

Ministère de L'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Boudiaf – M'sila

FACULTE : THECNOLOGIE

DEPARTEMENT : Génie Civil

N° :



FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : MATERIAUX

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme Master

dans le cadre du décret ministériel 1275

Par: **BENZOUAD Hadj & SAADI Amar**

THEME

**Introduction des déchets de type céramique
sanitaire dans la confection des ciments**

Soutenu devant le jury composé de

Pr. NACERI Abdel Ghani	Université de M'sila	Président
Dr. CHIKOUHCE Mohamed Aziz	Université de M'sila	Encadreur
Dr. BAALI Laid	Université de M'sila	Co-Encadreur
Dr. BOUALLEG Saida	Université de M'sila	Examineur
Mr. Ben Aissa Hamza	Wilaya de M'sila	Partenaire Economique
Dr. DJERIOUI Ali	Université de M'sila	Representant du CATI

Promotion : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant d'ouvrir ce travail, je tiens tout d'abord à remercier **Dieu** le tout puissant et miséricordieux qui ma donnée la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. Paix et salut soient sur son prophète **Mohamed** ﷺ qui sera toujours pour nous un modèle.

Je tiens à remercier les enseignants du département de génie civil ont participé à notre formation au cours de toutes nos années d'études, et particulièrement, notre encadreur Dr Chikouche Mohamed Aziz Pour la confiance qu'il m'a donné et ses précieux Conseils.

Je remercie chaleureusement les travailleurs de la société LAFAFRG de Msila, qui m'a ouvert leurs portes et donné l'opportunité de réalisé ce projet ou ce travaille.

Je tiens à exprimer mon immense gratitude à mes parents, ma femme, mon fis mon frère, mes sœurs et l'ensemble de mes proches, pour leur soutien permanent et leur encouragement tout au long de ces années, sans lesquels je n'aurais jamais mené à bien ce travail.

Je remercie également l'entreprise dans laquelle je travaille, Nova Céram, en particulier le responsable du laboratoire, ainsi que mes collègues, pour les facilités et l'aide afin de coordonner entre le travail et l'étude.

DEDICACES

A ma très chère mère *Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

A mon très cher père Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A ma femme et à mes fils, tu es ma force, le rêve pour lequel je me bats pour son bonheur et sa fatigue.

*A tous ces professeurs qui m'ont enseigné, je les remercie et les remercie un peu pour ce qu'ils ont fait et donné, vous êtes les meilleures personnes pour moi. Pour tous les collègues, vous avez été une source inestimable de connaissances, de travail acharné et de respect.
Merci.*

À tout ce que je sais, merci. merci. merci.....à tous...

ملخص:

مصانع الاسمنت تستهلك يوميا ملايين الهكتارات من الصلصال والكلس، مما يسبب كوارث بيئية. من جهة أخرى لا تستطيع مكبات النفايات تحمل المزيد من النفايات الخاملة التي تعتبر أكثر مقاومة للانحلال. من بين هذه النفايات، نفايات السيراميك والتي تتميز بهشاشتها. في هذه الدراسة أردنا تقليص حجم هذه النفايات من خلال دمج نسب معينة من الخزف الصحي مع الاسمنت ومنه إجراء سلسلة من التجارب النموذجية، كالكثلة الحجمية وزمن التماسك والمقاومة الميكانيكية، إلخ.

من أجل الوصول إلى الخاتمة العامة، قمنا بتحرير ثلاثة فصول بالإضافة لمقدمة عامة. الفصل الأول يتحدث على منتج الاسمنت أما الثاني فخصصناه لنوعية الخزف والنفايات الموجودة. الفصل الثالث عبارة عن نتائج وتحليل وقراءة في التجارب التي خضعت لها مختلف أنواع الاسمنت، للوصول إلى خلاصة البحث أين تمت إعطاء بعض النتائج بالإضافة إلى بعض التطلعات.

كلمات مفتاحية: الاسمنت، الخزف الصحي، تدوير النفايات، إضافة اسمنتية، تجارب نموذجية.

