment Portland au cours du 19^{ème} et début du 20^{ème} siècle. A base d'argile et de calcaire porté à haute température, ce liant est devenu aujourd'hui, la base de la civilisation.

Mélangé à de l'eau et des granulats, le ciment devient du béton. Le béton commence par un simple mélange sec, puis devient un matériau flexible capable de se former dans n'importe quel moule ou forme, et une fois qui redevient sec, il est comme de la roche. Ce matériau est aujourd'hui la base du développement de la civilisation.

Comme tous les produits cimentaires qui sont toujours pointé du doigt lors de la consultation des rapports de pollution, le béton ne fait pas l'exception. Le ciment est un produit qui fait d'énormes dégâts géologiques pour extraire de l'argile et du calcaire. Les granulats sont extraits des carrières, des lits de rivières, des fonds marins, etc. Le béton est donc doublement polluant et même triplement polluant car on ne peut pas se permettre de gaspiller l'eau.

Afin de restreindre ces atteintes environnementales, l'industrie cimentaire utilise des ajouts cimentaires pour réduire le rapport clinker/ciment. Les adjuvants peuvent amoindrir la quantité d'eau utiliser pour l'hydratation du ciment sans que les caractéristiques du béton soit atteintes. Dans le cas des granulats divers chercheurs et scientifiques suggèrent l'utilisation des graviers de démolition recyclés.

Objectif du travail

Dans le secteur des céramiques, les déchets sont trop encombrants pour les stockés. Leurs réutilisations dans le même secteur est presque impossible. Suite à cet obstacle diverse publications évoque l'utilisation des sanitaires en céramique comme granulats, sables et même comme ajout cimentaire.

Ces publications seront étudiées et analysées afin de comprendre les différents mécanismes qui gère les mortiers ou les bétons à granulats issues des déchets en céramique sanitaire.

Structure du travail

Pour mettre la lumière sur le sujet, on a partagé la thèse en trois chapitres, ainsi qu'une introduction et une conclusion générale

- Le premier chapitre, expose le processus de fabrication des céramiques est leurs types, ainsi que les différentes caractéristiques intrinsèques comme la dureté et la fragilité.
- Le deuxième chapitre, récite les différents déchets valorisés dans le béton, comme le laitier, la fumée de silice, la cendre volante, etc.
- Le troisième chapitre, est une revue bibliographique enveloppant les différentes publications sur l'utilisation des déchets sanitaires de type céramique comme granulats dans les bétons.



Chapitre I

La céramique

1-Définition

Au sens étymologique, le mot céramique (du grec *keramikos* : « terrecuite », *keramos* : « argile ») désigne un matériau obtenu par le traitement thermique de certains minéraux naturels, comme les argiles.

En raison de l'apparition de nouvelles familles de matériaux synthétiques, le terme « céramique » s'applique désormais de façon plus large aux solides inorganiques à liaisons iono-covalentes préparés par des techniques similaires. D'un point de vue chimique, les céramiques sont principalement des oxydes (notamment des aluminosilicates pour les céramiques traditionnelles), des nitrures et des carbures. [1]

Les céramiques sont des matériaux inorganiques, composés d'oxydes, de carbures, de nitrures et de borures. A la différence des verres les céramiques, en tous cas dans les matériaux les plus anciens, sont constituées de 2 phases distinctes : une phase vitreuse, la matrice (désordonnée) et une phase cristalline dispersée (ordonnée) comme l'explique la figure I-1. [2]

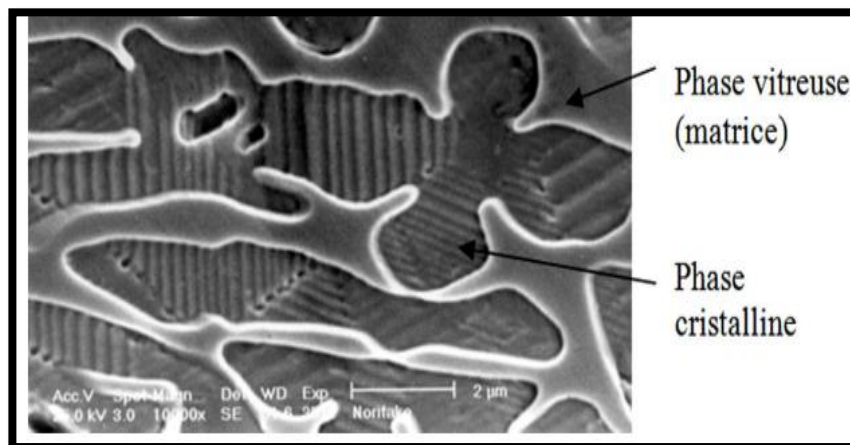


Figure I. 1: Microphotographie en MEB d'une céramique.

2-Historique

Aucune date précise de l'apparition de la céramique ne peut être donnée, mais on la situe généralement vers le milieu du mésolithique entre 10000 et 5000 avant J. C.

2-1-Les poteries

Les découvertes archéologiques ont montré la présence de poteries dans toutes les civilisations, de l'Amérique précolombienne à l'Orient, ce qui s'explique facilement, car l'argile qui les constitue se rencontre à peu près partout dans le monde.

Les Grecs, qui savaient purifier l'argile en séparant les impuretés telles que le sable par lavage à l'eau, ont pu fabriquer des poteries à pâte fine dont la qualité de surface est admirable. Ces poteries semblent avoir été cuites non plus dans une excavation faite dans le

sol, mais dans des fours à parois construites tels qu'il est possible d'en reconstituer dans une poterie mycénienne.

2-2-Les faïences

La date de l'invention des faïences, céramiques à tesson poreux recouvertes d'une glaçure, est inconnue. Dans l'ordre chronologique, Brongniart indique la Chine, la Perse et l'Arménie, l'Espagne puis les Arabes (XIIe siècle), l'Italie, la France (Bernard Palissy au XVIe siècle), l'Allemagne et l'Angleterre.

2-3-Les porcelaines

Ce type de céramique est connue depuis la dynastie Tang (618 à 907 de notre ère) comme le témoigne la figure I-2. La beauté de la matière et la forte demande incitent les Européens à fabriquer leur propre porcelaine. Parmi les nombreuses tentatives, on peut citer celles de Francesco 1er de Médicis, vers 1570 et celles de Louis Poterat, faïencier renommé de Rouen, dans le dernier quart du XVIIe siècle ; les porcelaines obtenues ne contiennent pas de kaolin, mais du verre ; ce sont des « pâtes tendres » de faible dureté. En 1695 s'ouvre la première manufacture de porcelaine tendre, celle de Saint-Cloud, origine du développement de l'industrie de la porcelaine en Ile de France.



**Figure I. 2: Plat tripode, de dynastie Tang en terre cuite à glaçure trois couleurs
« sancai ».**

Cependant, partout en Europe, princes et alchimistes cherchent à percer le secret de la composition de la porcelaine chinoise et, en 1709, Frédéric Böttger, alchimiste qui n'a pas su fabriquer de l'or pour le prince de Saxe, mais lui a présenté la première porcelaine dure européenne. Dans sa composition entre le fameux kaolin qui est tout simplement la matière blanche dont son barbier a l'habitude de lui saupoudrer la perruque. Le prince crée alors la manufacture de Meissen et parvient à garder le secret et le monopole de la fabrication de cette porcelaine pendant plus de cinquante ans.

3-Processus de fabrication

3-1-Matières premières

L'industrie céramique emploie des matières extrêmement variées pour s'adapter à la diversité de sa gamme de produits. Elle utilise des matières naturelles et des matières synthétiques. Les formules (ou pâtes) des céramiques à base d'argile peuvent être constituées d'une seule argile ou de plusieurs, mélangées avec des modificateurs minéraux, dits « non plastiques », tels que la poudre de quartz et le feldspath. Les minéraux argileux ordinaires (dits « argiles plastiques ») sont des silicates d'aluminium hydratés qui proviennent de l'érosion des roches. Il existe plusieurs espèces minérales portant le nom de minéraux argileux, les plus importantes étant la kaolinite, la montmorillonite, et l'halloysite. (Figure I-3)



Figure I. 3: Différents espèces minérales : Kaolinite, monmorillonite, halloysite (de gauche à droite).

Les argiles ou matières argilifères (argiles sédimentaires, argile schisteuse, argile limoneuse, marne) servent principalement à la fabrication des briques, des tuiles et des tuyaux en grès. On peut leur ajouter des additifs organiques (sciure de bois, substances à base de liant-papier, polystyrène formé) ou des agents auxiliaires inorganiques, pour obtenir un volume poreux plus important.

Dans l'industrie de la brique de parement ou de la tuile, on peut ajouter des oxydes métalliques pour obtenir la couleur souhaitée et/ou pour améliorer la porosité du produit fini. Ces additifs peuvent être ajoutés soit juste avant le façonnage, soit lors de la préparation des matières premières, sous forme solide ou liquide.

Les produits réfractaires sont constitués d'argile, de chamotte et de certaines roches naturelles telles que le quartzite, la dolomite, la bauxite et la magnésite, mais également des matières synthétiques susmentionnées. Afin de produire des masses compressibles, on ajoute des liants et des granulats aux matières premières broyées.

L'industrie de l'argile expansée utilise des argiles ayant une capacité de dilatation spécifique. Les additifs (p. ex. les fondants, les auxiliaires de dilatation et les agents de démoulage) sont utilisés pour favoriser la dilatation.

Les produits manufacturés par l'industrie des carreaux pour sols et murs, de la céramique domestique et des appareils sanitaires sont principalement constitués de silicates d'aluminium et les minéraux argileux servent de matières premières plastiques. En revanche, les céramiques techniques et les abrasifs inorganiques ne contiennent souvent qu'une faible quantité d'argile, voire pas du tout dans le cas des céramiques techniques

Outre les matières premières et agents auxiliaires susmentionnés, il faut également d'autres agents auxiliaires, auxiliaires de cuisson, combustibles et agents de sorption pour fabriquer des céramiques.

3.2. Description générale du procédé de fabrication [3]

Le procédé global de fabrication d'un produit céramique est relativement uniforme, en dehors du fait que la fabrication des carreaux pour sols et murs, de la vaisselle et des objets décoratifs (céramiques domestiques), des appareils sanitaires et des céramiques techniques passe fréquemment par un procédé de cuisson en plusieurs étapes.

En général, les matières premières sont mélangées et coulées, pressées ou extrudées pour prendre forme. On emploie régulièrement de l'eau pour bien les malaxer et les façonner. Lors de la cuisson dans le four, on obtient une structure céramique irréversible pour le produit. Il faut donc un gradient de température extrêmement précis pendant la cuisson, pour garantir que les produits subissent le bon traitement. Il faut ensuite un refroidissement contrôlé, afin que les produits libèrent leur chaleur progressivement et conservent leur structure céramique. Les produits sont ensuite emballés et stockés pour livraison.

3.2.1. Stockage et transport des matières premières

L'extraction de l'argile et matières argileuses (Figure I-4), du feldspath, du quartz et de la plupart des autres matières s'opère généralement dans des mines ou des carrières. L'acheminement jusqu'à l'usine de fabrication se fait principalement par camion, mais également par chemin de fer et, il peut même se faire par convoyeur à bande (Figure I-5).



Figure I. 4: Extraction de la matière première.



Figure I. 5: Convoyeur à bande.

En fonction de leurs caractéristiques et de l'étape de transformation, les matières premières sont stockées dans des cases de stockage à ciel ouvert, des entrepôts divisés en caissons, des silos d'homogénéisation, etc.

Certaines matières sont également acheminées sous forme de liquide ou de suspensions aqueuses et sont donc stockées dans des cuves ou autres récipients. Le matériel de transport au sein de l'usine est choisi selon les caractéristiques de la matière à acheminer, telles que sa granularité, sa résistance à l'attrition et son aptitude à l'écoulement, sa température, son débit et l'espace donné.

3.2.2. Préparation des matières premières

On procède généralement à une première fragmentation et à une homogénéisation préliminaire lors de l'opération d'extraction. Afin de satisfaire aux exigences techniques très strictes des produits céramiques actuels, il faut une préparation supplémentaire, tels qu'un pré-séchage, une maturation, un criblage ou une calcination, etc.

3.2.3. Mélange des composants

La durée, l'intensité et l'ordre du mélange influent de façon importante sur les propriétés du mélange et donc sur le produit final. Les matières premières préparées, dans des proportions contrôlées, doivent être malaxées et homogénéisées pour obtenir l'uniformité physicochimique requise.

Le mélange peut varier entre des opérations continues à grande échelle et un mélange discontinu et étroitement contrôlé à petite échelle. Le dosage peut se faire sur une base volumétrique ou par poids.

Le façonnage céramique nécessite des matières premières ayant une teneur donnée en eau ou en liant, et les additifs mineurs tels que les pigments doivent être dosés précisément puis répartis uniformément dans le mélange.

A l'heure actuelle, le dosage des composants du mélange est souvent automatisé, la commande par ordinateur des mécanismes d'alimentation permettant de modifier rapidement la « composition » du mélange.

3.2.4. Façonnage/formage des produits

Les produits céramiques traditionnels ont été façonnés à partir de matières premières à l'état plastique et cette opération, pendant des millénaires, a été manuelle.

A l'heure actuelle, il existe une demande pour des spécifications techniques de plus en plus strictes englobant des propriétés telles que la tolérance dimensionnelle, la densité, la résistance, la durabilité, etc. Dans de nombreux cas, les qualités esthétiques sont de première importance.

La méthode utilisée pour façonner les produits peut influencer de manière considérable sur les propriétés définitives de ceux-ci, et la gamme des techniques de façonnage s'est considérablement développée entre les différents secteurs de l'industrie céramique (Figure I-6 et Figure I-7).



Figure I. 6 : Façonnage de la brique perforés



Figure I. 7 : Façonnage de tuiles

3.2.5. Séchage des produits céramiques

La plupart des articles en argile séchaient de façon, à l'air libre et à température ambiante. Dans l'industrie de la brique et de la tuile, on employait de simples claies de séchage qui permettaient de faire durcir des rangées superposées d'articles sous une simple couverture de bois léger qui les protégeait contre la pluie.

Dans l'industrie céramique moderne, il est nécessaire d'optimiser le séchage en termes de vitesse, de rendement thermique et de réduction des déchets (Figure I-8). A l'exception des procédés de séchage lents et contrôlés, il faut maintenir un contrôle strict des vitesses de chauffage, de la circulation de l'air, de la température et de l'humidité.

Les matières premières céramiques ont des sensibilités diverses au séchage, mais la plupart bénéficient d'une période d'échauffement initial dans des conditions de forte humidité, suivie de l'étape principale de séchage où les produits rencontrent un air plus chaud et plus sec.

Les différentes formes de séchoirs ont évolué pour satisfaire aux besoins des différents secteurs de l'industrie, dans lesquels la nature et les dimensions des composants céramiques sont immensément variées.



Figure I. 8: Séchage industriel pour céramique.

3.2.6. Traitement de surface et décoration des produits céramiques

On peut texturer la surface d'un produit en argile pour des raisons fonctionnelles, par exemple pour obtenir une finition antidérapante sur les carreaux de sol. Un grand nombre de textures sont également appliquées aux produits en argile pour des raisons esthétiques.

Les briques à pâte molle acquièrent une agréable forme aléatoire « à plis » au fur et à mesure que la motte d'argile est jetée dans le moule, et le moulage manuel produit des finitions particulièrement appréciées. Les produits extrudés peuvent être texturés par raclage, en raclant la surface du boudin d'argile. Une autre technique consiste à extruder un boudin un peu trop gros, puis à le rogner au moyen de fils coupants pour obtenir la bonne hauteur et la bonne largeur.

Des rouleaux texturés peuvent donner diverses textures aux produits extrudés. Les briques pressées sont souvent assez dures à l'état cru et, une fois qu'elles sont assemblées sous forme de boudin continu sur un convoyeur à bande, on utilise des lames tournantes pour leur donner un aspect « rustique » ou pour texturer ces briques. On peut également les texturer au rouleau, souvent après les avoir préalablement vaporisées avec de l'eau pour en adoucir les surfaces.

Les briques à pâte molle reçoivent un revêtement de surface en sable. On peut obtenir toutes sortes de textures et de couleurs de cuisson en choisissant le sable selon des critères d'esthétique. Dans le cas des briques, ou des tuiles pressés ou extrudés, on peut appliquer du sable ou d'autres minéraux en granulats sur les surfaces de boutisses. On ajoute souvent des pigments au sable pour faire varier l'aspect esthétique de la finition.

L'émaillage (Figure I-9) est la technique la plus répandue dans la fabrication des carreaux pour sols et murs, des appareils sanitaires. On fait durcir le produit en céramique crue séché par une cuisson de biscuit puis, selon les composants d'émail appliqués, on le recouvre d'une couche vitreuse, lisse, transparente ou sombre.



Figure I. 9: Emaillage de céramiques.

L'engobage est employé principalement dans la fabrication des tuiles en argile et des carreaux céramiques pour sols et murs. Il s'applique généralement à l'issue du séchage et les produits sont engobés même à l'état cru ou cuit. Lors de l'engobage, on applique une couche de masse céramique à grain fin, non transparente, claire ou colorée sur la partie visible ou sur la totalité de la surface, par trempage ou par coulage.

La sérigraphie est l'une des techniques décoratives qu'on emploie pour les carreaux, en raison de la facilité de l'appliquer dans les lignes d'émaillage. Elle consiste à imprimer un motif donné au moyen d'un ou plusieurs écrans d'impression.

3.2.7. Cuisson

La cuisson est un processus clé de la fabrication des produits céramiques, car c'est d'elle que vont dépendre un certain nombre de propriétés importantes du produit fini, entre autres la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la stabilité dimensionnelle, la résistance à l'eau et aux produits chimiques, et la tenue au feu.

Lorsque les produits céramiques à base d'argile rentrent dans un four, l'humidité résiduelle est évacuée à des températures comprises entre 100 et 200 °C. L'eau enfermée à l'intérieur de la structure d'un minéral argileux se libère généralement à des températures comprises entre 500 et 650 °C, tandis que les carbonates comme la calcite et la dolomite se dissocient lors de la libération du dioxyde de carbone dans une plage de températures de 750 à 950 °C.

En ce qui concerne le développement des propriétés céramiques, les principales modifications sont la décomposition de la structure réticulée des minéraux argileux d'origine, suivie de la formation de nouveaux composés cristallins et de phases vitreuses. Cette vitrification commence généralement à environ 900 °C et se termine à environ 1050 °C ou à environ 1100 °C dans le cas des argiles plus réfractaires.

Les températures nécessaires à la cuisson sont atteintes principalement par des fours intermittents, continus, à rouleaux ou rotatifs, etc.

3.2.8. Traitements ultérieurs (finition des produits)

Des opérations d'usinage peuvent être conduites pour produire des produits céramiques dont la forme définitive ou la tolérance dimensionnelle ne peuvent s'obtenir techniquement ou de façon suffisamment précise lors des traitements primaires (notamment pour les formes ou blocs grand format).

Des opérations de meulage, perçage, sciage ou polissage, etc, doivent être menées afin de donner l'aspect final aux produits.

3.2.9. Ajout de matériaux auxiliaires

Les produits réfractaires présentent des valeurs de porosité extrêmement variées, et on a parfois recours à la pulvérisation ou au trempage des produits dans des solutions de silicone pour leur donner davantage d'imperméabilité et pour éviter le développement de substances organiques ou d'efflorescences. Cette technique s'emploie notamment pour les tuiles.

On introduit aussi des matériaux isolants, comme du polystyrène ou de la laine minérale, dans certains gros blocs d'argile creux, afin d'améliorer leurs propriétés d'isolation thermique.

3.2.10. Conditionnement et stockage

Les produits céramiques de forme régulière telles que les briques, les blocs, les tuyaux et les systèmes réfractaires sont liés sous forme de paquets de format standard qui sont ensuite souvent emballés dans du polystyrène et peuvent être palettisés. Les produits céramiques qui ont le plus de valeur, tels que la vaisselle de table et les objets décoratifs, exigent un examen et un tri rigoureux suivis d'un emballage de protection perfectionné. Les produits réfractaires non profilés, au contraire, sont généralement simplement pesés et ensachés puis palettisés. Pour le stockage, on utilise également des fûts métalliques.

Les carreaux céramiques sont - individuellement - assez fragiles, mais une fois emballés de façon serrée dans des cartons, ils se révèlent remarquablement robustes lors de la manutention et du transport. Le stockage des produits de terre cuite fabriqués à grande échelle se fait souvent en extérieur, mais les produits en sacs ou en cartons doivent être stockés en entrepôt, de même que certains produits réfractaires sensibles à l'humidité.

4. Types de céramique

4.1. Les grès

Un matériau céramique dur ressemblant à de la porcelaine avec une couleur différente, généralement grise ou brunâtre, est fabriqué à partir d'argile réfractaire mélangée à de la poterie broyée, des pierres et du sable brûlés à haute température et refroidis lentement. L'argile utilisée pour la fabrication du grès se compose d'environ 75% de silice et 25% d'alumine. L'oxyde de fer est ajouté pour donner de la couleur. [4]

Le mélange cuit à une température voisine de 1300 °C provoquent la vitrification de la pâte. C'est ce phénomène qui transmet au gré la résistance aux agents chimiques et aux intempéries. Le gré est un matériau dur, compact et solide.

Le gré est utilisé dans les revêtements routiers ainsi comme des carreaux de sol et carreaux muraux dans les cuisines (Figure I-10).



Figure I. 10: Les grés comme revêtement de sols.

4.2 La terre cuite

La terre cuite est un produit d'argile réfractaire. Il est utilisé dans les parties ornementales des maisons (Figure I-11). L'argile utilisée pour sa fabrication doit être de qualité supérieure et avoir suffisamment de matières ferreuses et alcalines. En faisant varier l'oxyde de fer dans l'argile, la couleur désirée peut être obtenue. L'argile est mélangée avec des verres en poudre, de la poterie et du sable broyé en poudre fine et malaxé plusieurs fois jusqu'à ce qu'il devienne uniforme et doux pour le moulage.

La terre cuite est imperméable, dure et bon marché. Lorsqu'il est correctement fabriqué, le matériau résiste bien aux intempéries et, grâce à sa surface émaillée, il peut être facilement nettoyé. Le produit est traité dans des fours spéciaux (four à moufle) entre 1100°C et 1200°C.

Elle utilisée comme des blocs creux pour la maçonnerie, des statuettes, comme enveloppe pour les colonnes et les poutres en acier. La terre cuite poreuse est utilisée pour l'isolation phonique.



Figure I. 11: Pavé en terre cuite

4.3 La porcelaine

Un article en céramique de haute qualité ayant une couleur blanche (Figure I-12), une absorption d'eau nulle et une surface émaillée qui peut être molle ou dure. La porcelaine se compose d'argile finement dispersée, de kaolin, de quartz et de feldspath, cuit à haute température et recouvert d'une glaçure colorée ou transparente. Le matériau d'émaillage est appliqué avant la cuisson. À des températures élevées, les particules de feldspath fusionnent et lient les autres constituants en une masse dure, dense et vitreuse.

La porcelaine est utilisée pour fabriquer des articles sanitaires, des conteneurs et des creusets, des chambres de réacteur et des isolateurs électriques.



Figure I. 12: Creuset de laboratoire en porcelaine

4.4. La majolique

Il s'agit de faïence d'origine italienne recouverte d'un émail blanc opaque, orné de couleur métallique (Figure I-13). Il est fabriqué à partir d'argiles à basse température auxquelles on ajoute jusqu'à 20 % de carbonate de calcium sous forme de craie. La majolique a une texture microporeuse.

Il est utilisé dans les portes, les encadrements de fenêtres et les carreaux de parement.