Résumé :

Les cimenteries engloutissent chaque journée des millions d'hectares d'argile et de calcaire, ce qui cause la dégradation de l'environnement. D'un autre côté, les centres d'enfouissements ne peuvent plus contenir plus de déchets, surtout les déchets inertes à cause de leur non biodégradabilité. Parmi ces déchets, on cite les déchets céramiques qui se caractérise par une grande fragilité.

Dans cette étude on veut diminuer la quantité des déchets céramique de type sanitaire en substituant une partie du ciment par eux. Des essais normalisés ont été conduites tels que la masse volumique, le temps de prise, la résistance mécanique, etc.

Afin d'arriver à une conclusion générale, on a partagé notre projet de fin d'étude en trois chapitres plus une introduction générale. Le premier chapitre est dédié aux ciments et le deuxième récite les produits céramiques et leurs déchets. Le troisième chapitre est voué à l'analyse des différents essais normalisés menés sur les différents ciments. Dans la conclusion générale on a résumé nos résultats et prescrit des perspectives.

Mots clés : Ciment, Céramique sanitaire, Valorisation des déchets, Ajout cimentaires, Essais normalisés.

Abstract :

Cement plants gobble up millions of clay and limestone hectares every day, causing environmental degradation. Besides, landfills can no longer contain more waste, especially inert ones because they are not biodegradable. Among this waste, marked by great fragility, is the sanitary ceramic.

In this study, we want to reduce the quantity of sanitary ceramic waste by replacing a part of the cement with them. Standard tests have been conducted like density, setting time, mechanical resistance, etc.

To reach a general conclusion, we have divided our study into three chapters plus a general introduction. The first chapter is dedicated to cement, and the second recites ceramic products and their waste. The third chapter is devoted to the analysis of the different tests carried out on cements. In the general conclusion, we have summarized our results and prescribed perspectives.

Keywords: Cement, Sanitary ceramic, Waste valorisation, supplementary cementitious material, Standard test.

Sommaire

Remerciements.....	I
DEDICACES.....	II
:ملخص.....	III
Résumé :.....	IV
Abstract :.....	V
Sommaire	VI
liste des tableaux	IX
Liste des figures	X
Introduction Générale.....	1

CHAPITRE I: Les Ciments

I-1-Introduction	4
I-1-Définition	4
I-2-Historique	4
I-3-Fabrication.....	5
I-3-1-Extraction.....	5
I-3-2-Concassage.....	5
I-3-3-Préparation du cru	6
I-3-4-Cuisson.....	8
I-3-5-Refroidissement	9
I-3-6-Broyage	9
I-3-7-Stockage ensachage et expédition.....	9
I-4-Différents types de ciment	10
I-5-Différents types d'ajouts	10
I-5-1-La fumée de silice	11
I-5-2-Le calcaire.....	13
I-5-3-Laitier granulé de hauts fourneaux	14
I-5-4-Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W).....	16
I-5-5-Le métakaolin	17
I-6-La production du ciment	18

CHAPITRE II: La Céramique

II-1-Introduction.....	22
II-2 La céramique.....	22
II-3- Historique.....	23

II-4-Les grandes ligne de fabrication des céramiques.....	25
II-4-1- La matière première.....	25
II-4-2- Préparation de la suspension	26
II-4-3-La Coulée.....	26
II-4-3-1-Coulée en barbotine.....	26
II-4-3-2-Coulée sous pression	27
II-4-4-Pressage et moulage	28
II-4-5-Traitement de surface	29
II-4-6-La cuisson.....	29
II-5-Différents types de céramique	30
II-5-1-La brique.....	30
II-5-2-La tuile.....	31
II-5-3-La terre cuite.....	31
II-5-4-La porcelaine	32
II-5-5-Le grès	32
II-6-Le marché des céramiques.....	33
II-6-1- Le marché des déchets de céramique	35
II-6-2- Gestion des déchets céramiques	35

CHAPITRE III: Essais, résultats et discussion

III.1. Introduction aux essais réalisés	39
III.1.1. Mesure des oxydes	39
III.1.1.1 La fluorescence X	39
III.1.1.2. La perte au feu.....	39
III.1.1.3. La chaux libre.....	40
III.1.2. La diffraction aux rayons « X »	40
III.1.3- Essais sur ciment anhydre.....	41
III.1.3.1-La finesse Blaine.....	41
III.1.3.2. Analyse granulométrique (Méthode alpine) :.....	42
III.1.3-2- Masse volumique.....	42
III.1.4. Essai sur pâte de ciment	43
III.1.4.1- La consistance.....	43
III.1.4.2. La prise.....	44
III.1.5. Essai sur mortier.....	45
III.1.5.1-Préparation des éprouvettes	45

III.1.5.2-Conservation des éprouvettes	46
III.1.5.3. Résistances mécaniques des mortiers.....	47
III.1.5.4. Chaleur d'hydratation	47
III.2. Résultats et discussion.....	48
III.2.1-Fluorescence des rayons X	49
III.2-2-Diffraction des rayons X	49
III.2.2.1. La perte au feu et la chaux libre	50
III.2-3-Mesure de la finesse	51
III.2.4- La masse volumique	51
III-2-5-Essai de consistance	52
III-2-6-Début et fin de Prise	53
III-2-7- Chaleur d'hydratation.....	54
III-2-8- Résistances mécaniques des mortiers.....	54
Conclusion Générale :	57
Références bibliographie.....	60

liste des tableaux

CHAPITRE I: Les Ciments

Tableau I. 1: Oxydes entrant dans la préparation du cru.....	6
Tableau I. 2: Les types de ciment selon la norme NF P15-301.	10
Tableau I. 3: Teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et ($W_{c,bw}$) en fonction du dosage de laitier selon Schuldyakov et al. ...	15

CHAPITRE II: La Céramique

Tableau II. 1: Exportations mondiales de céramique sanitaires (en tonnes) 2010-2021 selon CWR.	34
Tableau II. 2: Les dix premiers pays exportateurs de céramique sanitaires (en tonnes) 2010-2021 selon CWR.	34
Tableau II. 3: Composition des déchets de construction et de démolition selon Juan et al.	35
Tableau II. 4: Essai d'étalement des mortiers selon Nasr et al.	36
Tableau II. 5: Consistance des mortiers étudiés selon Jackiewicz-Rek et al.	37
Tableau II. 6: Plasticité des mortiers étudiés selon Jackiewicz-Rek et al.	37

CHAPITRE III: Essais, résultats et discussion

Tableau III. 1: Les différents mélanges étudiés.	48
Tableau III. 2: Analyse chimique en (%) des matières premières et les mélanges résultants.....	49
Tableau III. 3: Analyse minéralogique en (%) des matériaux utilisés.	50
Tableau III. 4: Analyse de la perte au feu des matériaux utilisés.....	50
Tableau III. 5: Finesse des matériaux utilisés.	51
Tableau III. 6: Masse volumique apparente	52
Tableau III. 7: Valeurs en Mpa, des résistances à la flexion des ciments étudiés.....	55

Liste des figures

CHAPITRE I: Les Ciments

Figure I. 1: Préparation du ciment.....	5
Figure I. 2: Extraction à ciel ouvert.....	5
Figure I. 3: Extraction à ciel ouvert.....	6
Figure I. 4: Hall de pré-homogénéisation du cru.	7
Figure I. 5: Hall de pré-homogénéisation du cru.	7
Figure I. 6: Différentes zones de transformation du cru.	8
Figure I. 7: Evolution de la composition chimique du cru dans le four rotatif.	9
Figure I. 8: Broyeur à boulet.	9
Figure I. 9: Micrographie au microscope électronique à transmission de fumée de silice.	11
Figure I. 10: Flux de chaleur des pâtes étudiées par Wang et al.	13
Figure I. 11: Schéma simplifié de la fabrication du laitier.	15
Figure I. 12: Les possibilités générales de remplacement du ciment par des cendres volantes selon Giergiczny.....	17
Figure I. 13: Résistance à la compression des mortiers avec métakaolin selon Wianglor.....	18
Figure I. 14: Production mondiale entre 1900 et 1998 selon Aïtcin.	18
Figure I. 15: Production mondiale de ciment selon CEMBUREAU.	19
Figure I. 16: Feuille de route de réduction du CO ₂ selon CEMBUREAU.....	20