Figure I. 13: La majolique.

4.5. La brique

C'est l'un des plus anciens matériaux de construction, la brique, continue d'être le matériau de construction le plus populaire en raison de son bon marché, de sa durabilité et de sa facilité de manipulation et de travail.

Pour la préparation des briques, l'argile ou toute autre terre appropriée est moulée à la forme souhaitée (Figure I-14) après l'avoir soumise à plusieurs processus. L'argile utilisée pour la fabrication des briques est constituée principalement de silice et d'alumine mélangées dans une proportion telle que l'argile devient plastique lorsqu'on y ajoute de l'eau. Il se compose également de petites proportions de chaux, de fer, de manganèse, de soufre, etc.

Les briques d'argile sont utilisées pour construire des murs extérieurs et intérieurs, des cloisons, des piliers, des semelles et d'autres structures porteuses.

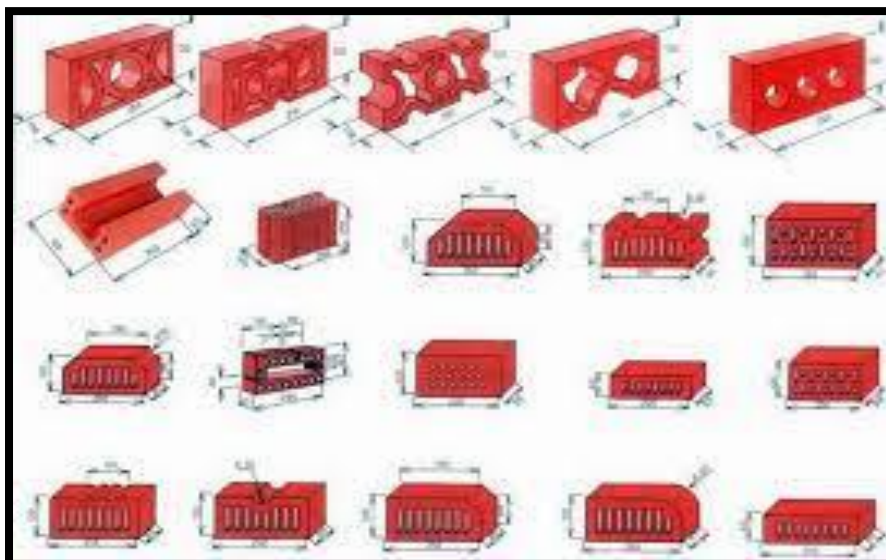


Figure I. 14: Les différentes formes de briques

4.6. La tuile

Les tuiles sont de fines dalles d'argiles (Figure I-15) à bas point de fusion utilisées à diverses fins dans les constructions d'ingénierie. Les tuiles de toiture, les dalles de sol, les dalles murales et les dalles de séparation en sont quelques exemples.

En raison de leur masse considérable, de la fabrication laborieuse, des problèmes de montage et de drainage et des frais de transport, les tuiles ont perdu de leur importance et sont recommandées localement.

Les tuiles sont fabriquées de la même manière que les briques, mais sont plus fines et plus légères et nécessitent donc plus de soin. L'argile doit être très plastique avec des mélanges maigres et des agents de fusion pour abaisser le point de fusion. Ceux-ci sont moulés dans des machines du type à vis sans fin ou à piston et sont généralement brûlés dans des fours continus.

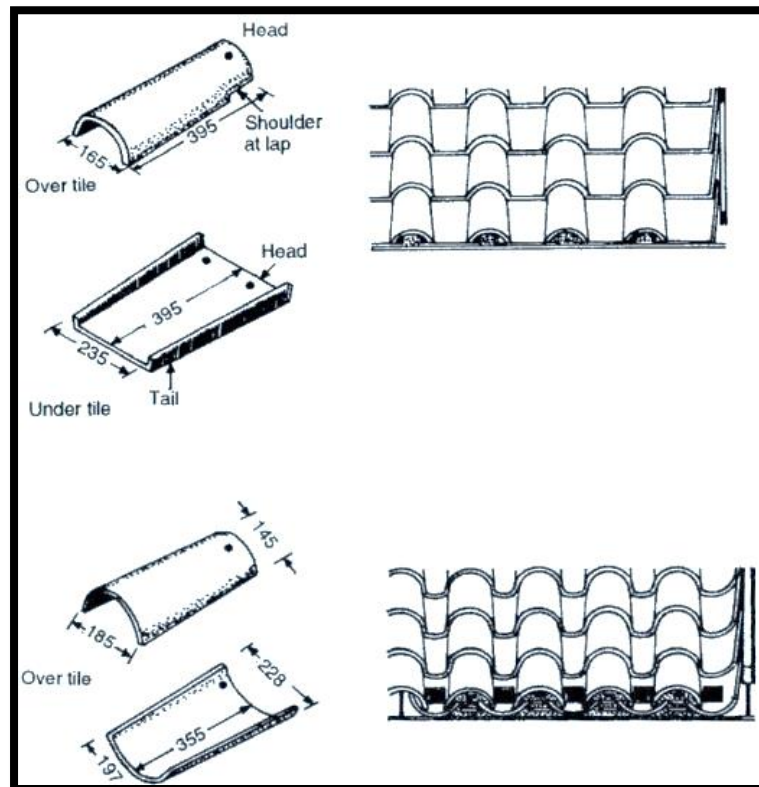


Figure I. 15: Forme de tuile espagnole (en haut) et italienne (en bas).

5. Caractéristiques des céramiques

Les principales propriétés physiques, thermiques et chimiques des céramiques sont dominées par la nature des liaisons interatomiques et leur structure cristalline. Les liaisons interatomiques des céramiques sont essentiellement des liaisons fortes, iono-covalentes. Dans certains matériaux (silicates, graphite), il existe cependant des liaisons faibles de type van der

Waals. Toutefois, une autre caractéristique, leur microstructure, joue également un rôle très important sur les propriétés des céramiques, en particulier les propriétés mécaniques.

Les liaisons ioniques et covalentes impliquent tous les électrons de valence des atomes en présence. Il n'y a donc pas d'électrons libres et les céramiques sont, en général, de mauvais conducteurs de la chaleur et de l'électricité. Elles sont fréquemment utilisées comme diélectriques et isolants thermiques.

Quand la bande d'énergie interdite (entre la bande de valence et la bande de conduction) est faible (de l'ordre de 1 eV), les céramiques peuvent être semi-conductrices (ex : SiC...); toutefois, des dopages peuvent grandement modifier cette bande d'énergie et être à l'origine de nouvelles propriétés électriques. Certains matériaux céramiques, de par leur structure cristalline, présentent des propriétés ferroélectriques (BaTiO_3), piezoélectriques (quartz, PZT), ferrimagnétiques (ferrites).

Les liaisons ioniques et covalentes étant des liaisons fortes et stables, les températures de fusion des céramiques sont donc généralement très élevées. C'est pour cette raison que certaines sont utilisées comme matériaux réfractaires ou comme conteneurs à hautes températures. Du fait également de la stabilité des liaisons chimiques, les céramiques possèdent une grande inertie chimique et sont donc peu sujettes à la dégradation par corrosion.

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, les céramiques sont caractérisées par l'absence de plasticité (elles ont un comportement fragile), une dureté et une rigidité élevées, une faible résistance à la traction et une bonne résistance à la compression. [5]

5.1. Dureté et fragilité

Les artisans primitifs savaient que si d'une part les matériaux avec lesquels ils travaillaient étaient cassants, il en résultait d'autre part des outils performants et durables : les tranchants des couteaux rivalisaient avec les meilleurs tranchants en acier actuels. Malgré leur propriété intrinsèque extraordinaire, la dureté et la fragilité contribuent à l'originalité et la spécificité des céramiques, mais sont aussi à l'origine de tous leurs défauts.

Les céramiques sont dures ($\text{HV} > 1\ 000$ Vickers), leur fabrication est donc très difficile et coûteuse, et leur faible ténacité ($K_{Ic} < 10 \text{ MPam}^{0.5}$) oblige à les manipuler avec délicatesse.

Récemment, des céramiques plus tenaces et/ou plus ductiles à des températures raisonnables (c'est-à-dire compatibles avec les outillages industriels de déformation plastique) ont été développées. La capacité de superplasticité a même été démontrée par des matériaux denses ayant une microstructure à grains fins. Par ailleurs, les procédés actuels permettent

d'obtenir des matériaux à microstructure homogène, contrôlée et donc reproductible (module de Weibull > 30).

5.2. Fragilité et ductilité

Pour les matériaux céramiques, le terme « fragilité » a deux significations : absence de plasticité et faible résistance aux chocs. La fracture se produit par clivage le long des plans cristallographiques définis par les matériaux cristallins (le plus souvent selon des plans compacts à faibles indices). Pour un agglomérat, la fracture est généralement trans-granulaire ou intergranulaire dans les matériaux à grains fins (taille de grain $< 1 \mu\text{m}$). La rupture fragile comporte donc deux étapes :

- production d'une fissure (ou d'un défaut : porosité, inclusion...);
- propagation d'une fissure (provenant du défaut le plus grave existant).

La température de transition fragile-ductile peut être considérée comme la température maximale de service ou comme la température de début de fluage rapide. D'un point de vue macroscopique, la ductilité se manifeste par une déviation du comportement élastique sur les courbes de charge P-U (charge-déplacement), traduisant l'apparition d'une déformation permanente.

Tous les matériaux possèdent une zone de transition fragile-ductile dans le plan $(du/dt, T)$, avec une température de transition (FDT (Fragile-Ductile Transition)), d'autant plus nette que le changement de comportement est brutal et d'autant plus rapide.

Dans le cas des céramiques à phase vitreuse intergranulaire (matériaux frittés avec additifs), la transition est douce et permet la température de transition vitreuse de la phase secondaire à une température limite inférieure ($T_g \approx 1000^\circ\text{C}$ pour les sialons). De plus, plus les grains sont fins, plus l'apparition du FDT (basse température) est précoce. Il y a enfin l'effet de taille, qui se traduit par la dépendance du FDT par rapport à la structure étudiée et traduit le temps qu'il faut à une zone molle confinée pour s'étendre de part et d'autre de la structure.

Le FDT peut être observé par des essais de relaxation conduits à différentes températures, par des essais à vitesse de déformation imposée en faisant varier la vitesse et la température, ou encore par des expériences de micro-indentation. Dans ce dernier cas, la transition est marquée par une dissipation d'énergie (irréversible) dans les courbes charge-déplacement, qui augmente avec les vitesses décroissantes et/ou augmentation de la température.

5.3. Frottement, usure et abrasion

L'usure de la céramique est plutôt de type abrasif et se caractérise par la génération de débris donnant lieu à la propagation de fissures de type I et II mixtes (ouverture et glissement rectiligne). Elle augmente considérablement au-dessus de la charge critique.

Avec l'augmentation de la charge ou de la vitesse de contact entre un objet dur (denteur diamant par exemple) et un matériau céramique, on assiste au passage d'un régime de grattage relativement doux sans enlèvement de matière à un régime avec enlèvement de matière (polissage mécanique) et enfin à un régime d'usure rapide avec pelage correspondant à une abrasion mécanique.

5.4. L'élasticité

A partir de la température ambiante (ou inférieure) et jusqu'à des températures relativement élevées ($T < 1\ 000^{\circ}\text{C}$), les céramiques sont des matériaux élastiques par excellence : leur comportement sous charge est le plus souvent linéaire avec une quasi-réversibilité de la déformation au retrait de la charge et la rupture a lieu lors d'un chargement élastique (pas de plasticité), pour une déformation inférieure à 1 %. Les réfractaires sont généralement de nature mixte, ionique et covalente. Il est difficile de les déformer.

Les modules d'élasticité sont considérablement plus élevés pour les matériaux iono-covalents que pour les autres classes de matériaux. La céramique se retrouve donc en tête de liste des matériaux durs et rigides. Leurs coefficients de Poisson sont compris entre 0,2 et 0,3[6]

6. Quelques données économiques sur le marché des céramiques

Le marché total des céramiques en Europe (Union européenne) est de l'ordre de 30 milliards d'euros/an. Les secteurs les plus importants (Figure I-16) sont l'industrie des carreaux de revêtement et de dallage (39 %), les tuiles et briques (24 %), les réfractaires (12 %), les céramiques techniques (10 %), les sanitaires (8 %), la vaisselle et l'ornementation (6 %). La plus grande partie de la production a lieu en Allemagne, Grande-Bretagne, Espagne et Italie.

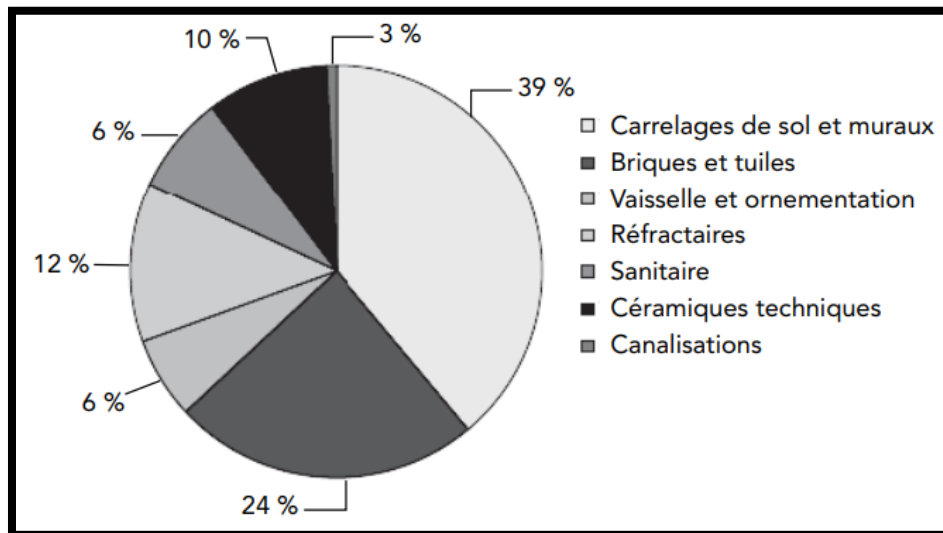


Figure I. 16: Répartition des chiffres d'affaires des céramiques en Europe par secteur en 2008.

Le secteur céramique emploie environ 200 000 personnes en Europe : 60 % des emplois correspondent aux carreaux, tuiles et briques, 15 % à la vaisselle et l'ornementation, 14 % aux sanitaires, 13 % aux réfractaires et seulement 5 % pour les céramiques techniques.

20 à 25 % de la production européenne est exportée (surtout vers les USA, la Russie, la Suisse). L'Europe importe de l'ordre de 8 % les produits réfractaires ou les carreaux et jusqu'à 60 % pour la vaisselle et l'ornementation.

L'industrie européenne a à faire face, notamment pour les céramiques traditionnelles, à la concurrence des pays produisant à bas coût, notamment la Chine et la Turquie (la Chine réalise plus de 50 % de la production mondiale des carreaux).

Durant l'année 2021, Près de 4 millions de tonnes de céramique sanitaire ont voyagé dans le monde, contre un peu plus de 2 millions en 2010. Si l'Asie concentre près de 65 % de cette masse, la chine, à elle seule, approvisionne la moitié des besoins mondiaux. L'union européen deuxième exportateur mondial, n'a participé en 2021 qu'à 13 % des échanges totaux, soit 552 000 tonnes, contre 24,2 % et 522 000 tonnes en 2010. Elle n'a donc pas profité de l'expansion du marché mondial. Classée en troisième position, l'Amérique du Nord, composée des USA, du Canada et du Mexique, a progressé en valeur absolue, avec 379 000 tonnes contre 268 000 en 2010, mais reculé en valeur relative, ne représentant aujourd'hui que 9,7 % des échanges mondiaux, contre 12,4 % en 2010. C'est au Mexique, deuxième plus gros exportateur mondial, qu'elle doit cette position, bien qu'il ait reculé entre 2021 et 2020 (-1,3 %). Quant aux flux en provenance d'Afrique, il est établi à 75 000 tonnes, ils ont augmenté de 110 % sur la période (moyenne annuelle de +17,2%), faisant passer la part du continent dans le

commerce mondial de 1,7 % à 1,9 %. Parmi les pays leaders, on compte d'abord le Maroc, puis l'Egypte et la Tunisie (Tableau I-1).[7]

	2010	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Croissance moyenne	Croissance 2021/2020	PDM monde 2021
Asie	1 100 506	1 679 102	1 697 734	1 603 571	1 756 791	1 988 977	2 220 614	2 127 623	2 531 633	+19,0 %	+7,9 %	64,6 %
Union Européenne	522 118	530 149	569 475	583 409	570 549	585 034	541 584	488 917	522 268	+13,0 %	+0,5 %	14,1 %
Autres pays d'Europe	132 132	178 482	185 960	187 805	203 077	220 127	237 166	235 176	278 859	+18,6 %	+7,0 %	7,1 %
ALENA (USA, Canada, Mexique)	268 401	329 677	340 565	368 326	366 973	375 412	365 789	368 372	379 235	+2,9 %	+3,2 %	9,7 %
Amérique du Sud	100 043	82 515	72 548	80 315	79 513	89 375	86 782	78 814	99 851	+26,7 %	-0,02 %	2,5 %
Afrique	35 861	88 524	84 042	71 958	65 933	6 6113	75 238	64 296	75 386	+17,2 %	+7,0 %	1,9 %
Océanie	1 960	847	902	1 084	411	583	580	315	364	+15,6 %	-14,2 %	-
Total Monde	2 161 021	2 889 296	2 951 226	2 896 468	3 043 247	3 325 621	3 527 753	3 363 513	3 917 596	+16,5 %	+5,6 %	100 %
Croissance moyenne	-	+11,8 %	+2,1 %	-1,9 %	5,1 %	+9,3 %	+6,1 %	-4,7 %	+16,5 %	-	-	-

Tableau I. 1: Exportations mondiales de céramique sanitaires (en tonnes), 2010-2021.

6.1. La céramique en Algérie

Selon les données recueillies lors du salon de l'industrie céramique de 2021, la capacité de production installée du secteur oscille entre 180 et 200 millions de m²/an, ce qui permet de répondre aux besoins du marché national, mais aussi de dégager environ 80 millions de m² à l'export, pour peu que les conditions de production soient améliorées, que la matière première locale soit disponible, en quantité et en qualité, afin de réduire les coûts de production et de maintenir la qualité du produit fini.



Chapitre II

Utilisation des déchets dans le génie civil

1- Introduction

L'utilisation de déchets pour la substitution du ciment dans les produits cimentaires, s'est révélé grandement bénéfique. En plus de la réduction des gaz à effet de serre et le cout énergétique, les ajouts peuvent améliorer les propriétés des pâtes cimentaires, des mortiers et des bétons. Depuis quelques décennies, le recyclage des déchets est devenu un enjeu majeur dans la l'industrie de la construction. Ces déchets deviennent de plus en plus encombrants. La meilleure solution pour pallier l'impact environnemental est la réutilisation ou la valorisation.

De nombreux chercheurs démontrent les avantages que la valorisation de divers déchets, peuvent procurés. Ainsi les cendres volantes, les cendres de boues de papier, les granulats d'argile ou des miettes de pneus et certains matériaux pouzzolaniques peuvent être incorporer dans la production de clinkers de ciment.

2- Laitier de haut fourneau

2-1- Définition

C'est un sous-produit obtenu lors de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. En fondant le minerai de fer à 1400-1600°C [4], de la fonte brute est produite et les impuretés flottantes, contenant principalement de la chaux, de la silice et de l'alumine provenant du laitier de haut fourneau. La figure II-1 résume la production du laitier.

Par refroidissement lent du laitier, un matériau cristallin est produit, qui est utilisé comme granulats et n'a pas de propriétés de cimentation. Les palettes vitreuses (> 4 mm) produites lors d'un refroidissement rapide forment d'excellents granulats légers et les granulés (> 4 mm) lors du broyage possèdent des propriétés hydrauliques. Ce laitier broyé granulés de haut fourneau est utilisé pour la production de ciment de haut fourneau.

Le laitier de haut fourneau broyé présente une action hydraulique en présence d'hydroxyde de calcium libéré par le ciment Portland lorsqu'il est hydraté. Le laitier broyé est mélangé avec du ciment Portland pour produire du ciment de laitier de haut fourneau Portland, la proportion du premier ne dépassant pas 65 %. La résistance initiale du ciment ainsi produit sera inférieure, mais la résistance ultime est comparable.

En raison de la faible chaleur d'hydratation, le ciment de laitier de haut fourneau broyé trouve son application dans le bétonnage en masse.

En 2002, Behim et al .[8] estimé la production La production annuelle dans le complexe sidérurgique d'Annaba de l'ordre de 500 10⁶ kg/an. Mais l'utilisation n'est que de l'ordre de 20%. Le crassier qui en résulte par accumulation au fil du temps est estimé à 2 millions de tonnes.

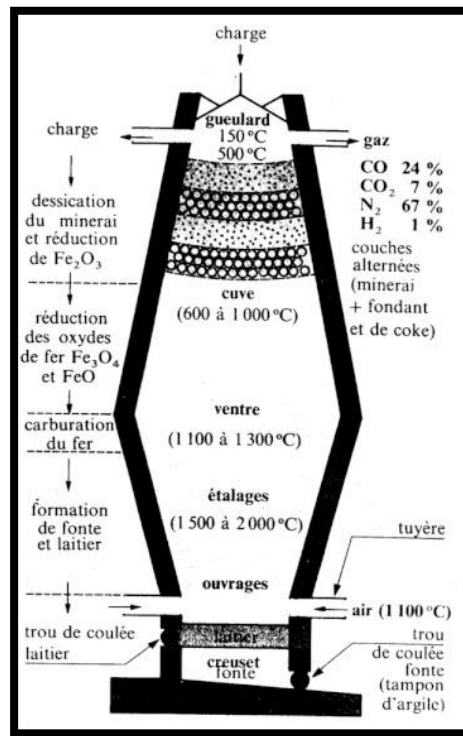


Figure II.1. Production du minerie de fer.

2-2-Historique

L. Vicat, mentionné la possibilité d'utiliser du laitier en cimenterie Vers 1818. En 1862 Emil Langen démontre qu'un mélange de laitier broyé et de chaux donnait naissance à un liant hydraulique.

La fabrication industrielle du ciment de laitier commença en Allemagne en 1882, grâce à G. Prussing. Plus tard vers 1928 les ciments à laitier apparaissent. Actuellement, un très grand nombre de cimenteries fabriquent des liants hydrauliques contenant des teneurs variées en laitier (ciments normalisés où des ciments spéciaux).

2-3- Caractéristiques des bétons aux laitiers

Bilim et al. [9] utilisé le laitier granulé et broyé de haut fourneau (GGBFS) pour une substitution du ciment. Ainsi quatre pourcentages en été choisi 20,40, 60, 80%, trois rapports E/C à savoir 0.3, 0.4 et 0.5, et trois dosages en ciment 350, 400 et 450 Kg/m³. Donc une campagne de 45 types de bétons fut menée.

Ils remarqué que la contribution à la résistance du laitier au béton fut faible jusqu'à 7^{ème} jours (Tableau II.1). Cet effet négatif disparaît à des âges plus avancés (28^{ème} jour et au-delà) et le béton contenant du laitier présente une résistance finale équivalente ou supérieure à celle du béton de ciment Portland normal témoin.

De plus, par rapport au béton de ciment Portland normal témoin, l'augmentation du rapport eau-matériau cimentaire diminue davantage la résistance du béton ayant des pourcentages de laitier particulièrement élevés.