CHAPITRE II: La Céramique

Figure II. 1: Travail à la main d'une sculpture en argile.....	22
Figure II. 2: La céramique technique.	23
Figure II. 3: Les plus vieilles poterie au monde.	23
Figure II. 4: Condensateur céramique.	24
Figure II. 5: Différents états du zircon.	25
Figure II. 6: Coulée en barbotine pour céramique sanitaire.	26
Figure II. 7: Pressage uni-axial (à gauche) et isostatique (à droite).	28
Figure II. 8: Différents types de brique.	30
Figure II. 9: La tuile.	31
Figure II. 10: Carrelage en terre cuite.	32
Figure II. 11: La porcelaine sanitaire.	32
Figure II. 12: Répartition en chiffre d'affaires des céramiques en Europe par secteur selon Fantozzi et al	33
Figure II. 13: Résistance à la compression des mortiers avec SCW selon Nasr et al.	37

CHAPITRE III: Essais, résultats et discussion

Figure III. 1: Four de mesure pour la PAF.....	39
Figure III. 2: Le calcimètre	40
Figure III. 3: Diffractomètre à rayons X.	41
Figure III. 4: Perméabilimètre de Blaine.....	41
Figure III. 5: Tamiseuse ALPINE.	42
Figure III. 6: Flasque Le Chatelier pour masse volumique absolue.....	43
Figure III. 7: Entonnoir et récipient pour masse volumique apparente.....	43
Figure III. 8: Appareil de Vicat muni d'une sonde de consistance.	44
Figure III. 9: Dispositif de temps de début de prise.	45
Figure III. 10: Malaxeur à mortier normalisé.....	45
Figure III. 11: Moule métallique pour confection de mortier.	46
Figure III. 12: Chambre de conservation des éprouvettes.....	46
Figure III. 13: Dispositif de mesure des résistances mécaniques.....	47
Figure III. 14: Calorimètre Langavant.	48
Figure III. 15: Concassage et broyage de la céramique sanitaire.....	49
Figure III. 16: Refus des tamis 45µm et 90µm des ciments étudiés.	51
Figure III. 17: La masse volumique absolue des ciments étudiés.....	52
Figure III. 18: Quantité d'eau et consistance des ciments étudiés.	53
Figure III. 19: Début et fin de prise des ciments étudiés.....	53
Figure III. 20: Courbe de chaleur d'hydratation des ciments étudiés.	54
Figure III. 21: Evolution de la résistance à la compression des ciments étudiés.	55



Introduction Générale

Introduction Générale

Les liants sont utilisés par les humains depuis des siècles. Ils ont connu les sols consolidés blanchi à la chaux fabriquée à partir de calcaire brûlé et d'argile ou la chaux produite à partir de calcaire brûlé pour préparer le mortier. Les Phéniciens utilisaient un mélange de chaux brûlée et de cendres volcaniques. Les Romains ont développé de nouvelles techniques de maçonnerie, avec lesquelles ils pouvaient ériger de grands bâtiments. Ils ont développé un type de béton fait de chaux avec du sable et de roche concassée.

Suite à la révolution industrielle à la fin du XVIIIe siècle et la découverte que l'hydraulicité de la chaux liée à la teneur en argile du calcaire, le ciment portland ne tardait pas à faire son apparition. Le premier ancêtre du ciment moderne fut le chauffage du calcaire et de l'argile jusqu'à ce que le mélange soit calciné, il est nommé ciment Portland. Puis fut la cuisson de la craie et de l'argile à des températures beaucoup plus élevées, ce qui a conduit à la clinkérisation du mélange et a produit ce qui est essentiellement du ciment moderne.

Avec l'avancement technologique et l'accroissement du niveau de vie, les produits cimentaires, sont devenus aujourd'hui des matériaux incontournables. Mais ces gratte-ciels, monuments, ponts, tunnels, hôpitaux, stades, etc. nuisent à la nature et l'environnement. Le ciment avant tout est produit par des matériaux premiers extraits par dynamitage ou excavation des sols.

Afin de réduire cette destruction, différents matériaux sont utilisés comme substituant ou remplaçant partiel au ciment. Les ajouts cimentaires sont utilisés aujourd'hui pour améliorer les propriétés du ciment ou du béton à travers des réactions chimiques ou des effets physiques. Les ajouts cimentaires les plus couramment utilisés sont les cendres volantes issues du charbon brûlant dans les centrales électriques, le laitier extrait de la fusion des minerais de fer, la fumée de silice un sous-produit de métallurgie, etc.

La fabrication des céramiques, est aussi une industrie qui compte parmi les plus anciennes. Depuis que les humains découvrirent que l'argile modelée et cuite produit des objets de valeurs, une industrie est née. Passant par la période paléolithique et néolithique, les récipients de nourriture et les objets d'ornement se sont multipliés. Avec le développement des fours et l'utilisation des peintures, la poterie céramique a évolué.

Les produits céramiques ont des propriétés remarquables comme la dureté, un point de fusion élevée et une bonne résistance chimique. Mais, les matériaux céramiques ont aussi des inconvénients. Parmi eux la fragilité ou une faible ténacité, qui conduit à des fractures, ils ne

résistent pas aux chocs. Suite à cette caractéristique de nombreuses pièces sont écartés par l'usine. Dans le cas des sanitaires en céramique, les déchets s'accumulent lors du transport et à la pose sur chantier.

Ces déchets de caractère inerte, sont difficilement gérable. Les quantités rentrantes aux centres d'enfouissement sont difficilement traitées à cause de leurs nature encombrante. La valorisation ou la réutilisation de ces produits dans leur filière d'origine est presque impossible.


Objectif du travail

Ce travail consiste dans la valorisation des déchets céramiques pour la production des ciments. Ces ciments seront contrôlés selon les normes en vigueur afin de déterminer les meilleures proportions.

Structure du travail

Afin d'arriver à une conclusion, ce projet de fin d'étude est divisé en trois chapitres plus une introduction.

- Le premier chapitre, est dédié aux ciments. On a exposé les différentes étapes de fabrication des ciments ainsi que leurs types et les ajouts cimentaires utilisés pour réduire l'impacte environnementale
- Le deuxième chapitre, récite la céramique. Ce matériau passe par plusieurs étapes dans sa fabrication, et plusieurs types sont cités.
- Le troisième chapitre, est consacré aux essais effectués sur les différent ciments élaborés dans le cadre de cette étude et les résultats trouvés.



CHAPITRE I

Les Ciments

I-1-Introduction

Au début de la préhistoire, l'être humain s'abrita à l'entrée des grottes ou habita des huttes faites de branchages, ossements et peaux. Avec l'évolution scientifique, il découvrit et il découvre toujours de nouvelle technique afin de construire des habitats sure, solide et dure.

Les techniques de constructions font appel aujourd'hui, à des mixtures de plus en plus complexe. Le béton et les matériaux cimentaires sont devenus le matériau de choix dans le domaine de la construction.

I-1-Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fines qui, mélangée avec de l'eau, forme une pate faisant prise et durcisse progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et les aluminates de calcium.[1]

I-2-Historique

Les Romains furent sans doute les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles. C'est de là qu'est venu le terme bien connu de « pouzzolane ».

En 1817, Louis Vicat expliqua la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches. Il donna des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique.