Cette diminution observée au départ est due à la vitesse relativement plus lente du processus d'hydratation pouzzolanique. Mais aux âges ultérieurs, les GGBFS, qui sont hydrauliquement latentes, subissent des réactions d'hydratation en présence d'eau avec de l'hydroxyde de calcium, Ca(OH)_2 . Cette réaction pouzzolanique secondaire donne une microstructure plus dense car le Ca(OH)_2 est consommé et une pâte C-S-H se forme. En conséquence, le béton contenant du laitier présente une résistance finale équivalente ou supérieure à celle du béton de ciment Portland normal témoin.

Tableau I. 2: Résistance à la compression des bétons étudiés (exemple 350 Kg/m³) par Bilim et al.

w/c ratio	GGBFS (%)	Age (days)				
		3	7	28	90	360
0.30	0	61.0	69.4	75.8	83.9	90.0
	20	49.1	68.3	81.4	86.8	86.9
	40	48.3	64.2	81.0	87.8	91.8
	60	31.9	57.3	73.3	81.2	85.7
	80	22.0	45.8	62.7	70.6	74.7
0.40	0	45.9	54.8	63.9	71.3	72.8
	20	39.0	50.9	65.8	73.7	76.7
	40	31.9	49.1	67.2	76.3	78.2
	60	27.3	46.9	61.8	74.0	79.1
	80	18.9	37.3	50.4	58.9	62.6
0.50	0	38.0	44.5	53.6	61.5	66.0
	20	29.8	41.2	57.0	65.4	69.8
	40	24.3	36.9	55.9	65.9	71.7
	60	16.8	28.7	45.1	58.3	65.9
	80	12.1	21.8	29.9	38.1	39.1

Dans la catégorie mortier Yun et al. [10] ont utilisé deux finesses différentes A ;355 et B ; 464 m² /kg avec des remplacements du ciment par GGBFS de 20, 40 et 50%.

D'après les résultats (Figure II.2) , il a été observé que le mortier à ciment portland avait la résistance à la compression la plus élevée à 7 jours de durcissement, tandis que les mortiers BS avaient la résistance à la compression la plus élevée à 28 et 90 jours de durée de durcissement.

Cela était dû à la faible réactivité hydraulique du GGBFS à l'âge initial. Par la suite, à 28 et 90 jours de durcissement, le mortier GGBFS a acquis un plus grand intervalle de résistance à la compression qui dépasse la résistance du mortier Portland. A cet âge les petites particules de ciment Portland ont été hydrauliquement absorbées par le GGBFS par réaction chimique. Alors qu'en terme de réaction physique, Le GGBFS a créé une liaison forte entre chaque substance en remplissant le vide entre les structures de chaque substance dans le mélange.

Yun et al. ont observés également que les mortiers BS20, BS40 et BS50 ont obtenus de meilleures performances en termes de résistance à la compression que les mortiers AS20,

AS40 et AS50 à toute durée de durcissement, comme le montre la Figure II.2. En effet, les particules GGBFS plus fines pour BS ont fourni une plus grande surface de contact pour que les réactions hydrauliques. Lorsque l'activité hydraulique est activée, le GGBFS réagit avec l'humidité et l'hydroxyde de calcium libre, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ provenant de l'hydratation du ciment pour produire plus de silicate de calcium hydraté, CSH, qui améliore la résistance à la compression.

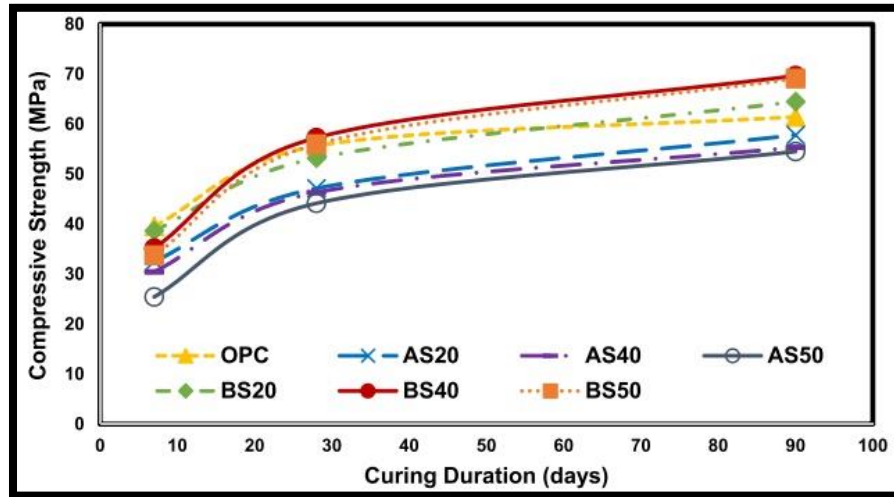


Tableau II. 1: Résistance à la compression des mortiers étudiés selon Yun et al.

Gupta[11] quant à lui, il a constaté que l'augmentation de la finesse n'est pas synonyme d'amélioration de la résistance (Figure II.3). Le développement de la résistance dépend de la compacité du mortier qui influence également le taux d'hydratation. Une compacité améliorée signifie que les vides entre les particules de ciment doivent être remplis par des particules de laitier plus fines. Cependant, la compacité dans la pâte de ciment, n'a pas significativement améliorée la résistance car, un laitier d'une finesse plus élevée ($750 \text{ m}^2/\text{kg}$) a produit l'effet inverse.

La réduction de la résistance due à l'ajout de particules ultrafines de GGBS est due à une cohésion intense développée à partir d'une finesse élevée de GGBS qui l'empêche de se lier correctement avec la matrice. Les particules ultrafines ont tendance à avoir une faible dispersion dans la matrice en raison de la force physique d'attraction de Van Der Waal entre les particules qui entraîne la formation de points faibles dans la matrice par agglomération des particules. L'agglomération des particules forme des vides localisés dans la pâte.

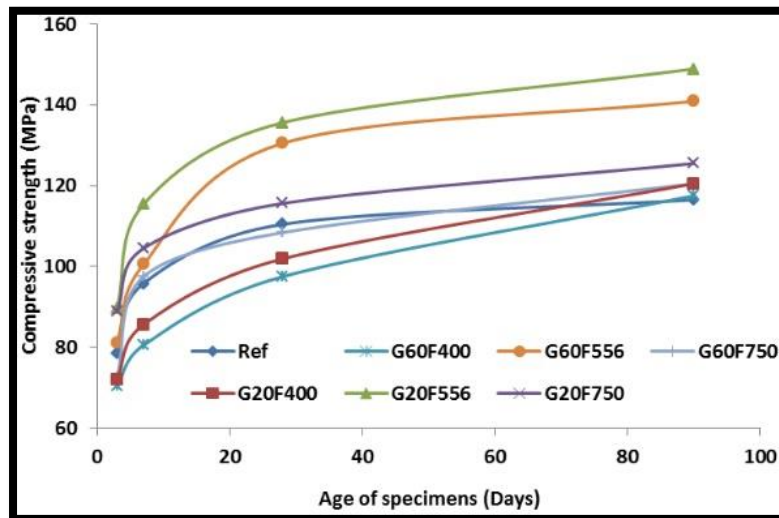


Figure II. 1: Résistance à la compression étudiés selon Gupta.

3-Fumée de silice

3-1-Définition

La fumée de silice est produite lors de la réduction à haute température du quartz dans les fours à arc électrique où les principaux produits sont le silicium ou les alliages de ferrosilicium. Le quartz de haute pureté est chauffé à 2000 °C dans un four à arc électrique avec du charbon, du coke ou des copeaux de bois ajoutés pour éliminer l'oxygène. L'alliage est collecté en pied du four. Lorsque le quartz est réduit en alliage, il libère de la vapeur de monoxyde de silicium. Dans les parties hautes du four ces fumées s'oxydent et se condensent en microsphères de silice amorphe (dioxyde de silicium).[12]

Les fumées sont extraites du four par de puissants ventilateurs, souvent à travers un pré-collecteur et un cyclone qui éliminent les grosses particules grossières de bois ou de charbon non brûlés, puis sont soufflées dans une série de sacs filtrants spéciaux.

Ce processus n'a pas changé depuis le développement de la technologie des fours à arc. La production est centrée sur la qualité de l'alliage et sur les matières premières : charbon, coke, copeaux de bois et pureté du quartz. Ainsi, la production d'une usine à l'autre, en fonction de l'entrée du four, peut signifier que des caractéristiques différentes se retrouvent dans la fumée de silice. Cela peut être aussi simple qu'une variation de couleur, ou la teneur en dioxyde de silicium, ou les propriétés de surface. En tant que tels, un approvisionnement et un contrôle de la qualité réputés sont essentiels pour la cohérence des performances dans le béton.

Certaines usines ont été modifiées pour le traitement post-production de la fumée de silice, comme les re-brûleurs pour réduire la teneur en carbone. De telles qualités de produit

sont plus souvent utilisées dans des applications de très haute technologie en raison d'un surcoût, et ne sont pas utilisées dans la production de béton.

3-2-Historique

La fumée de silice a été testée pour la première fois dans le béton en Norvège au début des années 1950. De bons résultats de résistance ont été obtenus et plus tard, les tests d'exposition aux sulfates commencés.

Cependant, à cette époque, la production industrielle était impossible : aucune méthode de rétention des grandes quantités de particules ultrafines n'était disponible. Ainsi, ces résultats favorables n'ont fini qu'en incident, et auraient pu être oubliés.

Au début des années 1970, le gouvernement norvégien a annoncé des exigences environnementales strictes pour l'industrie de la fonte. Cela a rendu nécessaires d'énormes améliorations dans la technologie de filtrage. Le filtrage des particules des gaz d'échappement devient ainsi possible et, en quelques années, des quantités importantes sont collectées.

3-3- Caractéristiques des bétons au fumée de silice

Mazloom et al. [13] étudièrent l'effet de la substitution du ciment par la fumée de silice (SF) à hauteur de 6, 10 et 15 %. La résistance à la compression

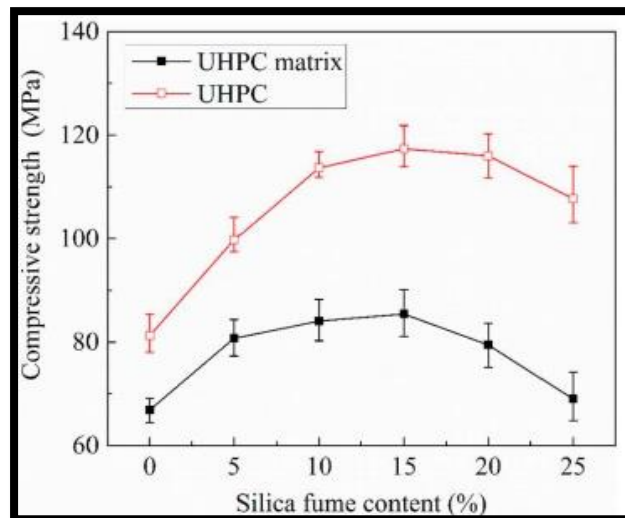
On constate au tableau II.2 un développement négligeable de la résistance à la compression des mélanges de béton contenant de la fumée de silice après 90 jours. Cependant, il y avait des augmentations de résistance dans le béton témoin après un an par rapport à sa résistance à 28 ou 90 jours. La différence de développement de résistance dans le béton témoin et le béton SF est attribuée à la formation rapide d'une couche inhibitrice de produit de réaction empêchant la poursuite de la réaction du SF avec l'hydroxyde de calcium au-delà de 90 jours. Dans le cas du béton témoin, l'hydratation est à un stade moins avancé et la résistance montre encore des augmentations significatives. A 400 jours, la résistance à la compression du béton témoin et des mélanges de béton contenant différentes proportions de fumée de silice était la même.

A 28 jours de durcissement, la résistance du béton contenant 15 % de fumée de silice était d'environ 21 % supérieure à celle du béton témoin. Par conséquent, l'inclusion de fumée de silice dans le mélange de béton affecte principalement la résistance à court terme.

Tableau II. 2: Résistance à la compression des bétons étudiés par Mazloom et al.

Concrete mixes	Age (days)						
	7	14	28	42	90	365	400
OPC	46	52	58	62	64	73	74
SF6	50.5	58	65	69	71	73	73
SF10	52	61	67.5	71	74	74	73
SF15	53	63	70	73	76	75	76

Au-delà de ces pourcentages (20 et 25%) Wu et al. [14] observèrent une diminution progressive de la résistance à la compression (Figure II.4). Une plus grande utilisation de fumée de silice à 25% réduit la résistance de 8% car, la viscosité accrue associée à une teneur relativement élevée en fumée de silice entraînent le piégeage de bulles d'air et la faible densité des matériaux. Par conséquent, l'utilisation d'une teneur en fumée de silice, comprise entre 10% et 20%, peut densifier la microstructure, augmenter la force de liaison fibre-matrice et réduire la porosité, résultant ainsi en une plus grande résistance à la compression due à l'effet filler et à l'effet pouzzolanique.

**Figure II. 2: Résistance à la compression étudiés selon Gupta.**

D'ailleurs, la majorité des mélanges étudiés ont montré un comportement dilatant (Figure II.5). Cette réponse devient plus faible avec l'augmentation de la teneur en fumée de silice. Une plus grande teneur en fumée de silice de 15% à 25% a changé le comportement dilatant en un comportement de Bingham presque linéaire. Ceci est attribué au frottement réduit des particules en raison de l'effet lubrifiant dérivé des particules fines et sphériques de fumée de silice. De plus, compte tenu de la teneur en fumée de silice et de la vitesse de rotation,

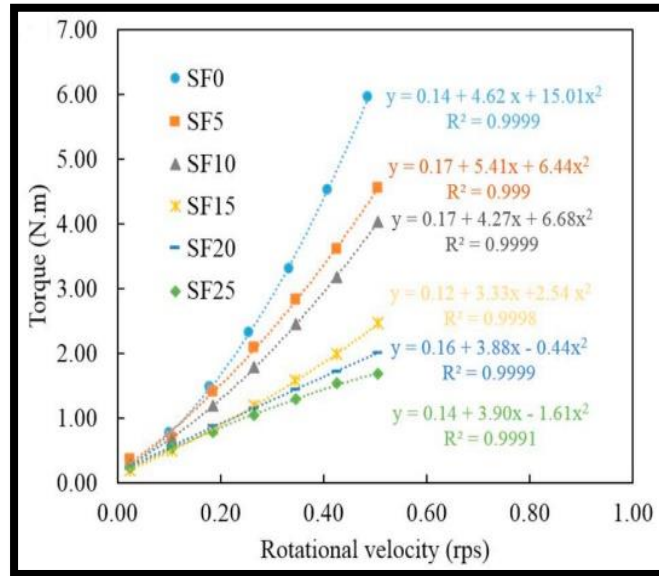


Figure II. 3: Comportement rhéologique des bétons étudiés selon Wu et al.

4-Cendre volante

4-1-Définition

La cendre volante ou la cendre de combustible pulvérisée (PFA) est le résidu de la combustion du charbon pulvérisé collecté par des séparateurs mécaniques ou électrostatiques à partir des gaz de combustion ou des centrales électriques.

Il constitue environ 75 % du total des cendres produites. Les propriétés et la composition des cendres volantes varient considérablement, non seulement entre les différentes usines, mais d'heure en heure dans la même usine (Figure II.6).

Sa composition dépend du type de combustible brûlé et de la variation de charge sur la chaudière. Les cendres volantes obtenues à partir des séparateurs à cyclone sont relativement grossières et contiennent une grande proportion de combustible imbrûlé, tandis que celles obtenues à partir des précipitateurs électrostatiques sont relativement fines avec une surface spécifique d'environ 3500 cm²/g et peuvent atteindre 5000 cm²/g.

Plus fine que le ciment Portland. Les cendres volantes sont généralement constituées de particules sphériques, dont certaines peuvent ressembler à du verre et creuses. Sa couleur peut varier du gris clair au gris foncé.[4]

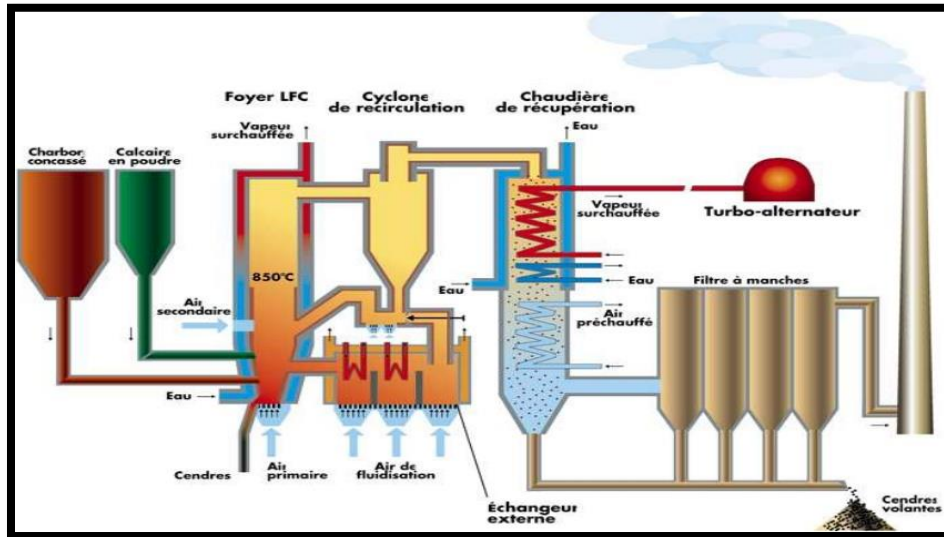


Figure II. 4: Schéma de fonctionnement des chaudières à lit fluidisé circulant.

4-2-Historique

La première introduction de la cendre volante de charbon pulvérisé comme remplaçant du ciment fut en 1914. Ce n'est qu'en 1937 que l'appellation de cendre volante apparaît dans l'article de « Properties of cements and concrete containing fly ash ». La recherche des qualités des cendres volantes et leur utilisation dans les bétons commence à voir le jour Aux USA, pour la construction des grands barrages.

En 1968, Mastane Kokubu présente un article principal sur les cendres volantes et les ciments aux cendres volantes, lors du 5e Congrès sur la chimie des ciments qui s'est tenu à Tokyo.[15]

4-3- Caractéristiques des bétons aux cendres volantes

La cendre volante de classe F, fait l'objet de plusieurs recherches pour apprécier ces avantages. Avec l'introduction de la cendre et la réduction du rapport E/C de 0.41 à 0.31 en remarque une augmentation de l'affaissement des bétons. Dans le tableau II.3, tiré de l'étude de Nath & Sarker[16], on constate que l'affaissement augmente de 140mm à 185 mm.

La raison est peut-être due à l'augmentation du volume de la pâte qui conduit à l'augmentation de la plasticité et de la cohésion. Les particules de cendres volantes ont tendance à enrober et lubrifier les granulats. La forme sphérique des particules de cendres volantes contribue à la maniabilité du béton en réduisant du frottement de l'interface de la pâte et les granulats, produisant ainsi un effet de roulement à billes au point de contact.

Tableau II. 3: Affaissement des bétons étudiés par Nath & Sarker.

Series	Mix ID	Binder			w/b	Slump (mm)
		Fly ash (%)	Cement (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)		
A	A-00	0	355	0	0.41	140
	A-30	30	308	132	0.32	170
	A-40	40	264	176	0.31	185
B	B-00	0	517	0	0.29	150
	B-30	30	362	155	0.29	175
	B-40	40	311	207	0.29	160

Les développements de la résistance à la compression des mélanges, indiquent que l'incorporation de cendres volantes dans le béton diminue, la résistance à un jeune âge (Figure II. 7). La résistance des bétons de cendres volantes dans les deux séries s'est développée à un rythme plus élevé que celle du béton témoin jusqu'à 56 jours.

Dans la série A, le béton de cendres volantes a acquis une résistance similaire à celle du béton témoin à 28 jours. À 56 jours, les deux bétons de cendres volantes ont gagné plus de 110 % de résistance du béton témoin. Cela implique la capacité notable de développement de la résistance du béton de cendres volantes en raison de la réaction pouzzolanique après 28 jours.

Les bétons de cendres volantes ont atteint plus de 80 % de la résistance du béton témoin à 28 jours dans la série B. Les résistances des bétons de cendres volantes de la série B étaient inférieures à celles du béton témoin car le rapport E/C et la teneur totale en liant étaient les mêmes dans tous les mélanges.

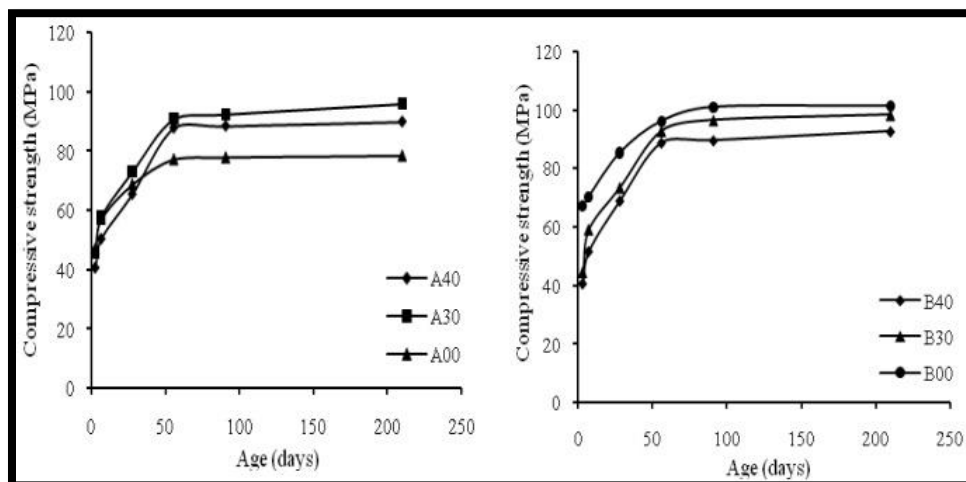


Figure II. 5: Résistance à la compression série A (à gauche) série B (à droite) selon Nath & Sarker.

Les mêmes constatations furent déduites par Siddique[17] pour la même classe de cendre volante (Classe F). Lors du remplacement du ciment Portland par la cendre volante avec trois pourcentages (40, 45, 50%) Siddique a constaté au tableau II.4, le même phénomène de la série B que Nath & Sarker. Avec un remplacement à moitié du ciment, le béton avec des cendres volantes développe des résistances presque identiques au béton à ciment Portland.

L'augmentation de la résistance est, bien sûr, due au ciment qui a continué à s'hydrater. L'augmentation significative de la résistance du béton de cendres volantes à volume élevé est due à la réaction pouzzolanique des cendres volantes. Bien qu'à 28 jours, le remplacement du ciment par des cendres volantes diminue la résistance à la compression du béton.

Tableau II. 4: Résistance à la compression des bétons étudiés par Siddique.

Mixture number	Compressive strength (MPa)			
	7 days	28 days	91 days	365 days
M-1 (0% fly ash)	25.7	37.2	39.5	42.1
M-2 (40% fly ash)	17.0	26.7	33.5	38.6
M-3 (45% fly ash)	15.3	24.7	30.1	34.4
M-4 (50% fly ash)	14.7	23.1	27.7	32.1

La résistance à l'abrasion des bétons suit la même tendance que la résistance à la compression, elle se trouve réduite comme représentée en figure II.8.

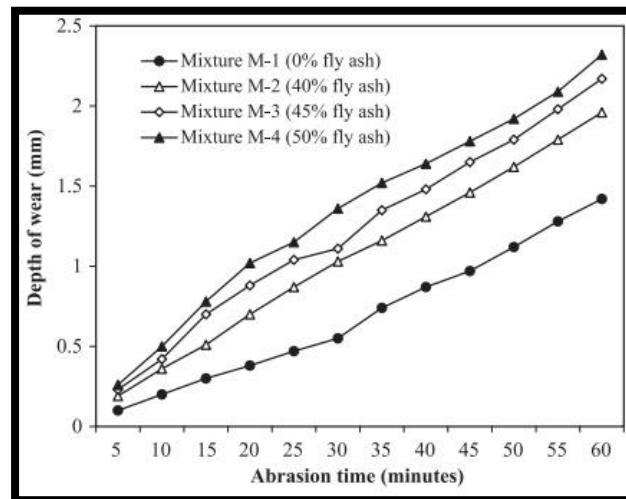


Figure II. 6: Résistance à l'abrasion des bétons selon Siddique.

Lorsque Siddique & Khatib[18] remplacèrent une partie de sable (35, 45, 55%) par les cendres volantes, ils trouvèrent que la résistance à la compression augmente ce qui augmente la résistance à l'abrasion (Figure II.9).

L'amélioration de la résistance est due au remplacement du sable par des cendres volantes. L'amélioration est attribuée à la densification de la structure de la pâte due à l'action pouzzolanique entre les cendres volantes et l'hydroxyde de calcium libéré à la suite de

l'hydratation du ciment, ainsi qu'à l'augmentation de la teneur en liant (C+FA) dans les mélanges et en réduisant par la suite le rapport eau/liant.

Lors du remplacement partiel du sable par des cendres volantes, il y a réduction de la quantité de sable, entraînant une diminution du rapport sable/liant. De ce fait, la matrice du béton devient plus dense (c'est-à-dire une porosité réduite), ce qui entraîne une résistance accrue à tous les âges.

Au-delà de 45% de teneur en cendres volantes, l'absence d'augmentation significative de la résistance des mélanges de béton est probablement due à la non disponibilité de l'hydroxyde de calcium issu de la réaction d'hydratation.

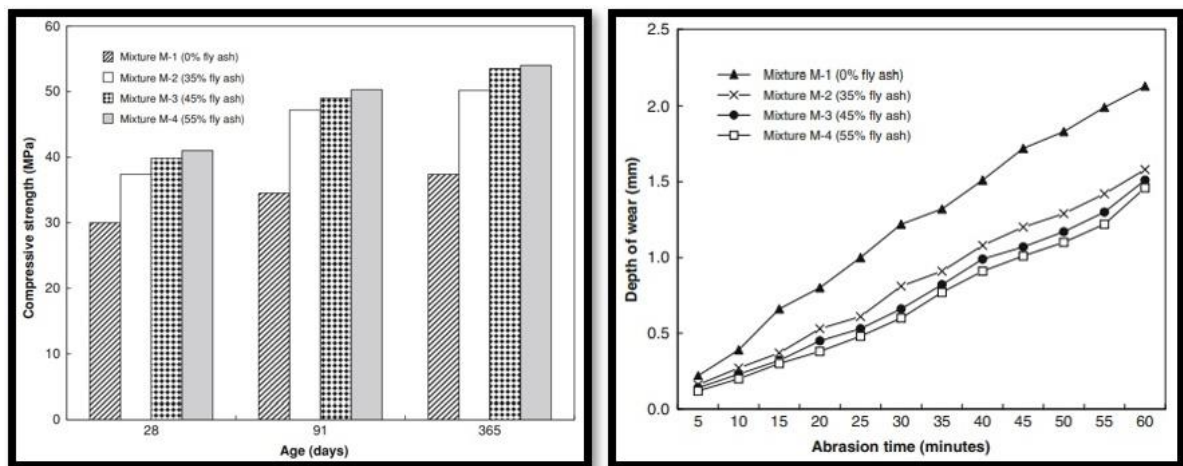


Figure II. 7: Résistance à la compression (à gauche) à l'abrasion (à droite) des bétons selon Siddique & Khatib.

5-Déchets de verre

5-1-Définition

On relève cinq grandes étapes dans le cycle de fabrication du verre. Dans la préparation du lit de fusion on ajoute des agents modificateurs au sable suivant la nature et la composition du verre la température est progressivement élevée à 1400°C. l'élaboration du verre est entièrement mécanisée. Différents procédés sont utilisés selon le produit final (plat ou creux).

Les parois extérieures se refroidissent plus vite que l'intérieur du verre et des contraintes apparaissent au sein du matériau. Pour les annuler, le verre est soumis à un traitement thermique compris entre 500 et 550°C, c'est l'étape de recuisson. A la sortie le contrôles de qualité des produits finis est exigé pour détecter les variations de production et satisfaire les attentes.

5-2-Historique

Tout d'abord utilisé en morceaux taillés comme objets d'ornementation, le verre est destiné à devenir un contenant alimentaire vers 1 500 ans avant J-C. La technique de

fabrication consistait à mouler les bols, carafes et autres coupes, autour d'une structure de sable ou d'argile. Cette technique est importée en Europe vers 900 avant J-C par les empires romain et grec.

Les plus anciens objets en verre produits par l'Homme ont été retrouvés en Egypte et datent de 3 000 ans avant J-C. Leur fabrication reprend un procédé découvert par des marins en Mésopotamie environ 4 500 ans avant J-C.

5-3- Caractéristiques des bétons au déchets de verre

Le verre est un matériau qui peut être recyclé à l'infini sans la perte de sa qualité, ce qui est un excellent critère pour sa valorisation.

Shao et al. [19] utilisèrent des verres de soda broyés en plusieurs finesses (150, 75, 38 μ m). A 30% de substitution du ciment par le verre broyé tous les bétons de verre avaient des résistances inférieures à celles du béton témoin, sauf que la résistance du béton contenant du verre de 38 μ m dépassait celle du témoin après 90 jours de cure comme on constate à la figure II.10. Plus la granulométrie du verre est petite, plus la résistance du béton de verre est élevée.

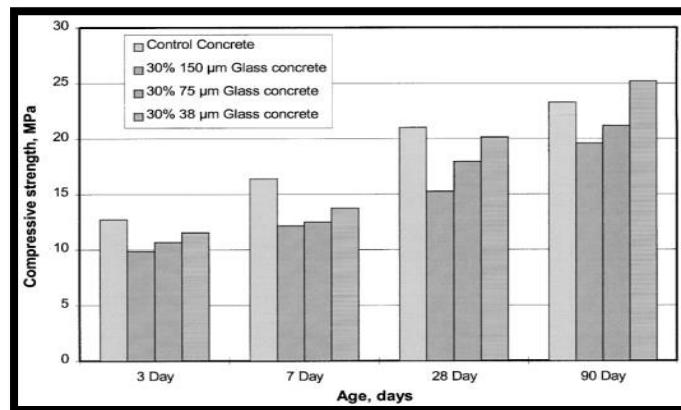


Figure II. 8: Résistance à la compression des bétons de verre selon Shao et al.

Aliabdo et al. [48] ont utilisé les déchets de verre broyé à 75 μ m comme remplacement et addition (de 5 à 25%) à deux ciment 33, et 45MPa. Ils ont remarqué que l'augmentation du niveau de remplacement du ciment en poudre de verre augmente l'affaissement du béton (Figure II.11). Cette tendance est la même pour les mélanges de béton de 33 MPa et 45 MPa. Ce comportement peut être dû à la surface vitreuse et à la faible absorption d'eau de la poudre de verre ou peut être attribué aux particules plus grossières de la poudre de verre par rapport au ciment.

Dans le cas de l'addition le contraire ce produit. La poudre de verre diminue l'affaissement des bétons approximativement, chaque addition de 5 % de poudre de verre diminue la valeur d'affaissement de 10 mm. Cette tendance peut être due à l'augmentation de

la teneur en matériaux fins qui augmente la cohésion du mélange de béton et diminue ainsi l'affaissement.

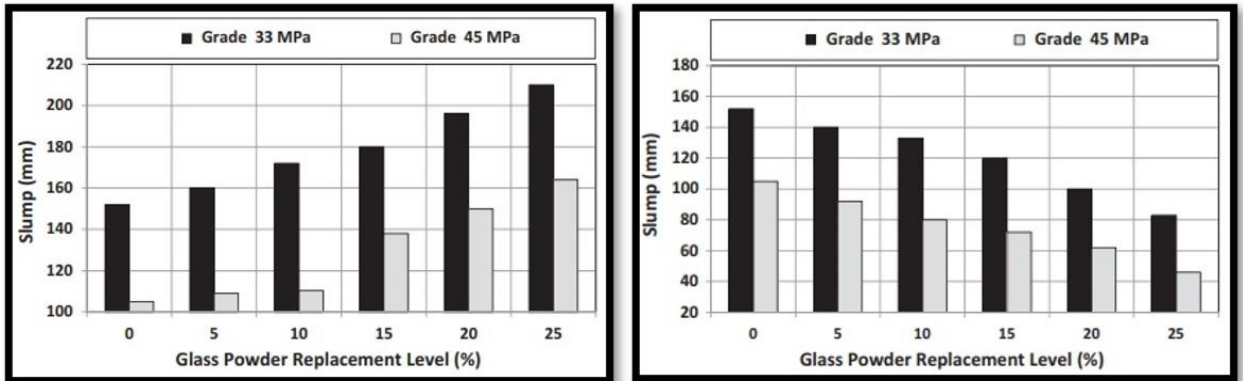


Figure II. 9: Affaissement des bétons en cas de remplacement (à gauche) et addition (à droite) du ciment par la poudre de verre selon Aliabdo et al.

Sur la figure II.12 on remarque que le remplacement de 5% de ciment augmente la résistance à la compression du ciment 33Mpa et cette valeur s'étend jusqu'à 10 % pour un béton de 45 MPa. Cela peut être dû à la plus faible teneur en ciment Portland à un niveau de remplacement de poudre de verre plus élevé.

Dans le cas d'une addition d'après la figure II.12, pour un béton de grade 33 MPa, l'ajout de poudre de verre jusqu'à 15 % augmente la résistance à la compression du béton. Ce déplacement de la valeur optimale de la poudre de verre en tant qu'ajout de ciment peut être dû à l'effet filler, pouzzolanique et hydraulique du matériau. De plus, pour le béton de ciment 33 MPa, il y a une baisse de la résistance à la compression lorsque plus de 15 % de poudre de verre sont utilisés. Cela peut être dû à l'agglomération des particules de poudre de verre. Pour une qualité de béton de 45 MPa, l'utilisation de poudre de verre comme ajout de ciment jusqu'à 25 % améliore la résistance à la compression du béton.

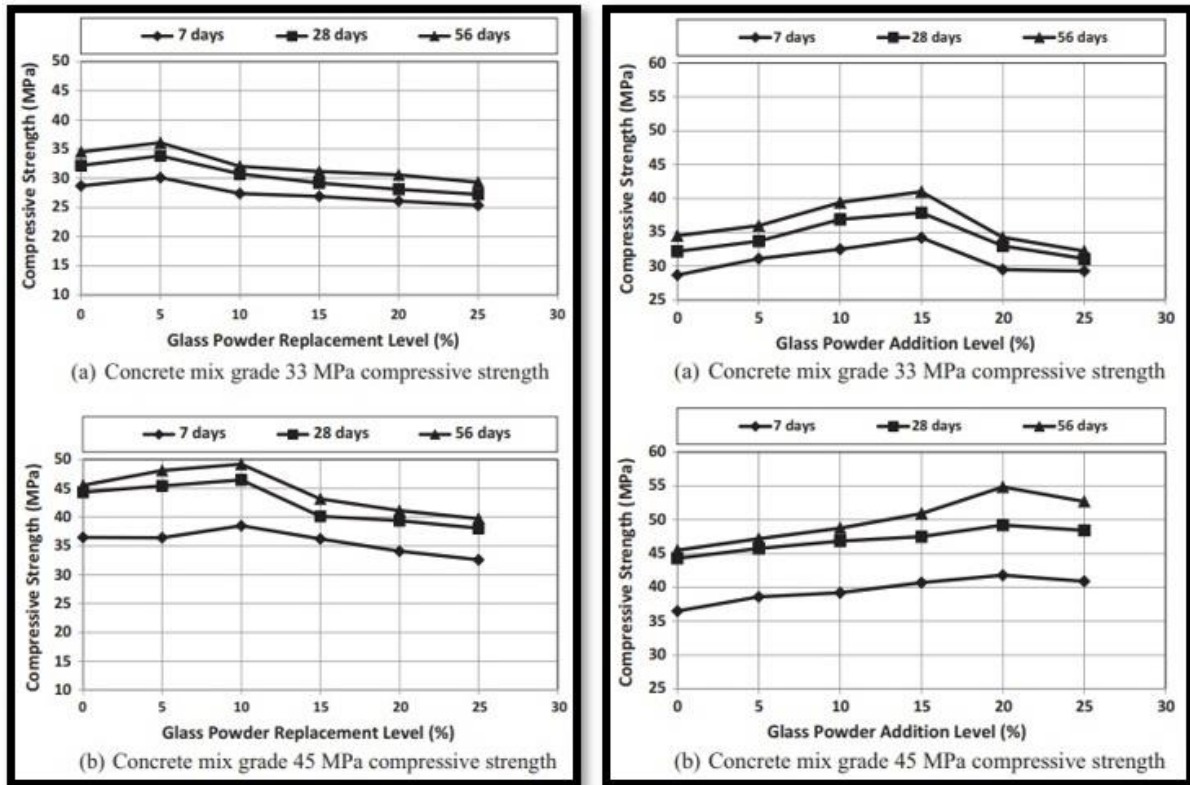


Figure II. 10: Résistance à la compression des bétons en cas de remplacement (à gauche) et addition (à droite) du ciment par la poudre de verre selon Aliabdo et al.

L'utilisation des déchets de bouteilles de soda colorées comme granulats 4-16mm (WG), diminuent la résistance à la compression et ceci s'accroît avec l'augmentation du pourcentage de substitution. Dans le cas de l'utilisation de 15%, il y a eu une diminution de 8% de la résistance à la compression. Lorsque cette proportion a augmenté à 60 %, une diminution de 49 % de la résistance à la compression a été détectée (Figure II.13) comme ont remarqués Topçu & Canbaz.[20]

Il a été déterminé que la fragilité élevée du WG conduisant à des fissures conduisait à une adhérence incomplète entre le WG et l'interphase de pâte de ciment. En raison de la mauvaise géométrie de WG, une distribution homogène des granulats n'a pas pu être obtenue.

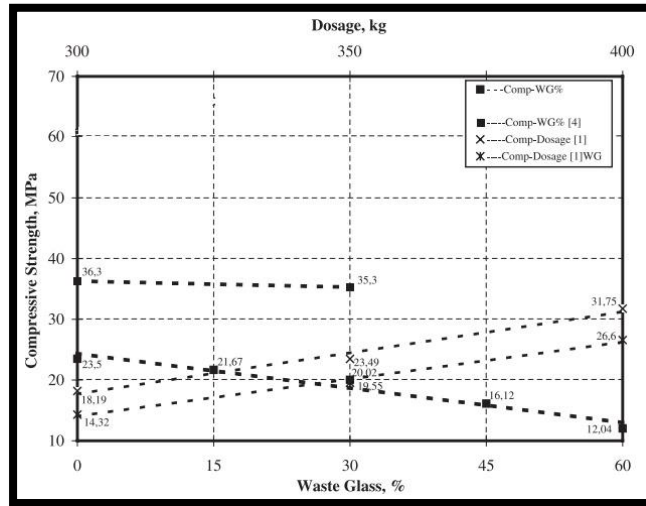


Figure II. 11: Variation de la résistance à la compression des bétons de verre selon Topçu & Canbaz.

Dans le cas du remplacement de granulats fin (sable), Gautam et al. ont constaté qu'au-delà de 20% de substitution la résistance à la compression diminué avec un optimum à 10% (Figure II.14).

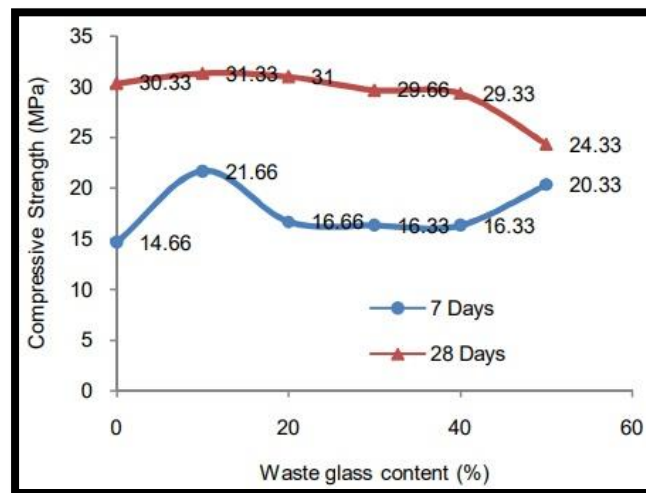


Figure II. 12: Variation de la résistance à la compression des bétons de verre selon Gautam et al.

6-Pneus usagés

6-1-Définition

Les déchets pneumatiques sont des déchets issus de pneus de véhicules automobiles, de camions, de motos, de vélos et d'autres équipements de transport qui utilisent des pneus.

La composition des déchets pneumatiques peut varier selon le type de pneu et son usage. Les pneus sont généralement constitués de caoutchouc, de fibre de verre, d'acier et de divers produits chimiques tels que le soufre, le zinc et le carbone. Les pneus usagés peuvent

également contenir des huiles et des solvants, ainsi que des contaminants tels que des métaux lourds et des polluants organiques persistants

II-6-2- Caractéristiques des bétons à pneus usagés

Les déchets pneumatiques représentent un défi environnemental important en raison de leur volume et de leur nature difficile à éliminer. Ils peuvent être recyclés pour produire de nouveaux pneus, du caoutchouc granulé pour les surfaces de terrains de sport ou encore transformés en combustible pour l'industrie.

Dans le cas de leur utilisation dans les bétons Eldin & Senouci[21] ont élaboré des bétons avec le remplacement des gravier et sable par des granulats issue des déchets de deux usines par incréments de 25%.

Les résistances à la compression et à la traction, subissaient des réductions allant jusqu'à 85 % et jusqu'à 50 % respectivement lorsque les granulats grossiers ont été remplacés par du caoutchouc. Lorsque le sable était remplacé par du caoutchouc granulé, la réduction de la résistance à la compression a atteint 65 % (Figure II.15).

Lorsqu'ils sont chargés en compression, les échantillons contenant du caoutchouc ne présentent pas de rupture fragile. En raison de son faible module d'élasticité, les morceaux de granulats de caoutchouc agissent comme des grands pores et n'ont pas de rôle significatif dans la résistance aux charges appliquées de l'extérieur. Ainsi, les résistances à la compression et à la traction du béton contenant des particules de caoutchouc dépendent du volume d'agrégats de caoutchouc (gros pores) dans la masse de béton.

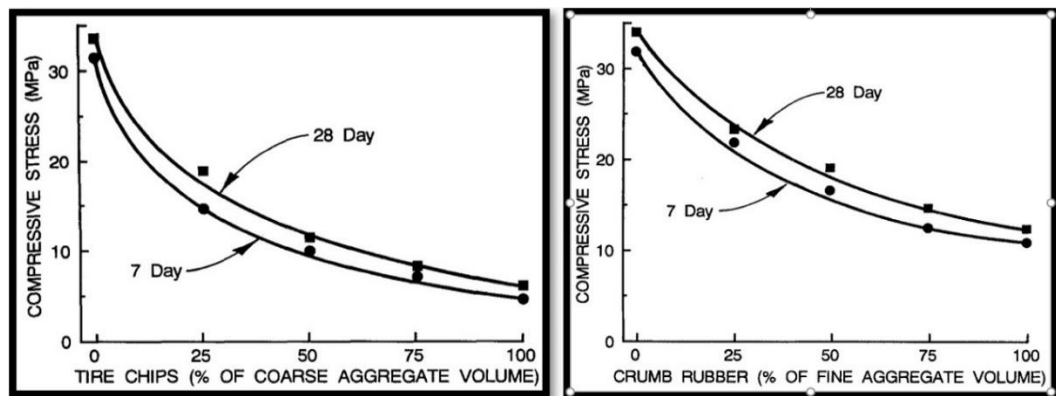


Figure II. 13: Résistance à la compression des bétons caoutchouteux selon Eldin & Senouci.

Les déformations et les contraintes mesurées en continu pendant l'essai de compression sont représenté en figure II.16. Les courbes contrainte-déformation pour les éprouvettes contenant 100 % de granulats de caoutchouc montrent que les échantillons de béton contenant des particules de caoutchouc possèdent une ténacité élevée puisque la majeure partie de l'énergie totale générée est du plastique.

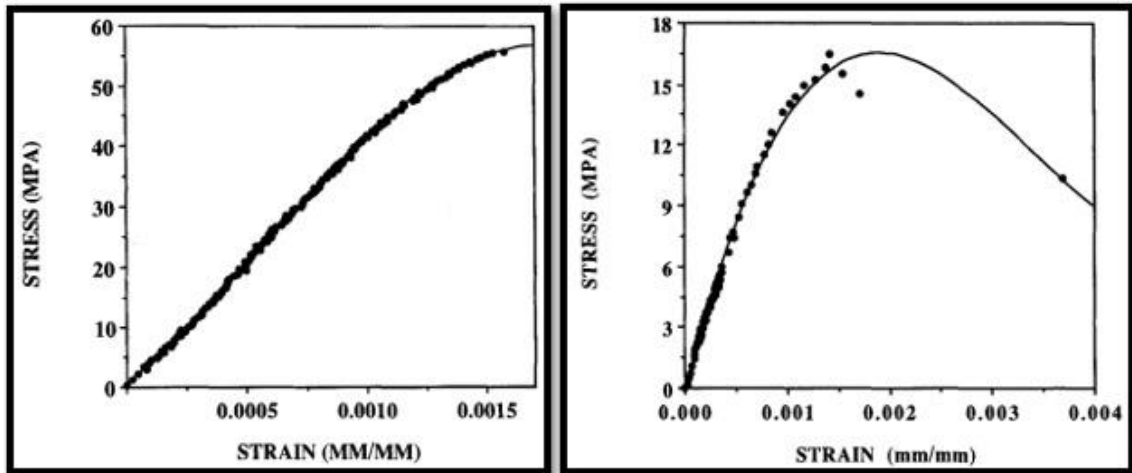


Figure II. 14: Courbe contrainte-déformation du béton normal (à gauche) et caoutchouteux (à droite) selon Eldin & Senouci.

En raison de la nature non polaire des particules de caoutchouc et de leur tendance à emprisonner de l'air dans leurs surfaces rugueuses, les échantillons de béton caoutchouteux contiennent une teneur en air plus élevée.

De plus, du fait de leur tendance à repousser l'eau, lorsque des particules de pneumatiques se substituent aux granulats minéraux dans le mélange témoin, les particules de pneumatiques attirent l'air, en quantité dépendant de la pression interne dans le mélange.

L'air peut alors adhérer aux particules de pneu, ainsi, l'augmentation de la teneur en pneu entraîne une teneur en air plus élevée dans les mélanges pneu-béton, diminuant ainsi le poids unitaire des mélanges. Une teneur en air plus élevée suggère une réduction ultérieure de la résistance des échantillons de béton.

En raison d'un faible module d'élasticité par rapport aux granulats minéraux, les granulats de caoutchouc agissent comme de gros pores et ne contribuent pas de manière significative à la résistance aux charges appliquées de l'extérieur. Ainsi, une éprouvette de béton-caoutchouc perd de sa résistance en fonction de sa teneur en pneu. Par exemple, la section efficace d'un échantillon résistant à une charge externe diminue en fonction de la concentration en particules de pneu de cet échantillon. [22]

En menant l'enquête sur deux types de bétons caoutchouteux à affaissement variable appelé (VS) et affaissement constant (CS) ayant 5, 10, 15, 20 et 30% de remplacement en volume du sable par du caoutchouc déchiqueté, Moustafa & ElGawady [23] constatés aussi que le béton conventionnel s'est rompu de manière fragile une fois qu'il a atteint la charge maximale. L'ajout de 5 % de caoutchouc dans le mélange VS n'a pas modifié le comportement fragile tandis que l'ajout de pourcentages plus élevés de caoutchouc a augmenté la ductilité.

L'ajout de jusqu'à 15% de caoutchouc dans le mélange CS n'a pas changé la rupture soudaine (Figure II.17).

Cela peut être attribué au fait que le chargement monotone continue d'augmenter la demande de déplacement ; empêchant les particules de caoutchouc pour les faibles remplacements de fournir une compressibilité.

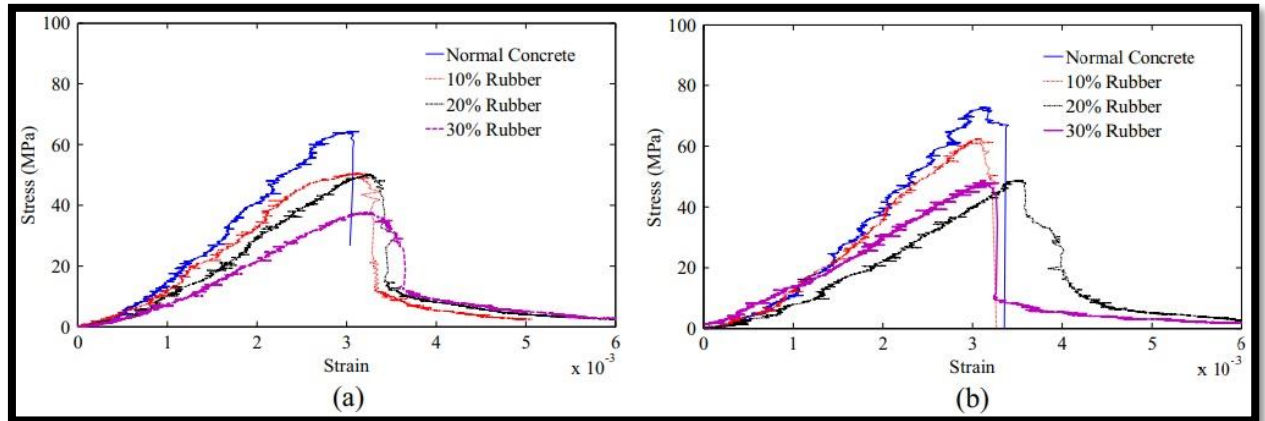


Figure II. 15: Courbe contrainte-déformation des bétons VS (à gauche) et CS (à droite) selon Moustafa & ElGawady.

7- La boue de papeterie

7-1-Définition

L'industrie des pâtes et papiers génère une quantité considérable d'eaux usées provenant de divers processus de production. Le traitement primaire et secondaire de ces eaux usées entraîne la production de quantités considérables de boues.

Le mot « boue papetière » peut être divisé en plusieurs catégories: les boues papetières provenant de la production de fibres vierges de bois, appelées « boues primaires », les boues de papier usagées produites en éliminant les encres des fibres post-consommation, appelées « boues de désencrage », les boues activées des filières secondaires, dites « boues secondaires » et les vieux papiers et boues activées combinés, dits « boues combinées ».

7-2- Caractéristiques des bétons à boue de papeterie

La mise en décharge des boues de déchets de papier est devenue moins faisable ces dernières années, car les préoccupations environnementales ont entraîné une augmentation rapide des coûts. Des utilisations alternatives des boues papetières ont été proposées par de nombreux auteurs.

Dans leur investigation Pera & Amrouz[24] ont constaté la présence de la kaolinite dans deux boues de papeterie (D et W), ce qui les a incités à les calciner à différentes températures.

La quantité d'hydroxyde de calcium consommée par la réaction pouzzolanique est donnée dans le tableau II.5. D'après les résultats, on peut conclure que les conditions de calcination conduisant aux pouzzolanes les plus réactives sont de 700°C ou 750°C pendant 2 ou 5 heures pour boues D et W. Avec un avantage aux boues W car, elles sont composées d'une teneur plus élevée en kaolinite.

Le tableau II.5 montre également qu'une calcination pendant 21 heures donne un produit peu réactif, surtout à jeune âge. Cela est due à la décomposition du CaCO_3 en CaO ou en composés contenant de la chaux (par exemple, anorthite et gehlénite) fixant la silice réactive.

L'activité pouzzolanique des boues calcinées diminue lorsque la température atteint 800°C et la durée de calcination 5 heures. Cela est dû à la décarbonatation de la calcite, qui produit un excès de chaux qui ne réagit pas avec la métakaolinite. L'alumine et la silice sont également consommées pour former des produits inertes tels que la gehlénite et l'anorthite, et moins de métakaolinite est disponible pour la réaction pouzzolanique.

Tableau II. 5: Consommation de l'hydroxyde de calcium par les boues de papeterie selon Pera & Amrouz.

Temperature of Calcination (°C)	Length of Calcination (hours)	Lime Consumption (%)					
		D Sludge			W Sludge		
		3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
700	2	54	73	93	67	95	100
	5	62	65	84	67	92	100
	21	51	64	71	35	36	84
750	2	23	80	90	47	95	100
	5	55	73	75	50	92	100
	21	35	70	72	18	61	84
800	2	57	70	72	39	71	95
	5	38	51	67	27	46	83
	21	18	36	60	27	40	73

Par incrément de 5% jusqu'à 20%, Ahmad et al. [25] ont incorporés des cendres de boue de papeterie (commercial) tamisée à 90 µm comme remplaçant au ciment dans des bétons ordinaires. Ils ont remarqué que l'affaissement diminué avec l'augmentation de la teneur en cendres des boues de papier. Les particules de cendres des boues de papier ont absorbé plus d'eau que le ciment et ont ainsi diminué la maniabilité du mélange de béton comme illustré sur la figure II.18.

La résistance à la compression a été suivi pendant 28 jours. A 5% de remplacement du ciment par des cendres de boues de papier les résistances sont supérieures à la référence ensuite les résistances chutées. Elle était supérieure de 15 % à celle du mélange de référence à 28 jours. (Figure II.18)

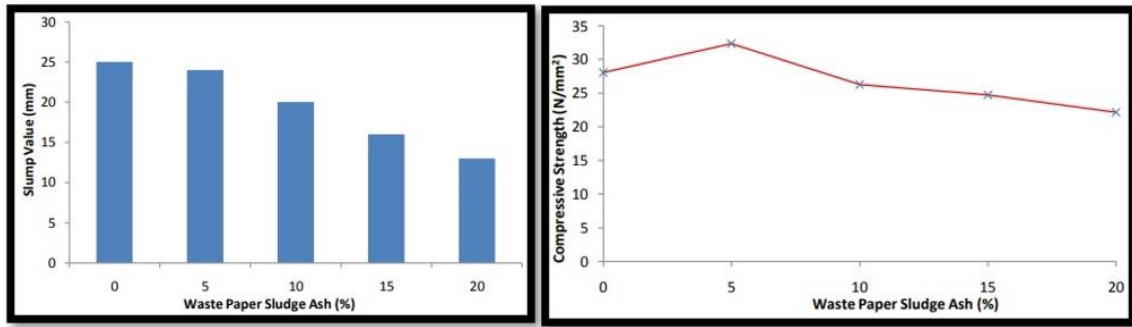


Figure II. 16: Affaissement (à gauche) et résistance à la compression (à droite) des bétons à cendre de boue de papeterie selon Ahmad et al.

Un autre type de cendre de boue de papeterie (PSA commercial) a fait l'objet d'une investigation. Wong et al. [26] ont constatés aussi que la variation de l'affaissement avec l'ajout de la poudre de boue de papeterie diminue significativement avec l'augmentation de cette poudre. Les mélanges de pâte et de béton sont devenus considérablement plus rigides à mesure que la quantité de la poudre augmentait. L'affaissement a diminué à un rythme plus rapide pour les échantillons de béton. Néanmoins, les échantillons étaient compactables et ne présentaient aucun signe de nid d'abeilles sur la surface coulée comme illustré sur la figure II.18.

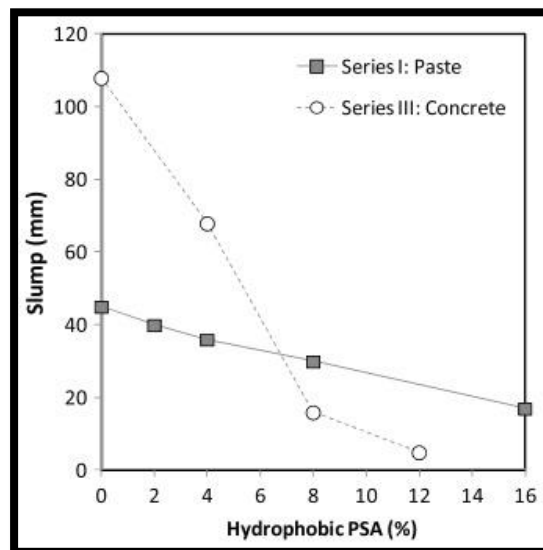


Figure II. 17: Affaissement des bétons et pâtes avec poudre de boue de papeterie selon Wong et al.

En ce qui concerne la résistance à la compression un optimum de 8% a été détecté (Tableau II.6). En examinant de plus près, Ils ont observé que de nombreux petits agglomérats contenant de l'eau de mélange piégée s'étaient formés. La poudre se fixe sur la goutte d'eau et forme un film qui finit par recouvrir toute la surface de la goutte (Figure II.19). L'eau est contenue et efficacement piégée dans le film produit par les particules. Une partie de l'eau de

mélange est donc enfermée par la poudre et empêché de mouiller les ingrédients. Cela augmente avec le taux de la poudre. En conséquence, la quantité d'eau libre disponible est réduite entraînant la baisse des résistances.

Tableau II. 6: Densité et résistance des bétons avec poudre de boue de papeterie selon Wong et al.

PSA (%)	Density (kg/m ³)		Compressive strength (MPa)	
	3 days	28 days	3 days	28 days
0	2368 (1.6)	2354 (6.4)	47.5 (0.5)	64.5 (0.9)
4	2359 (3.8)	2354 (4.3)	47.1 (0.4)	64.0 (0.6)
8	2358 (1.8)	2362 (2.9)	50.0 (0.5)	65.0 (0.3)
12	2337 (1.5)	2338 (3.0)	49.4 (0.9)	61.7 (0.6)

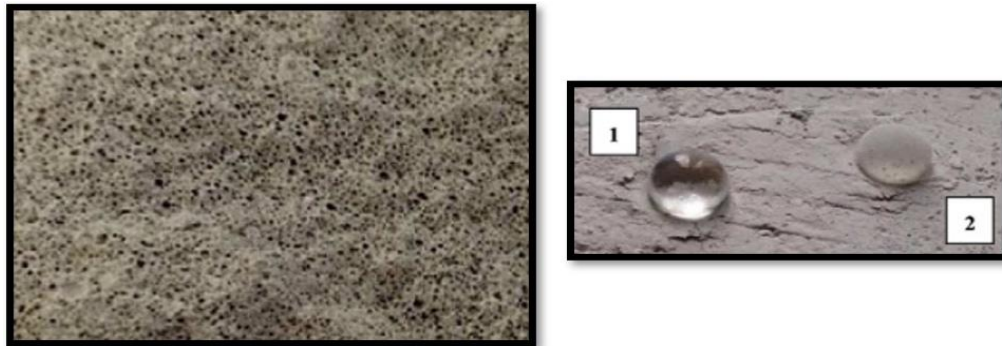


Figure II. 18: A gauche pâte avec 50 % de PSA. A droite gouttelette d'eau (1) placée sur PSA, gouttelette (2) recouverte d'un film mince de PSA selon Wong et al.

8-La cendre de bagasse

8-1-Définition

La transformation industrielle des cannes à sucre conduit à différents sous-produits : la bagasse, les écumes et la mélasse, qui peuvent être valorisés au niveau agricole. La bagasse est le résidu fibreux de la canne à sucre qu'on a passée par le moulin pour en extraire le sucre. Elle est composée principalement de la cellulose de la plante (Figure II.19).



Figure II. 19: La fibre de bagasse.

8-2- Caractéristiques des bétons à cendre bagasse

La cendre de bagasse de canne à sucre est principalement composée de silice amorphe et peut être utilisée comme matériau pouzzolanique dans les matériaux cimentaires.

Jha et al.[27] ont élaborés des ciments à base de cendres de bagasse de canne à sucre (SCBA) avec différents niveaux de remplacement de ciment (5, 10, 15, 20, 25%). Ils remarquèrent une diminution progressive de la résistance à la compression au-delà de 10% de remplacement du ciment par SCBA (Figure II.20). Cette augmentation est due aux propriétés pouzzolaniques, physiques et chimiques de SCBA. La surface spécifique élevée possédée par SCBA peut être responsable de l'augmentation. La diminution de la résistance au-delà de 10% de remplacement peut être due à une adhérence inadéquate de la cendre de bagasse avec la surface de l'agrégat et du ciment, par conséquent, a entraîné une réduction de la force de liaison entre l'agrégat et le ciment dans le mélange de béton.

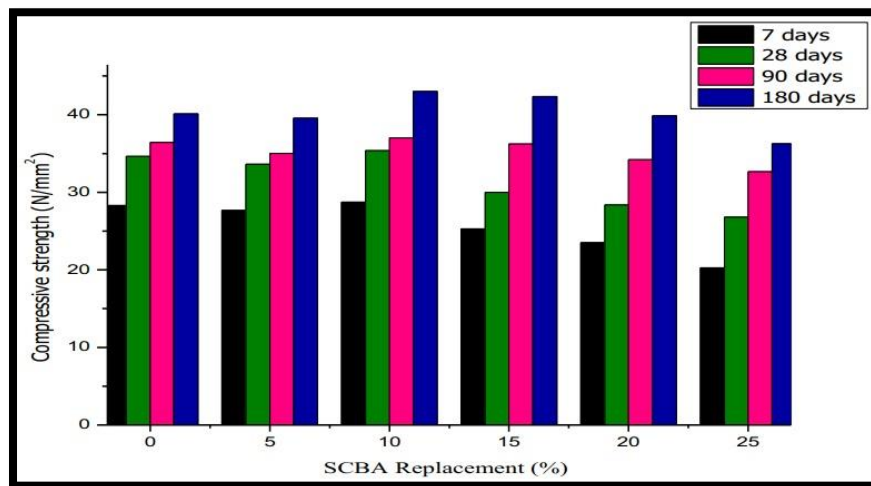


Figure II. 20: Résistances à la compression des bétons à SCBA selon Jha et al.

Cette activité pouzzolanique a été détecté par Ribeiro & Morelli[28]. Lors de l'essai de pouzzolanité, (Figure II.21) les concentrations en ions CaO et OH^- diminuent dans la solution lorsque le SCBA a été ajouté, et une action pouzzolanique nette est observée pour les mélanges contenant du SCBA indépendamment de la température de calcination des cendres.

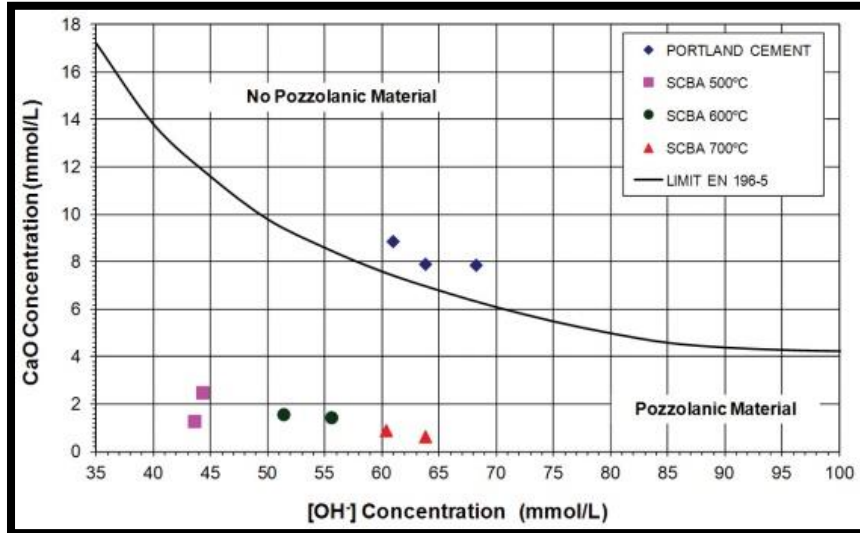


Figure II. 21: Etude de la pouzzolanité des SCBA selon Ribeiro & Morelli.



Chapitre III

Valorisation des céramiques dans
les bétons

III.1. Effet des granulats en céramique sanitaire

Dans la catégorie des granulats grossier (20mm), Rashid et al. [29] ont remplacé 10, 20 et 30% de granulats naturels arrondie par des granulats de céramique sanitaire recyclé. Ils constatèrent que l'ouvrabilité diminue avec l'augmentation de la quantité de déchets céramiques (Figure III.1). Les raisons de la diminution de l'ouvrabilité peuvent être dues aux propriétés des déchets céramiques. Un côté des granulats céramiques ayant une surface vitreuse et l'autre côté contient de l'argile capable d'absorber une quantité importante d'eau, ce qui entraîne une diminution de son niveau de maniabilité, ainsi que la porosité et la forme du granulat.

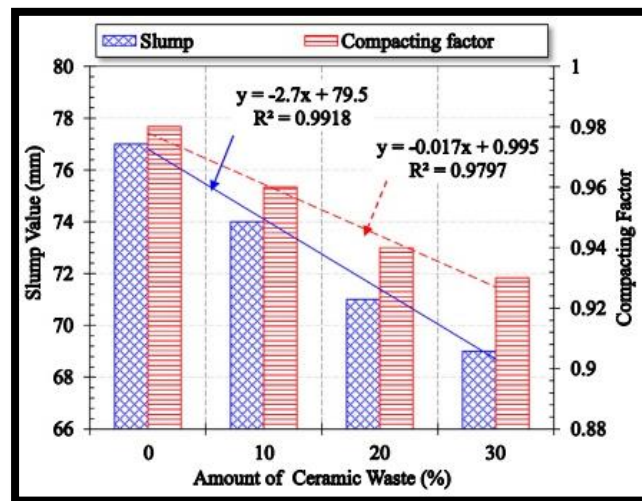


Figure III. 1: Affaissement des bétons selon Rashid et al.

Une amélioration de la résistance mécanique est obtenue grâce à la forme rugueuse des granulats de déchets céramiques (Figure III.2) et donc une plus grande surface de liaison avec la pâte de ciment. De plus, une absorption d'eau plus élevée des déchets céramiques par rapport au granulat naturel fournit un environnement approprié pour une hydratation supplémentaire du béton et une augmentation de la résistance mécanique. Parce qu'il s'agit d'un matériau poreux qui agit comme un milieu de durcissement humide pour l'hydratation de la pâte de ciment, réduit le retrait autogène qui se traduit finalement par une augmentation de sa résistance mécanique.

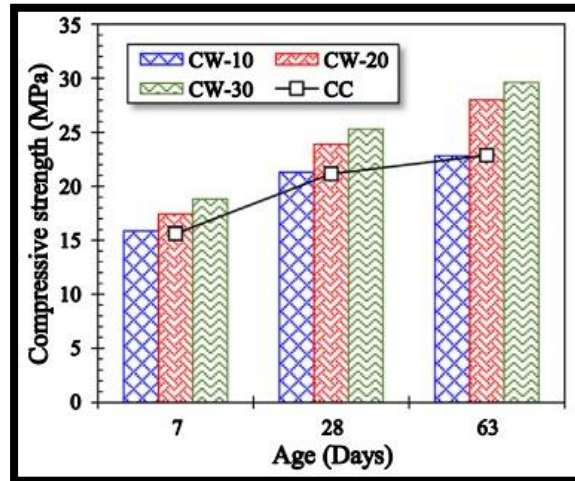


Figure III. 2: Résistance à la compression des bétons selon Rashid et al.

Un granulats arrondi avec une surface lisse et sans arêtes vives de fraction granulaire a été remplacé par déchets sanitaires de fraction granulaire 4/12.5mm à hauteur de 20 et 25%. Medina et al. [30] ont remarqué que les bétons enregistrés un affaissement de 6 à 9 cm (consistance plastique). Cette valeur diminue (Tableau III.1) à mesure que le taux de remplacement augmentait, en raison des différences entre les propriétés physiques des granulats céramiques naturels et recyclés comme l'indice d'aplatissement, la porosité total et l'absorption d'eau.

La masse volumique, à son tour, a également diminuait avec l'augmentation des proportions des granulats recyclés en raison de la densité plus faible de ce produit par rapport au matériau naturel.

Tableau III. 1: Consistance et masse volumique des bétons élaborés par Medina et al.

Concrete	Slump (mm)	Bulk density (kg/m ³)
RC	75 ± 0.64 ^a	2390 ± 10.2
CC-20	72 ± 0.58	2370 ± 9.7
CC-25	71 ± 0.61	2360 ± 6.8

La résistance à la compression et à la traction à 28 jours pour les bétons étudiés. L'utilisation des granulats recyclés a permis d'améliorer la résistance à la compression et à la traction de 12 % et 26 %, respectivement, par rapport au béton de référence.

Les bétons de granulats recyclés présentent de meilleures valeurs de résistance en raison principalement des caractéristiques intrinsèques des granulats céramiques sanitaires (forme et texture de surface), qui améliorent l'interface de pâte de granulats, en raison de la forme plus irrégulière, ce qui se traduit par une surface spécifique supérieure à celle naturelle.

Cette forme irrégulière et cette surface rugueuse fournissent une liaison plus élevée entre l'agrégat céramique recyclé et la pâte, comme le montre la figure III.3.

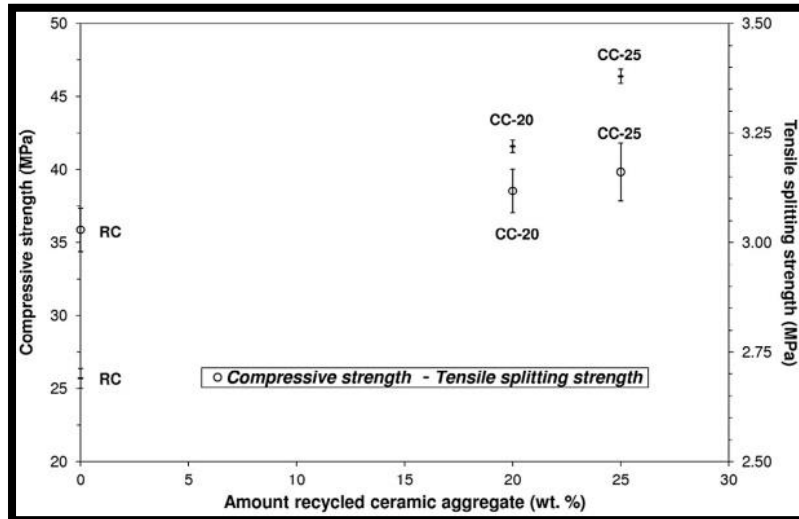


Figure III. 3: Résistance à la compression et à la traction des bétons à 28 jours selon Medina et al.

Dans une autre étude Medina et al. [31] ont substitués (15%, 20% et 25%) des granulats grossiers naturels (4/12.5mm) par des déchets de céramique sanitaire. Ils trouvèrent que le comportement mécanique, tant en compression qu'en traction, est meilleur pour les bétons à granulats recyclés que pour le béton de référence. De plus, les deux résultats montrent également qu'au fur et à mesure que le pourcentage de granulats grossiers naturels remplacés par des granulats céramiques recyclés augmentait, le comportement des bétons résultants s'améliorait, comme l'indique la figure III.4

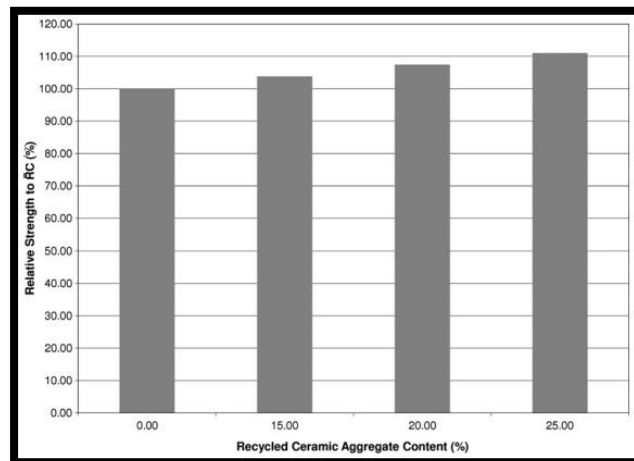


Figure III. 4: Rapport de résistance à la compression des bétons à 28 jours selon Medina et al.

Canbaz [32] quant à lui a fait éclaircir le fait de l'augmentation de la résistance mais la diminution du module dynamique. Lorsqu'ils sont utilisés à la place de la pierre concassée, Le module d'élasticité dynamique est calculé en fonction du poids unitaire qui se trouve réduit à cause de la légèreté des granulats céramique et l'UPV. Les résistances à la compression augmentent de 35 % à 25% de substitution. La résistance à la compression a été réduite par

rapport au témoin lorsque le taux d'utilisation des granulats de déchets céramiques était supérieur à 25 %. Il observé que les granulats céramiques ont une structure plus homogène ce qui est bénéfique pour la résistance à la compression du béton. L'adhérence mécanique du béton avec les déchets de granulats céramiques concassés était faible, car la rugosité de surface des granulats de déchets céramiques était supérieure à celle des granulats de pierre concassée. Pour cette raison, une très forte baisse a été observée dans la résistance à la flexion.

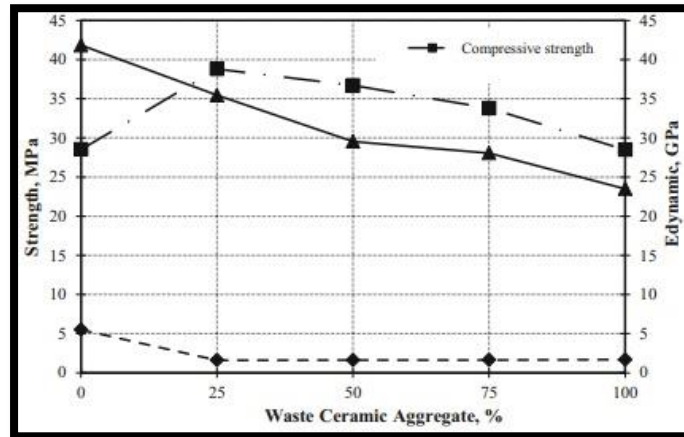


Figure III. 5: Résistance à la compression, flexion et module d'élasticité dynamique des bétons selon Canbaz.

Ghos et al. [33] ont aussi constatés la diminution de la résistance à la compression. Avec un rapport E/C=0.5 et la substitution par incrément de 25% des granulats concassés grossiers, la résistance à la compression des bétons élaborés diminuée avec chaque incrément de substitution. A 100% de remplacement, la résistance à la compression du béton de granulats de déchets céramiques est de 16,5 MPa (Tableau III.2). Cela est dû au fait que le béton de granulats céramiques avait une zone de transition interfaciale faible, en raison d'une mauvaise liaison entre la pâte de ciment et les granulats grossiers de céramique en raison de sa nature porcelaine.

Tableau III. 2: Résistance à la compression des bétons étudiés par Ghos et al.

Sl. No	Sample designation	% of replacement of ceramic waste aggregate	Strength (MPa)	
			7 days	28 days
1	C 00	00	19.6	23.8
2	C 25	25	18.0	21.1
3	C 50	50	17.0	19.6
4	C 75	75	15.9	18.1
5	C 100	100	14.7	16.5

Dans la figure suivante (Figure III.6), une micrographie d'un béton recyclé, avec une microanalyse des différents constituants, est illustrée par Medina et al. [31] Il ressort de cette analyse que la zone de transition interfaciale (ITZ) entre le granulat recyclé et la pâte est plus étroite, plus compacte, moins poreuse et moins marquée que celle entre le gravier et la pâte. Cela se traduit par un meilleur comportement mécanique, tout en produisant un béton plus durable puisque la nouvelle ITZ entre granulats recyclés et pâte est moins perméable. Cette union améliorée, est due à la forme plus irrégulière des déchets de céramiques sanitaires, car les granulats naturels sont arrondis et donc dépourvus de bords.

Le granulat céramique présente peu d'activité pouzzolanique dans la partie superficielle du fait de sa composition chimique et de sa granulométrie, celle-ci était néanmoins suffisante pour réagir avec la portlandite présente en périphérie du granulat, donnant naissance à des produits hydratés tels que les silicates de calcium hydratés (CSH) et des hydrates d'aluminates de calcium qui présentent une structure moins poreuse, plus compacte, formant une zone de transition agrégat/pâte plus stable. Le granulat naturel présente un caractère siliceux, tandis que le granulat céramique présente clairement deux aspects, une partie interne et une partie externe. La partie interne contenait des éléments chimiques, tels que Si, Ca, Mg, O et Fe, ainsi qu'une proportion moindre de Zr, typique des matériaux céramiques. La partie externe contenait les mêmes éléments, mais avec une proportion beaucoup plus élevée de Zr. Cet oxyde de zirconium est la matière de base de la céramique utilisée dans la fabrication de différents produits devant avoir une grande résistance à la propagation des fissures.

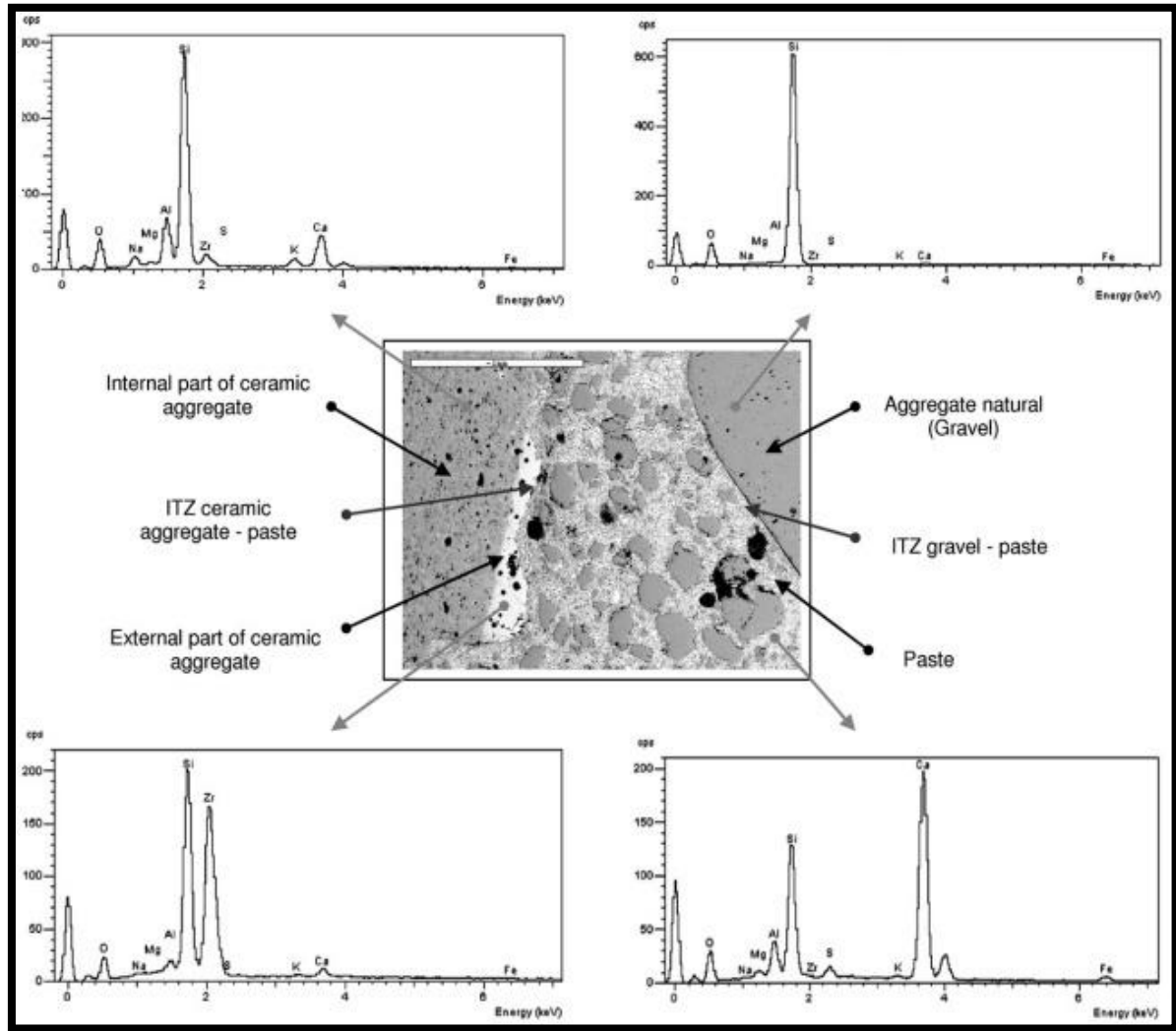


Figure III. 6: Image en microscope électronique au milieu et DRX des faces au alentours selon Medina et al.

Medina et al.[34] constatèrent une composition chimique avec une présence de Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , ce qui est typique des matériaux pouzzolaniques. Ainsi, le fait que ces déchets céramiques soient incorporés avec une granulométrie >4 mm fait que l'activité pouzzolanique sera présente à la partie superficielle du granulat exclusivement ce qui est suffisant pour produire une réaction avec une partie de la portlandite présente au voisinage du agrégat, donnant naissance à des produits hydratés ayant des propriétés d'agglomération tels que les silicates de calcium hydratés (CHS) et les hydrates d'aluminate de calcium avec une structure moins poreuse et compacte.

La structure typiquement peu cristalline ou quasi-amorphe des hydrates de silicate de calcium (CSH), qui formait une matrice dense, compacte et continue. Le rapport chaux sur silice (C/S) des CSH était de 1.6 pour les bétons recyclés et de 1.8 pour le béton témoin (Figure III.7).

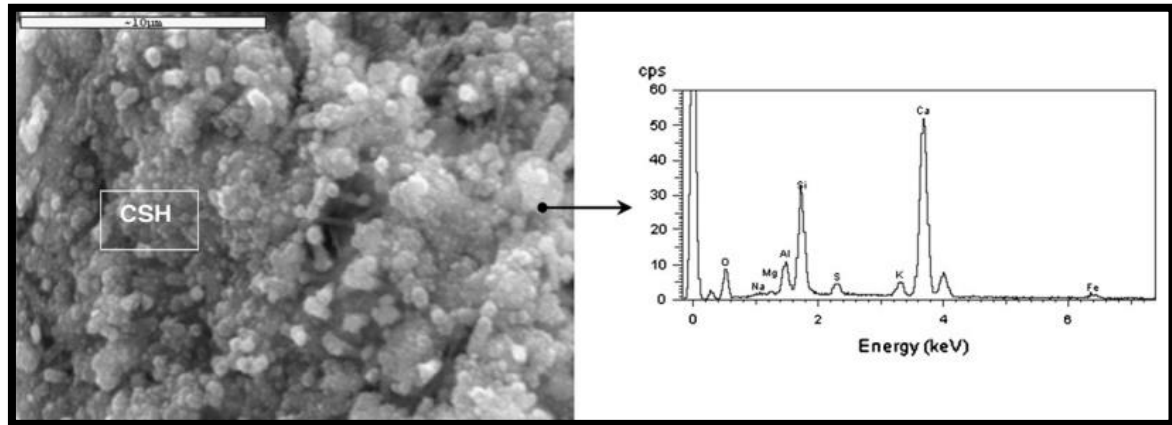


Figure III. 7: Microscopie électronique à balayage et étude à rayon X de (CSH) selon Medina et al.

La figure III.8 montre deux micrographies sur lesquelles on peut observer la formation de plaques de portlandite (CH) à la périphérie du granulat. La présence de CH est clairement mise en évidence sur les micrographies, caractérisée par sa forme cristalline allongée aux bords bien définis, positionnés perpendiculairement à la surface de l'agrégat.

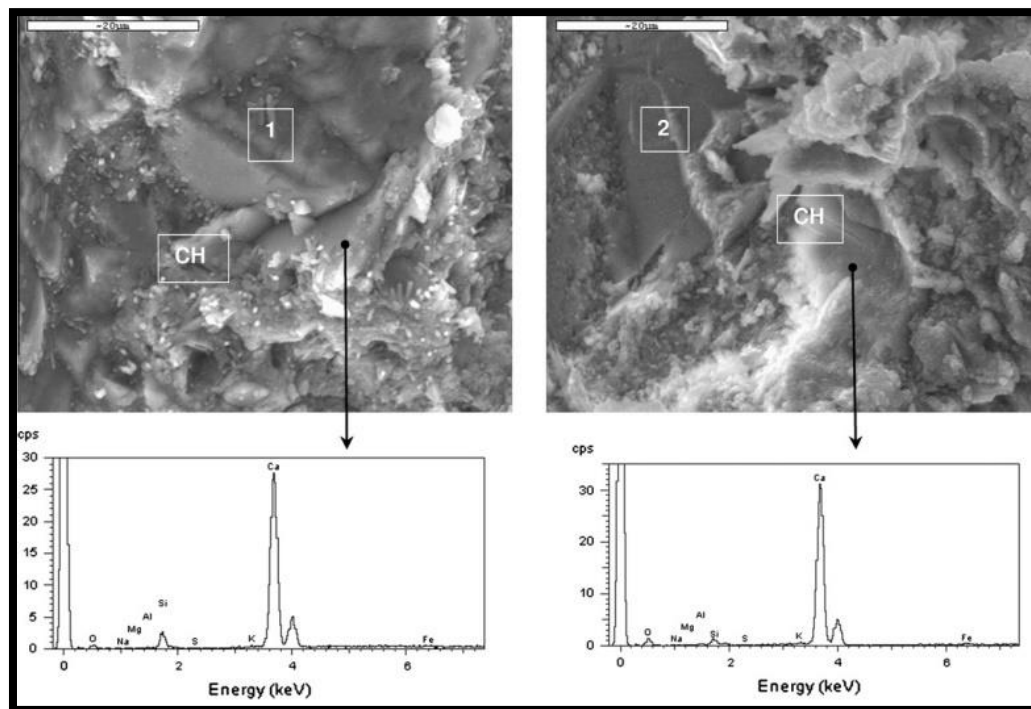


Figure III. 8: Micrographie de (CH) autour des granulats naturels (1) et granulat céramique recyclé (2) selon Medina et al.

La figure III.9 montre une structure typique d'ettringite à la fois dans du béton témoin (a) et dans le béton à granulat recyclé (b). L'ettringite (AFt) était présente en très faible quantité par rapport aux autres formations (CSH et CH). Le minéral a été trouvé dans des poches isolées et en petites quantités. Dans les deux types de béton, il était situé à l'intérieur des pores

qui, avec les fissures, constituent les sites où il se forme habituellement. La forme cristalline qu'il présentait était des cristaux aciculaires avec un aspect en forme de hérisson.

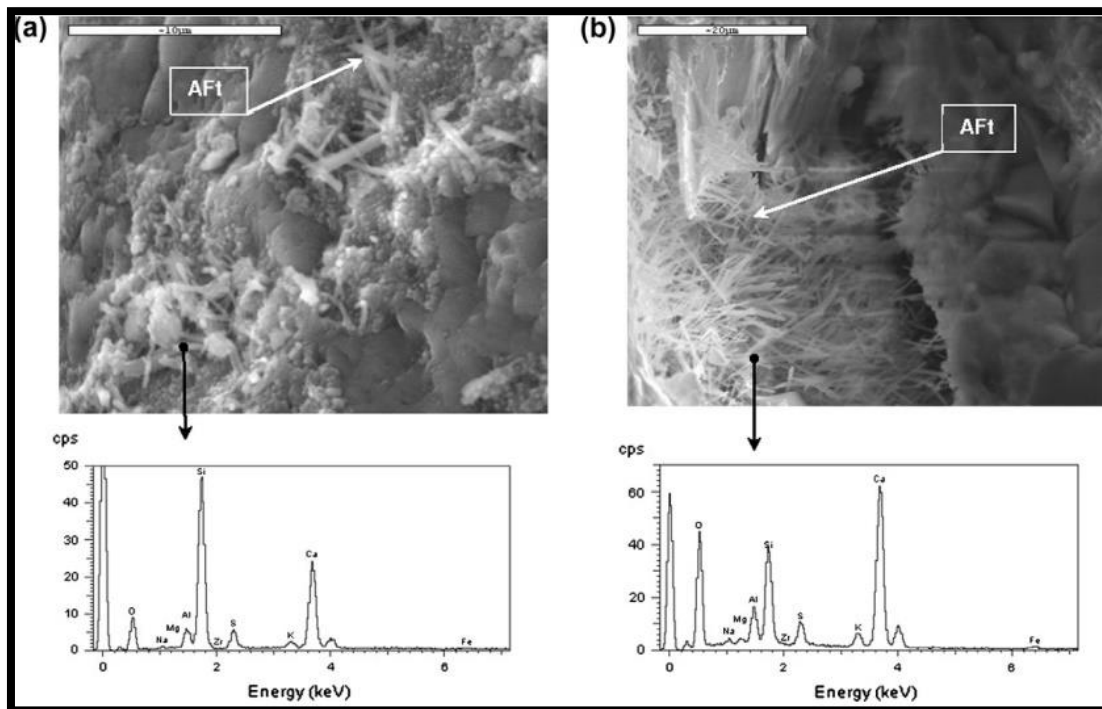


Figure III. 9: Micrographie de (AFt). (a) Béton de référence (b) Béton céramique recyclé selon Medina et al.

Dans leur travail visant à étudier l'effet du gel-dégel Medina et al. [35] ont conclu qu'après 56 cycles de gel-dégel, l'effondrement de ITZ était plus important au niveau du granulat/pâte naturel qu'au niveau de granulat/pâte céramique. Néanmoins Ils ont observé dans la résistance de la zone de transition interfaciale (ITZ) un : interface côté intérieur des granulats/pâte est restée pratiquement inchangée, tandis que la résistance le long de l'interface côté extérieur du granulat céramique/pâte a légèrement diminué sous la contrainte de gel-dégel. Ces différences sont principalement dues aux variations des propriétés micromécaniques au niveau ITZ ($ITZ_{partie\ interne/p\hat{a}te} > ITZ_{partie\ externe/p\hat{a}te} > ITZ_{gravier/p\hat{a}te}$), comme illustré à la figure III.10.

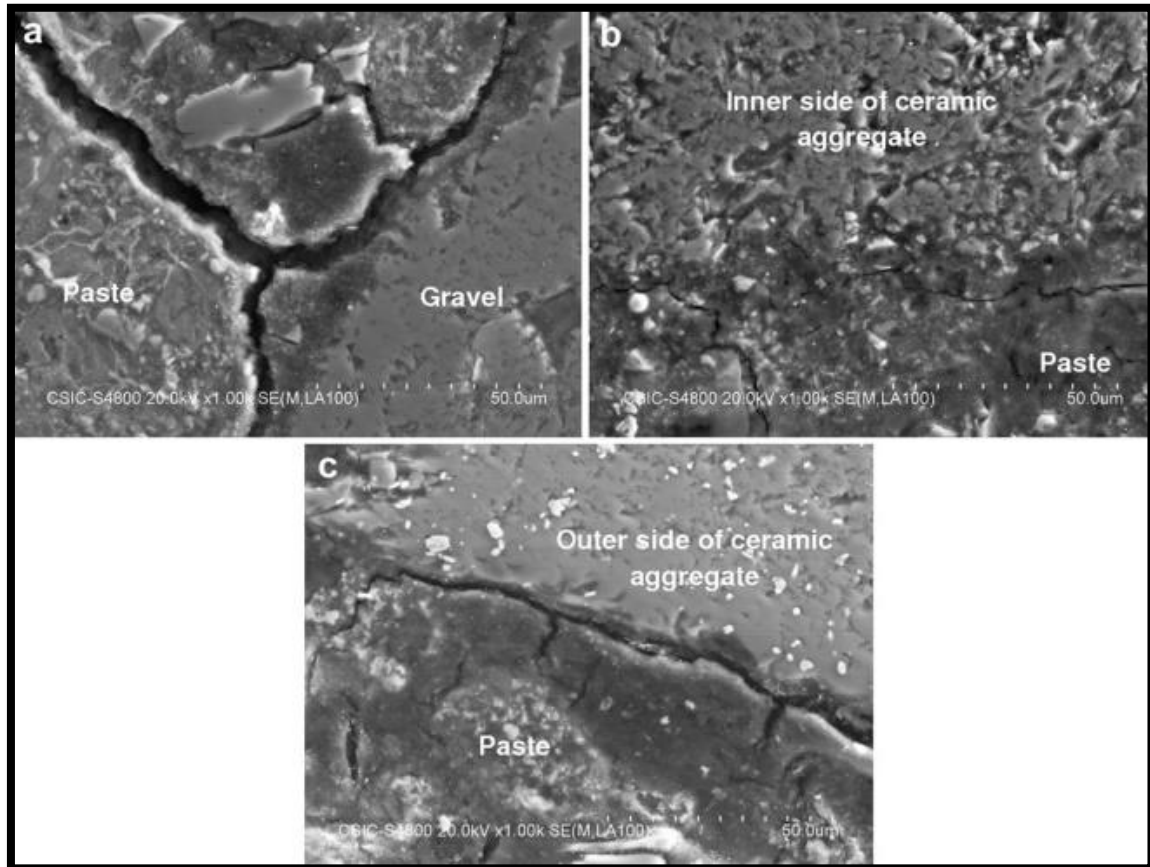


Figure III. 10: Dégâts subit par l'ITZ: a) granulats/pâte naturel ; b) granulats céramique interne /pâte ; c) granulats céramique externe /pâte selon Medina et al.

Afin de schématiser l'ITZ (Figure III.11), Zegardło et al.[36] ont élaboré des bétons avec des paramètres mécaniques de la céramique (C) et des granulats de basalte (B) similaires, cependant, la surface du granulats de basalte est moins rugueuse que la surface du granulats céramique. Cela s'est traduit directement par l'augmentation de l'adhérence du granulats céramique à la pâte de ciment, et donc par l'augmentation de la résistance mécanique de l'ITZ. Le renforcement mécanique de l'ITZ a entraîné une augmentation de la résistance à la compression du béton (CAC) de 3,6 % par rapport au (CAB).

Les échantillons de CAB avaient tendance à se délaminer dans l'ITZ. Les échantillons de CAC sont restés cohérents et aucun phénomène de délaminage ne s'est produit entre le granulats de céramique et la pâte de ciment. Dans le cas du CAC, la zone de destruction a traversé partiellement le granulats et partiellement la pâte de ciment – l'ITZ est restée intacte. Cela prouve la forte adhérence de la matrice de ciment à la surface de l'agrégat céramique. L'une des raisons est la rugosité de surface élevée de l'agrégat céramique.

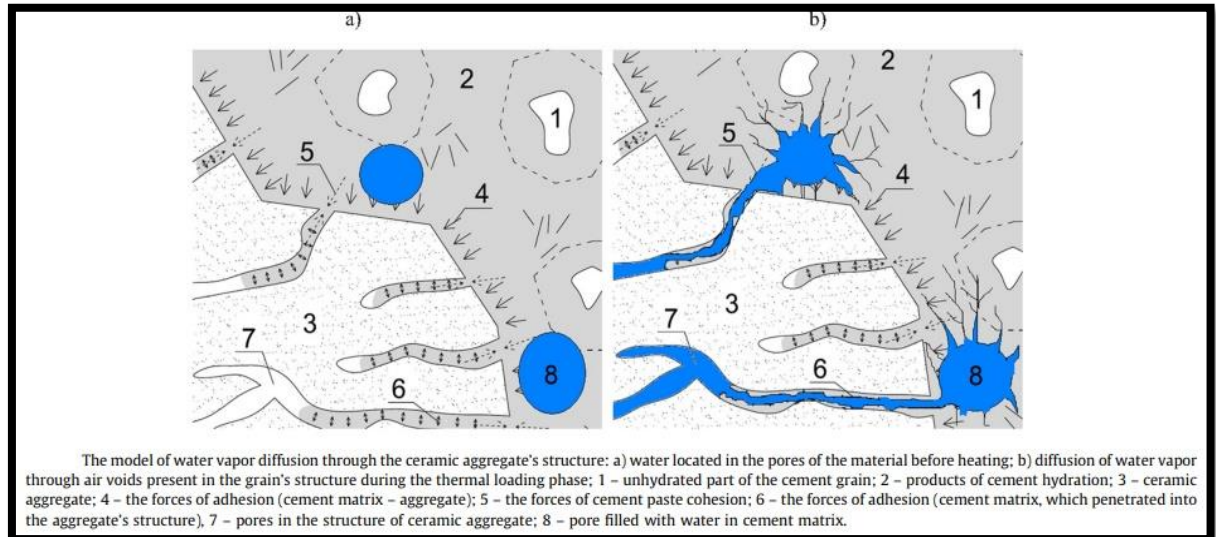


Figure III. 11: Schéma de l'ITZ lors d'un chauffage des bétons avec granulats céramiques selon Zegardlo et al.

La perméabilité au gaz d'oxygène (Tableau III.3) entre les bétons conventionnels et les bétons à granularité modifiés est pratiquement constante avec des pourcentages croissants d'agrégats de céramique comme l'indiqués Medina et al.[37]. Avec les mêmes matériaux et les mêmes pourcentages les augmentations sont mineures par rapport au bétons témoin RC. Ils sont de l'ordre de 1,42 % et 2,55 % dans CC-20 et CC-25, respectivement.

Tableau III. 3: Coefficient de la perméabilité à l'oxygène selon Medina et al.

Concrete mix	$K (10^{-17} \text{ m}^2)$
RC	6.40 ± 0.58^a
CC-20	6.49 ± 0.50
CC-25	6.57 ± 0.65

Après 90 jours d'exposition, les profondeurs de pénétration et le taux de carbonatation naturelle illustrés à la Figure III.12, n'indique aucune baisse dans la résistance. En fait, la résistance a même légèrement augmenté, de 2.89% et 3% respectivement dans CC-20 et CC-25, par rapport à RC. Ce comportement amélioré est lié à la distribution de la taille des pores, qui ont enregistré une diminution du volume mesurant plus de $0,067 \mu\text{m}$. De tels diamètres de pores ont favorisé la diffusion du CO_2 , car la molécule circule moins facilement à travers des pores plus petits et des systèmes de pores plus longs et plus sinueux.

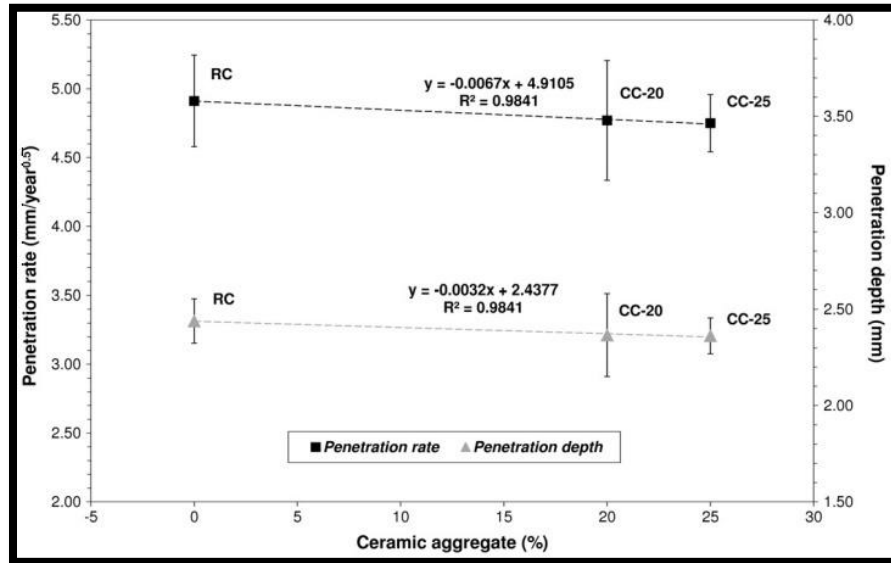


Figure III. 12: Profondeur de pénétration et taux de carbonatation des bétons à 90 jours selon Medina et al.

III.2. Effet des sables en céramique sanitaire

Avec un taux de remplacement de 20, 50 et 100 %, Alves et al. [38] ont remplacés les granulats fins (au-dessous de 4mm) leurs équivalents en granulats de céramique recyclés (SWC). Comme Medina et al. [31] le rapport E/C a été calibré (Tableau III.4) de manière à maintenir le niveau d'ouvrabilité presque constant. D'ailleurs ce rapport augmente avec l'augmentation du remplacement, et le remplacement à hauteur de 100% requiert l'ajout d'un superplastifiant.

Tableau III. 4: Rapport E/C utilisés par Alves et al.

Mix	Acronym	Apparent w/c	Effective w/c
Reference concrete	RC	0.53	0.53
Sanitary ware concrete with 20% aggregate replacement	SWC20	0.76	0.76
Sanitary ware concrete with 50% aggregate replacement	SWC50	0.78	0.78
Sanitary ware concrete with 100% aggregate replacement	SWC100	0.86	0.86

La résistance à la compression a diminué considérablement avec l'augmentation du taux de remplacement. La perte maximale de résistance, par rapport au béton de référence, était respectivement de 49.8, 42.5 et 34.9 % (Figure III.13). Cette diminution est due à l'augmentation du rapport effectif E/C, qui a contribué à la diminution de la résistance de la pâte. Ceci étant connue car l'excès d'eau dans le mélange (plus que celui strictement nécessaire pour les réactions d'hydratation) peut entraîner une augmentation de la maniabilité, mais conduit à une plus grande porosité et à une perte conséquente de résistance à la compression.

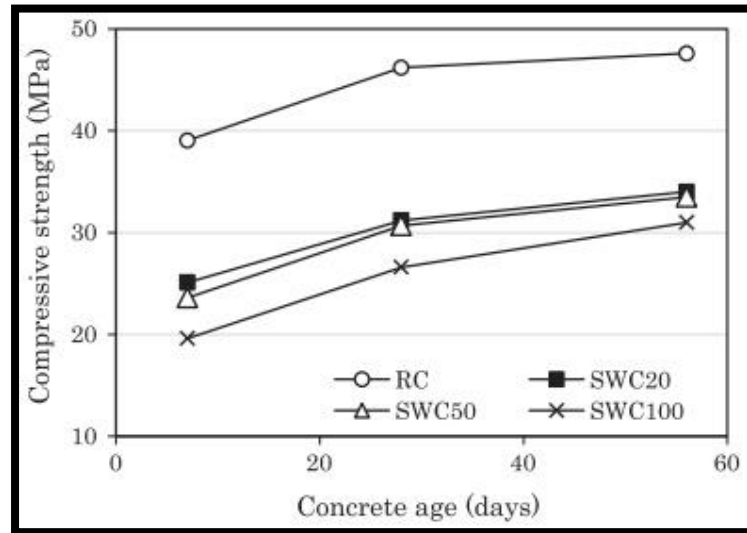


Figure III. 13: Résistance à la compression des bétons à 28 jours selon Alves et al.

Canbaz [39] a répertorié les valeurs d'affaissement et la propagation des ondes sonores (UPV) des bétons avec des déchets de granulats de céramique. La céramique broyée est concassée et utilisée comme granulats fins dans le béton avec des substitutions allant de 0, 25, 50, 75 et 100 %.

L'effet de cette substitution sur l'affaissement est sa diminution avec l'augmentation du remplacement. Les déchets de céramique concassés avaient moins de surface que la pierre concassée. Ainsi, sa surface était entièrement recouverte de couches d'eau plus élevées à facteur d'eau constant. Cette situation avait conduit à une augmentation de la consistance et donc à un affaissement accru (Figure III.14).

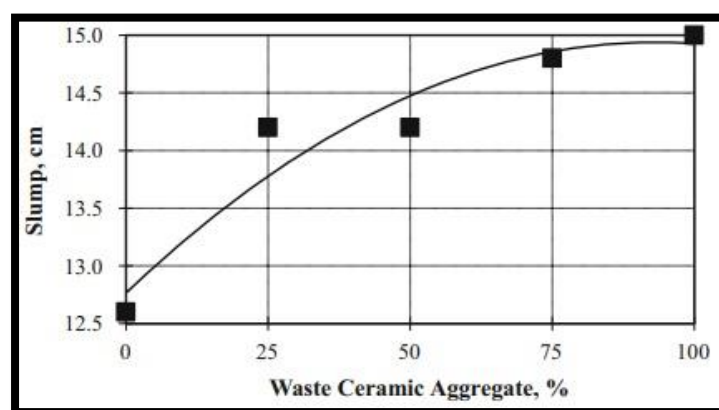


Figure III. 14: Affaissement des bétons selon Canbaz.

La figure III.15 montre que l'UPV des bétons est compris entre 3.93 et 4.12 km/sec et que les masses volumiques sont comprises entre 1.492 et 2.416 kg/dm³. Les déchets de céramique concassés sont plus amorphes que la pierre concassée, et cette situation affecte la maniabilité. Cela conduit à la diminution des taux d'UPV. La masse volumique quant à elle,

est en relation avec les déchets de céramique de masse plus faible que la pierre concassée, et ces granulats forment 70 à 75 % du béton.

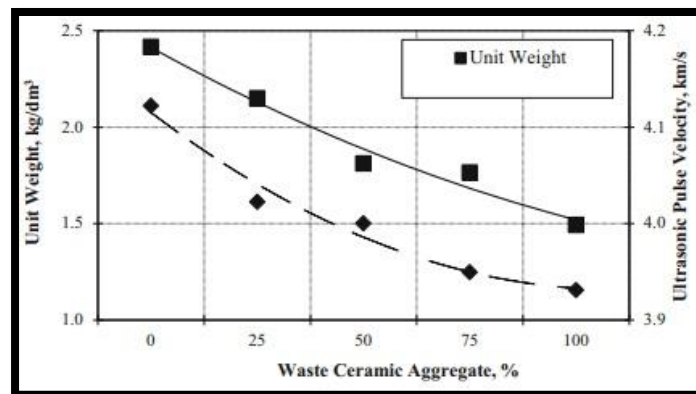


Figure III. 15: Masse volumique et UPV des bétons selon Canbaz.

Pacheco-Torgal & Jalali [40] avec le même rapport $E/C=0.5$ et un remplacement total des granulats fin, mais avec des sables d'origine céramique sanitaires pré-saturés, ont constaté l'inverse des autres chercheurs. Les résultats obtenus (Figure III.16) indiquent que la résistance est plus élevée pour le béton avec du sable céramique (MCS) que le béton témoin avec des granulats traditionnels. L'explication tient du fait que les sables céramiques sont utilisés à l'état pré-saturé, fournissant ainsi de l'eau pour l'hydratation du ciment.

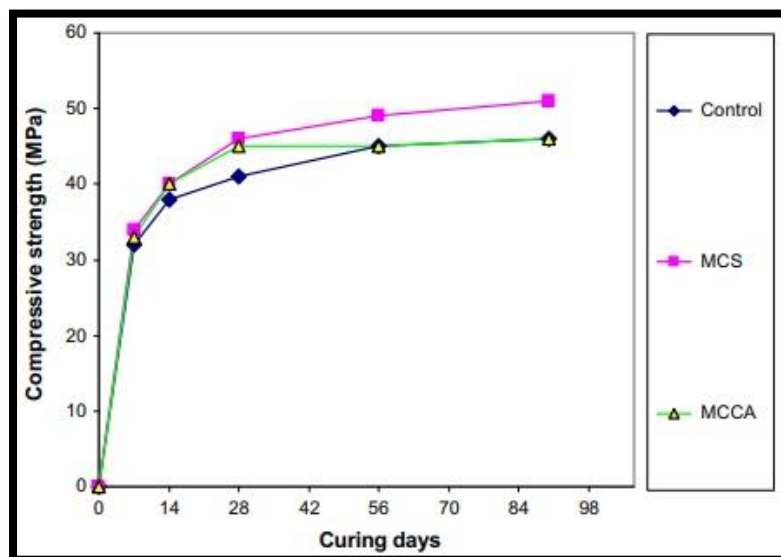


Figure III. 16: Résistance à la compression des bétons étudiés par Pacheco-Torgal & Jalali.

Avec un rapport $E/C=0.55$ et un remplacement de 14, 20 et 30% en poids des sables naturels par des céramiques, Pitarch et al. [41] ont constaté aussi la diminution des résistances à la compression. Les valeurs de densité et de résistance à la compression des bétons, sont résumées dans le tableau III.5. On remarque que les résultats de densité ont diminué avec l'augmentation de la teneur en déchets de céramique, ce qui est attribué à la densité plus faible

des particules de sables céramiques. La substitution des sables naturels en poids, implique un volume plus important de granulats recyclés.

Les bétons à sables de céramiques sanitaires recyclés CSW présentait des propriétés mécaniques similaires à celles des échantillons de référence, qui diminuaient légèrement avec l'augmentation de la teneur en déchets. Cette perte de résistance observée avec l'augmentation des teneurs en CSW a été attribuée au coefficient d'aplatissement SI élevé, à la forme angulaire, à la surface lisse et à l'absorption d'eau réduite de ces particules de céramique. Alors que les deux premiers paramètres rendent difficile le compactage des sables, les deux derniers réduisent l'adhérence mécanique entre les particules de CSW et la pâte liante.

Tableau III. 5: Masse volumique et résistances des bétons étudiés par Pitarch et al.

Concrete mix	Density (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	
		7 days	28 days
RC	2510 ± 2.85	31.51 ± 0.99	37.80 ± 1.79
CSW14	2450 ± 2.91	31.37 ± 1.13	36.58 ± 0.59
CSW20	2445 ± 4.73	30.40 ± 0.04	35.72 ± 0.37
CSW30	2428 ± 5.18	31.02 ± 0.39	35.62 ± 1.07

Du côté de la durabilité, les résultats de perméabilité à l'oxygène (Figure III.17) confirment les bonnes performances des mélanges de béton avec sables céramiques. En ce qui concerne la perméabilité à l'eau, le mélange à sable céramique ne présente pas de différences significatives. Quant à la diffusion des chlorures, elle confirme les bonnes performances des bétons à base de sable céramique.



Figure III. 17: Perméabilité à l'oxygène et l'eau à gauche ; Diffusion des ions chlorures à droite des bétons étudiés par Pacheco-Torgal & Jalali.

Lors du test de résistance au gel-dégel, les échantillons utilisés par Klimek et al.[42] se sont avérés résistants. Après 25 cycles, la résistance la plus faible a été enregistrée pour les échantillons avec sable de quartz. Les échantillons CI/F, CII/F et CIII/F contenant des sables de céramique se sont avérés résistants à des températures variables (Figure III.18). Aucune

perte de masse majeure, aucune rayure ou fissure n'a été constatée. La plus petite réduction de masse de 0,1 % a été constatée pour les échantillons C III/F.

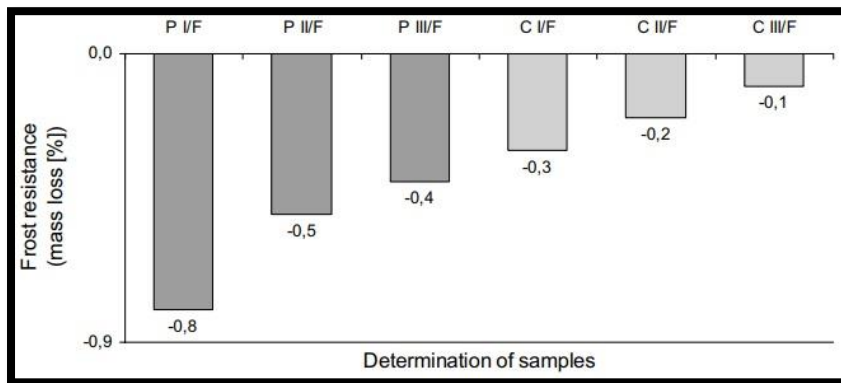


Figure III. 18: Résistance aux cycles gel-dégel des mortiers étudiés par Klimak et al.

Après ces 25 cycles de gel-dégel, les échantillons (C) contenant des sables céramiques ne présentaient aucune trace de destruction de surface. La figure III.19 indique qu'après 25 cycles de gel-dégel, la fissuration et la dégradation se sont avérées plus importantes que dans les mortiers avec un des sables naturels que dans des mortiers contenant des sables issus du recyclage.

Les fissures sont plus larges et sont plus nombreuses dans les mortiers contenant des granulats de quartz (PI/F, PIII/F) qui ont tendance à se propager perpendiculairement à l'extérieur à partir de la surface des sables. Les mortiers (C) sont plus compacts avec une petite quantité de petits pores et ne présentent ni fissures ni rayures.

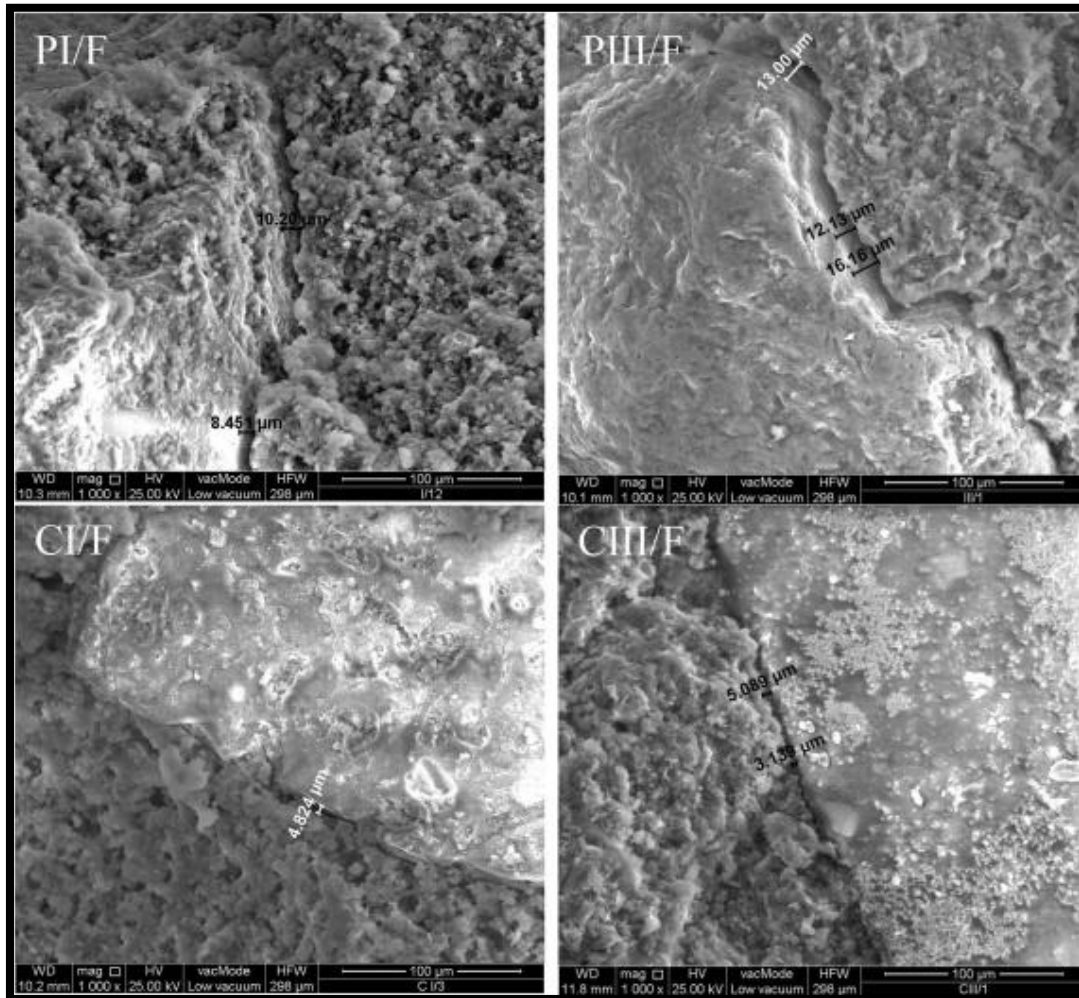


Figure III. 19: Répartition des microfissures à l'interface sable/pâte dans les échantillons des mortiers étudiés par Klimak et al.

Afin d'apprécier une autre qualité des céramiques comme sable, Ogradnik et al. [43] ont mesurés le stockage d'énergie thermique (TES). Deux types de ciment (Portland et alumineux) avec un remplacement du sable naturels par des céramiques pour la confection du mortier ont été choisis (CCA-PC et CCA-AC).

L'objectif de la première étape est l'estimation des capacités TES initiales des matériaux sélectionnés. La deuxième étape était une répétition de l'expérience, mais il était supposé chauffer les échantillons à une température similaire à celles régnant dans le foyer du feu. L'objectif était d'évaluer la puissance thermique dans la plage de température de fonctionnement du foyer.

Malgré la même taille des échantillons et le fait qu'ils aient été laissés dans les mêmes conditions thermiques (Figure III.20), ils ont montré des caractéristiques thermiques différentes. Après le processus de chauffage (première étape), l'analyse du comportement thermique indique la supériorité des bétons (avec le granulat céramique) sur les céramiques traditionnelles en termes de TES.

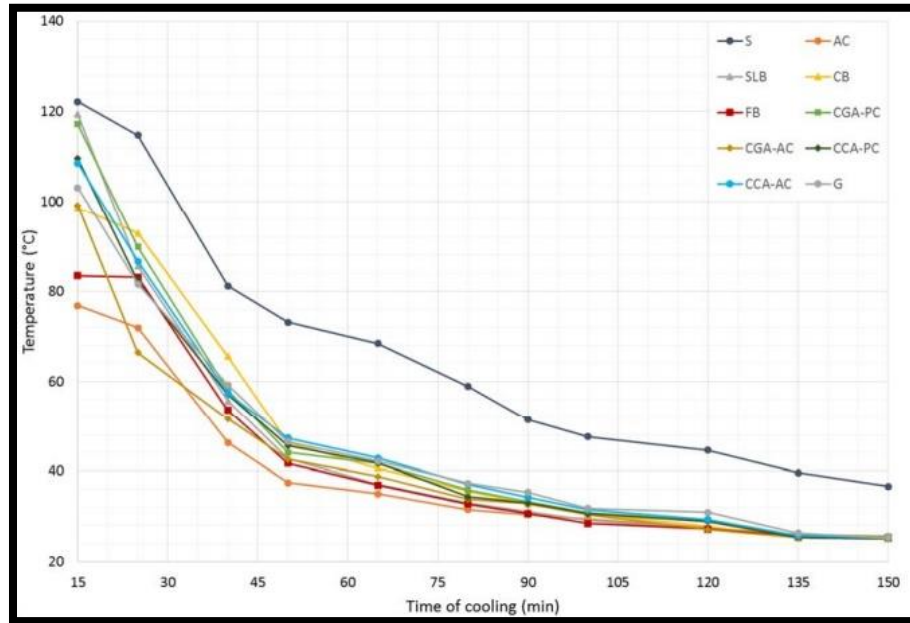


Figure III. 20: Température des matériaux lors du refroidissement (première étape) étudiés par Ogrodnik et al.

La température initiale après chauffage des bétons fabriqués avec des granulats céramiques était supérieure à celle de presque tous les matériaux (CCA-PC et CCA-AC, à 354 °C et 349 °C, respectivement). Le test à 400 °C montre que les propriétés TES des bétons à base de granulats céramiques sont meilleures lorsque la température de fonctionnement augmente (Figure III.21).

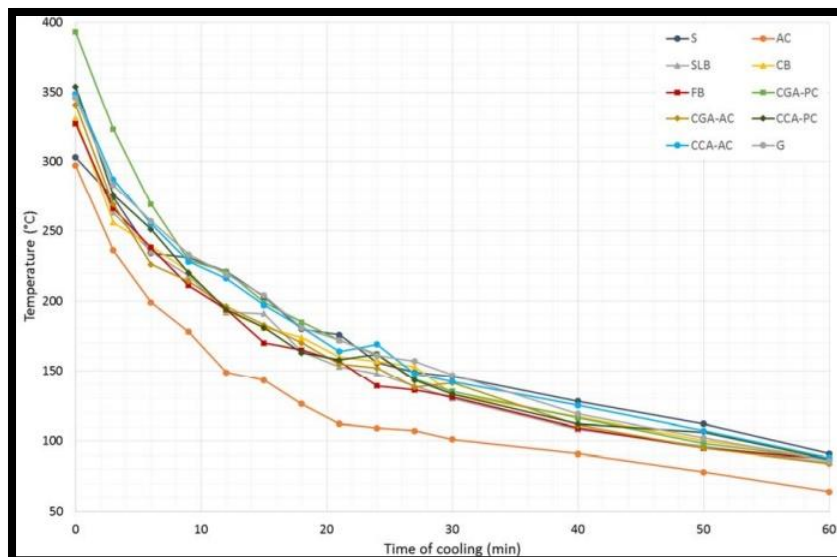


Figure III. 21: Température pendant la deuxième étape étudiée par Ogrodnik et al.

La figure III.22, tirée du travail de Abadou et al. [44] illustre la perte de masse des mortiers à 10, 20, 30, 40, 50% de sable céramique en substitution d'un sable dunaire, en fonction de la durée d'immersion dans une solution acide à 5% HCl et 5% H₂SO₄.

Une perte permanente est observée pour les mortiers immergés dans une solution d'acide chlorhydrique. Après 24 h jusqu'à l'âge de 90 jours, il est clair que les mortiers MS10, MS20, MS30 et MS40 contenant des déchets sanitaires céramiques augmentent leur capacité à résister à l'attaque de l'acide chlorhydrique. Une seule exception a été observée dans le mortier à 50% (MS50) d'incorporation qui développe un gain maximum en perte de masse supérieur au mortier de référence (MD).

Après une immersion de 90 jours dans la solution d'acide sulfurique, les mortiers de déchets céramiques développent un gain maximum de perte de masse de et 10 % pour 50 % de taux de substitution de déchets céramiques sanitaires. En revanche, pour les mortiers à base de sable de dunes et d'alluvions de dunes (Les mortiers témoins ou mortiers de référence), il augmente de 15% et 60%. Ce fait explique l'association bénéfique des déchets de la céramique sanitaire dans la densification de la structure poreuse du mélange et l'évolution de la réaction d'hydratation. Le gain de masse est le résultat du dépôt de gypse formé par la réaction entre le ciment portlandite et l'acide sulfurique.

Le gypse déposé est ensuite lessivé ; la dégradation des matériaux de cimentation (ou matériaux cimentaires) dans ces conditions environnementales se caractérise par une solution totale de portlandite et une décalcification progressive des CSH, et dans d'autres proportions, de l'ettringite et du monosulfoaluminate. La perte de masse est due au fait que le ciment Portland, après hydratation, libère une quantité considérable d'hydroxyde de calcium (CH) libre qui peut être lessivé lorsqu'il est soumis à un acide.

La surface extérieure des spécimens prismatiques de dunes et de mortier de sable alluvial immergé dans (H_2SO_4 , HCl) a été érodée par rapport au mortier de déchets céramiques immergé dans (H_2SO_4 , HCl). En effet, les céramiques ont généralement une bonne résistance chimique aux acides faibles et aux bases faibles. Cependant, les acides très forts ou les bases fortes ont tendance à produire des réactions d'échange d'ions et à dissoudre les structures.

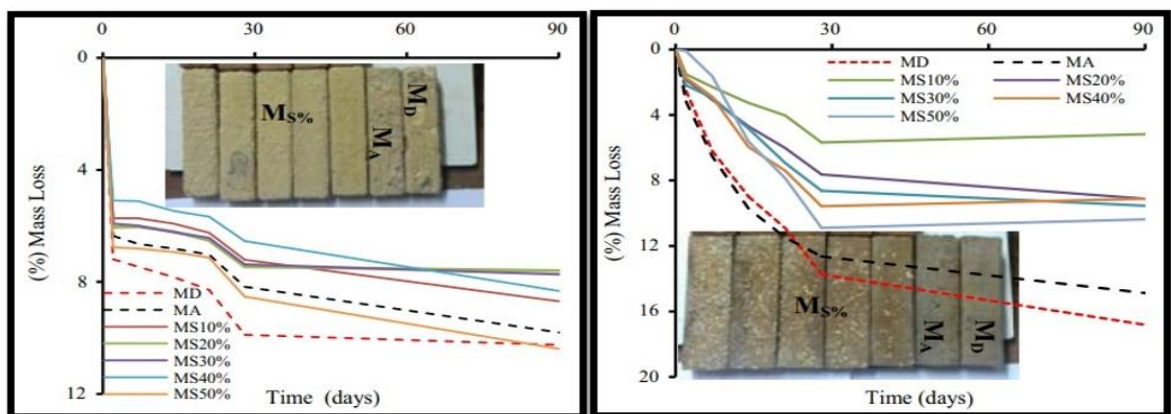


Figure III. 22: La perte de masse en fonction du temps d'immersion en (5%HCl) à gauche et (5% H_2SO_4) à droite selon Abadou et al.

III.3. Effet des poudres en céramique sanitaire

Atkuri & Rao [45] ont remplacés le ciment par une la poudre de déchets céramiques de granulométrie inférieure à 90 microns et entre 90 microns et 150 microns avec remplacement de 10% à 50% dans des bétons de classe M20 et M40. Ils ont conclu que dans les deux classes de bétons la résistance à la compression diminue (Figure III.23 et III.24) lorsque le remplacement du ciment par de la poudre de déchets céramiques (de taille < 90 microns et 90-150 microns).

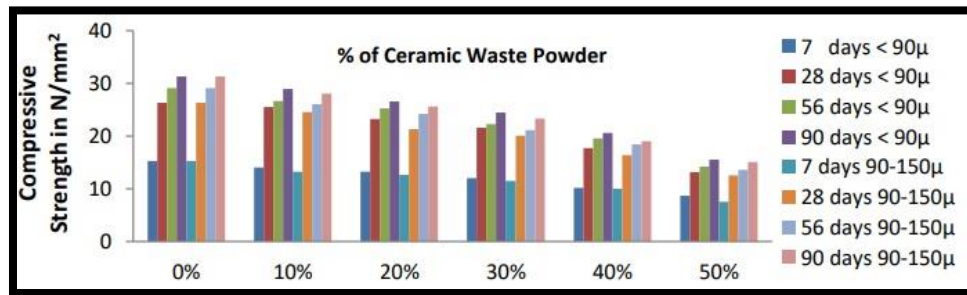


Figure III. 23: Résistance à la compression des bétons de classe M20 selon Atkuri & Rao.

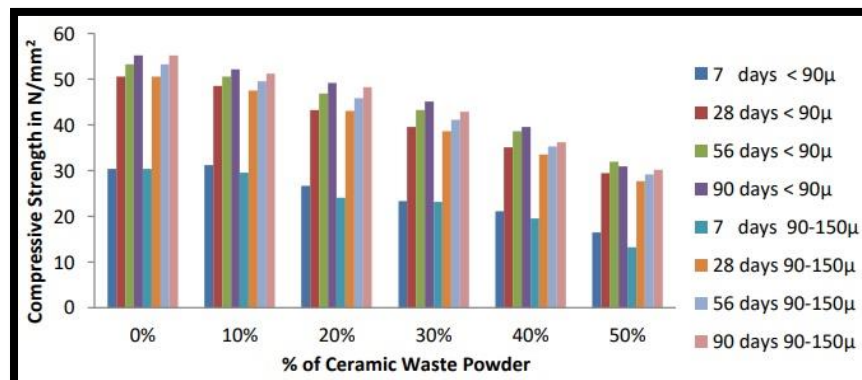


Figure III. 24: Résistance à la compression des bétons de classe M40 selon Atkuri & Rao.

Jackiewicz-Rek et al. [46] ont utilisés la poudre de déchets de céramique comme addition au ciment et en même temps comme substituant du sable. L'incorporation de ces fillers à hauteur de 20% a conduit à une amélioration systématique des propriétés mécaniques. A 2 jours, l'utilisation des déchets céramiques a entraîné des augmentations de la résistance à la flexion jusqu'à 50 % et de la résistance à la compression jusqu'à 42 %. Néanmoins, l'influence devient moins significative avec le temps, et après 56 jours, les augmentations correspondantes maximales se sont avérées égales à 12 % et 11 % pour la résistance à la flexion et à la compression respectivement (Figure III.25 et III.26).

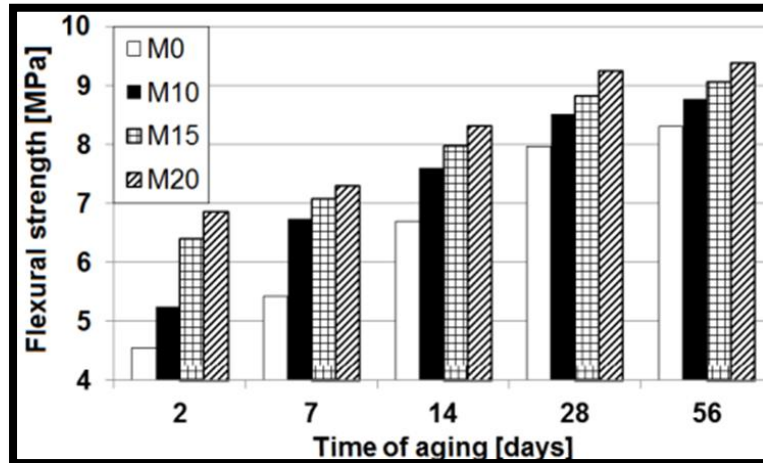


Figure III. 25: Résistance à la flexion des mortiers selon Jackiewicz-Rek et al.

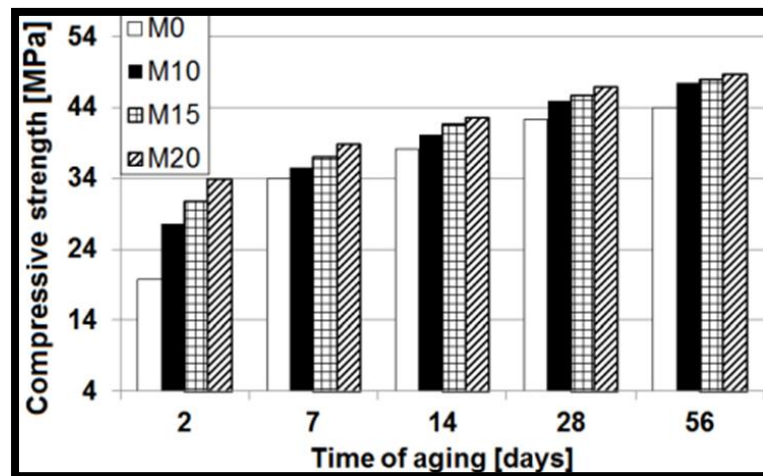


Figure III. 26: Résistance à la compression des mortiers selon Jackiewicz-Rek et al.

Kumar & Reddy[47] ont eux aussi remplacé du ciment par 10, 20, 30% de poudre céramique dans un béton M25. Avec l'absence d'un calibrage entre les fractions granulaires, Ils ont remarqué une réduction de la résistance à 28 jours, avec un léger désavantage dans le cas d'un remplacement à 30% selon le tableau III.6. Donc selon les auteurs 20 % de GP pourraient être incorporés en remplacement du ciment dans le béton sans aucun effet néfaste à long terme. Le béton contenant de la poudre de céramique peut atteindre des résistances appropriées comme les bétons témoins.

L'augmentation dans les premiers jours est due à une teneur élevée en silice et de sa structure amorphe.

Tableau III. 6: Résistance à la compression des bétons selon Kumar & Reddy

Compressive Strength (N/mm²)			
	7days	14 days	28days
Conventional mix	11.52	26.74	31.71
10% Replacement	11.89	26.79	31.12
20% Replacement	13.23	25.63	29.83
30% Replacement	13.68	23.77	27.55



Conclusion générale

Conclusion générale

L'élimination ou la réduction des déchets, est un problème mondial. La gestion des déchets est primordiale dans certains archipels comme le Japon, les Philippines ou l'Indonésie. Cette élimination est parfois très difficile, à cause de la nature du déchet lui-même.

Les déchets inertes ou les déchets non biodégradables, sont ceux que la nature ne peut dégrader. Ces déchets ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique importante lorsqu'ils sont déposés dans une décharge. Ils sont comme exemple les déchets polymères tels que les bouteilles en plastique, les sacs, la mousse de polystyrène, les vieilles machines.

Les déchets de constructions sont pour la plupart des déchets inertes. Ces déchets de construction sont généralement des substance, matière ou chose abandonnée. Il s'agit d'un mélange de matériaux provenant du dégagement du site, de l'excavation, de la construction, de la remise à neuf, de la rénovation, de la démolition, des travaux routiers, etc. Ces déchets ne constituent pas une menace pour l'environnement, la santé des animaux ou d'autres personnes et ne mettent pas en danger la qualité des cours d'eau. Cependant, lorsqu'il y a une grande quantité de ce type de déchets, cela peut devenir un problème car ils sont encombrants.

Certains types de déchets sont parfaitement recyclés dans le domaine de génie civil, comme les cendres volantes issues des centrales thermiques, le laitier de hauts fourneaux issu de la fabrication de la fonte ou la fumée de silice obtenue pendant la production du silicium et les alliages de ferrosilicium. En plus de ces déchets industriels, d'autres types trouvent une seconde utilisation dans ce domaine, comme les pneus usagés utilisés dans le béton en remplacement des granulats fins, grossiers ou les boues de papeteries.

Les déchets de type argile cuite comme la brique, la tuile, les carreaux de sols, etc. trouvent dans les bétons une seconde vie. Les sanitaires de type céramique sont utilisés comme granulats, sables et même comme poudre finement broyé à côté du ciment.

A travers notre étude on a remarqué que le béton peut contenir une certaine proportion de céramique sanitaire comme granulats. Il peut remplacer partiellement les granulats naturels, mais il faut tenir en compte ses propriétés physiques et chimiques particulières, par ex. forme de particule irrégulière, surface lisse, le degré d'absorption et la nature pouzzolanique.

La céramique pourrait être utilisée dans le béton comme granulats grossiers et fins et comme substitut du ciment. L'application de la céramique, quelle que soit sa forme, diminue la consistance et l'affaissement car l'argile est toujours capable d'absorber une quantité importante d'eau. La masse volumique des bétons devient plus légère suite à la légèreté des granulats céramiques. La résistance à la compression et son développement, sont diminués à cause d'un coefficient Los Angeles en défaveur des céramiques.



Références bibliographiques

Référence bibliographie

- [1] Michel, D. (1997). Matériaux céramiques structures et propriétés. Buletin de l'union des physiciens, 91, 181-195.
- [2] Dejou, J. (2010). Les céramiques. Support de cours :Société Francophone de Biomateriaux Dentaires, consulté le23/02/2023.<https://docplayer.fr/1883362-Support-de-cours-version-pdf-les-ceramiques-societe-francophone-de-biomateriaux-dentaires-j-dejou.html>
- [3] Document de référence sur les meilleures techniques disponibles « Fabrication des céramiques ». (2007).https://aida.ineris.fr/sites/aida/files/documents-bref/cer_bref_1206_VF_0.pdf consulté le 07/03/2023.
- [4] Duggal, S. K. (2017). Building materials. 3rd Ed. New age international publishers.
- [5] Fantozzi, G., Niepce, J. C., & Bonnefont, G. (2013). Les céramiques industrielles: Propriétés, mise en forme et applications. Dunod.
- [6] Philippe, B., & Niepce, J. C. (2007). Ceramic Materials Processes, Properties and Applications. Editorial ISTE.
- [7] Ceramic World Review, n° 149/2022, World Sanitaryware exports and imports.
- [8] Behim, M., Redjel, B., & Jauberthie, R. (2002, July). Réactivité du laitier de hauts fourneaux d'Annaba (Algérie) en substitution partielle du ciment. In Journal de Physique IV (Proceedings) (Vol. 12, No. 6, pp. 223-228). EDP sciences.
- [9] Bilim, C., Atiş, C. D., Tanyildizi, H., & Karahan, O. (2009). Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network. Advances in Engineering Software, 40(5), 334-340.
- [10] Yun, C. M., Rahman, M. R., Phing, C. Y. W., Chie, A. W. M., & Bakri, M. K. B. (2020). The curing times effect on the strength of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) mortar. Construction and Building Materials, 260, 120622.
- [11] Gupta, S. (2016). Effect of content and fineness of slag as high volume cement replacement on strength and durability of ultra-high performance mortar. Journal of Building Materials and Structures, 3(2), 43-54.
- [12] Lewis, R. C. (2018). Silica fume. Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4, 99-121.

- [13] Mazloom, M., Ramezani pour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and concrete composites*, 26(4), 347-357.
- [14] Wu, Z., Khayat, K. H., & Shi, C. (2019). Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content. *Cement and Concrete Research*, 123, 105786.
- [15] Lerm Infos n° 26 : Les cendres volantes 2014
- [16] Nath, P., & Sarker, P. (2011). Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete. *Procedia Engineering*, 14, 1149-1156.
- [17] Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and concrete research*, 34(3), 487-493.
- [18] Siddique, R., & Khatib, J. M. (2010). Abrasion resistance and mechanical properties of high-volume fly ash concrete. *Materials and Structures*, 43, 709-718.
- [19] Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., & Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and concrete research*, 30(1), 91-100.
- [20] Topcu, I. B., & Canbaz, M. (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and concrete research*, 34(2), 267-274.
- [21] Eldin, N. N., & Senouci, A. B. (1993). Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of materials in civil engineering*, 5(4), 478-496.
- [22] Khaloo, A. R., Dehestani, M., & Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste management*, 28(12), 2472-2482.
- [23] Moustafa, A., & ElGawady, M. A. (2015). Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber. *Construction and Building Materials*, 93, 249-256.
- [24] Pera, J., & Amrouz, A. (1998). Development of highly reactive metakaolin from paper sludge. *Advanced Cement Based Materials*, 7(2), 49-56.
- [25] Ahmad, S., Malik, M. I., Wani, M. B., & Ahmad, R. (2013). Study of concrete involving use of waste paper sludge ash as partial replacement of cement. *IOSR Journal of Engineering*, 3(11), 06-15.
- [26] Wong, H. S., Barakat, R., Alhilali, A., Saleh, M., & Cheeseman, C. R. (2015). Hydrophobic concrete using waste paper sludge ash. *Cement and Concrete Research*, 70, 9-20.

- [27] Jha, P., Sachan, A. K., & Singh, R. P. (2021). Agro-waste sugarcane bagasse ash (ScBA) as partial replacement of binder material in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 44, 419-427.
- [28] Ribeiro, D. V., & Morelli, M. R. (2014). Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of Brazilian sugar cane bagasse ash (SCBA). *Materials Research*, 17, 974-981
- [29] Rashid, K., Razzaq, A., Ahmad, M., Rashid, T., & Tariq, S. (2017). Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate. *Construction and Building Materials*, 154, 829-840.
- [30] Medina, C., De Rojas, M. S., & Frías, M. (2013). Properties of recycled ceramic aggregate concretes: water resistance. *Cement and Concrete Composites*, 40, 21-29.
- [31] Medina, C., De Rojas, M. S., & Frías, M. (2012). Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement and concrete composites*, 34(1), 48-54.
- [32] Canbaz, M. (2016). The effect of high temperature on concrete with waste ceramic aggregate. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 40, 41-48.
- [33] Ghos, S., Emrun, A. A., Saifullah, I., Islam, M. T., & Riyad, A. S. M. (2016). Engineering Properties of Concrete Using Waste Ceramic as Coarse Aggregates. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, 2.
- [34] Medina, C., Frías, M., & De Rojas, M. S. (2012). Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 31, 112-118.
- [35] Medina, C., de Rojas, M. I. S., & Frías, M. (2013). Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 40, 151-160.
- [36] Zegardło, B., Szeląg, M., & Ogrodnik, P. (2018). Concrete resistant to spalling made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes—The effect of moisture and porosity on destructive processes occurring in fire conditions. *Construction and Building Materials*, 173, 58-68.
- [37] Medina, C., Frías, M., De Rojas, M. S., Thomas, C., & Polanco, J. A. (2012). Gas permeability in concrete containing recycled ceramic sanitary ware aggregate. *Construction and Building Materials*, 37, 597-605.

- [38] Alves, A. V., Vieira, T. F., De Brito, J., & Correia, J. R. (2014). Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials*, 64, 103-113.
- [39] Canbaz, M. (2016). The effect of high temperature on concrete with waste ceramic aggregate. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 40, 41-48.
- [40] Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and building materials*, 24(5), 832-838.
- [41] Pitarch, A. M., Reig, L., Tomás, A. E., & López, F. J. (2019). Effect of tiles, bricks and ceramic sanitary-ware recycled aggregates on structural concrete properties. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 1779-1793.
- [42] Klimek, B., Szulej, J., & Ogrodnik, P. (2020). The effect of replacing sand with aggregate from sanitary ceramic waste on the durability of stucco mortars. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 1929-1941.
- [43] Ogrodnik, P., Zegardło, B., & Szelağ, M. (2017). The use of heat-resistant concrete made with ceramic sanitary ware waste for a thermal energy storage. *Applied Sciences*, 7(12), 1303.
- [44] Abadou, Y., Mitiche-Kettab, R., & Ghrieb, A. (2016). Ceramic waste influence on dune sand mortar performance. *Construction and Building Materials*, 125, 703-713.
- [45] Atkuri, V. K., & Rao, G. R. (2021). Strength properties of ceramic waste concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1025, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.
- [46] Jackiewicz-Rek, W., Załęgowski, K., Garbacz, A., & Bissonnette, B. (2015). Properties of cement mortars modified with ceramic waste fillers. *Procedia Engineering*, 108, 681-687.
- [47] Kumar, V. P., & Reddy, K. C. (2017). Durability aspects of concrete by partial replacement of cement by ceramic waste. *Int J Civ Eng Technol*, 8, 22-30.
- [48] Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Aboshama, A. Y. (2016). Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 866-877.