Quelques années plus tard, le terme « ciment Portland » a été appliqué pour la première fois par Joseph Aspdin dans son brevet britannique n° 5022 (1824), qui décrit un procédé de fabrication de pierre artificielle en mélangeant de la chaux avec de l'argile sous la forme d'une suspension et en la calcinant (chauffant pour chasser le carbone dioxyde de carbone et eau) les morceaux de matière séchés dans un four à cuve.

Le matériau calciné (clinker) a été broyé pour produire du ciment. Le terme « Portland » a été utilisé en raison de la similitude du produit durci avec celui de la pierre de Portland du Dorset et aussi parce que cette pierre avait une excellente réputation de performance. [1]

I-3-Fabrication

Les matières premières utilisées dans la fabrication du ciment sont le calcaire et l'argile dans des proportions respectivement proches de 80 et 20%. Le calcaire fournit du calcium. L'argile apporte du silice SiO_2 , de l'alumine Al_2O_3 et de l'oxyde ferrique Fe_2O_3 , qui sont indispensables au processus de formation du clinker (Figure I-1).

Les matières premières contiennent également des éléments autres que ces oxydes basiques, tels que la magnésie MgO , des sulfates, des sulfures, des alcalins K_2O et Na_2O [3].



Figure I. 1: Préparation du ciment.

I-3-1-Extraction

L'extraction est conduite en démolissant la roche à l'explosif, dans les carrières à ciel ouvert. La roche est cassée en blocs, ensuite chargée dans des camions bennes pour alimenter les concasseurs (Figure I-2), tandis que l'argile, plus malléable, est extraite par des excavatrices ou des roues d'excavatrices avant d'être transportée par des camions.



Figure I. 2: Extraction à ciel ouvert.

I-3-2-Concassage

Après l'extraction des matériaux, les granulométries sont grossières jusqu'au 3m, il nécessite le processus de concassage qui s'effectue le plus souvent dans les mêmes lieux d'extraction (Figure I-3). La granulométrie sera limitée à 50, voire 100 mm au plus. L'équipement utilisé à cet effet peut être mobile ou fixe.



Figure I. 3: Extraction à ciel ouvert.

I-3-3-Préparation du cru

C'est l'opération au cours de laquelle le mélange homogène de calcaire et d'argile est réalisé dans des proportions fixes selon leurs propres compositions chimiques, mais toujours proches du rapport de 80% calcaire pour 20% argile.

La teneur moyenne de quelques oxydes (Tableau I-1) dans la préparation du cru est de l'ordre de :

Tableau I. 1: Oxydes entrant dans la préparation du cru

Oxydes	Pourcentage	Intervalle
CaO	65	60 à 69
SiO ₂	21	18 à 24
Al ₂ O ₃	6	4 à 8
Fe ₂ O ₃	3	1 à 8
MgO	2	0 à 5
SO ₃	1	0 à 3

La préparation du cru peut être réalisée suivant quatre procédés différents:

La voie sèche

La plus généralement utilisée, parce que c'est la méthode la plus économique en termes de consommation d'énergie.

Elle comprend en premier une pré-homogénéisation (Figure I-4) qui consiste en la réalisation d'un mélange préliminaire. Ensuite, un broyage-séchage est appliqué pour réduire en poudre les grains. Après cette opération, l'homogénéisation des matières obtenues permet l'obtention uniforme des caractéristiques chimiques, grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux.



Figure I. 4: Hall de pré-homogénéisation du cru.

La voie humide

Pratiquement abandonnée, cette voie de préparation est grandement consommatrice d'énergie. Elle consiste à préparer une pâte dans des délayeurs, ensuite homogénéisée et stockée. Cette voie s'impose lorsque les matériaux extraits présentent un taux d'humidité élevé.

La voie semi-sèche ou semi-humide

Dans la voie semi-sèche, la poudre est humidifiée après broyage et séchage pour l'agglomérer sous forme de granules. Dans la voie semi-humide, on filtre la pâte réalisée de façon analogue à la voie humide. Après filtration, les boudins sont cuits sur une grille (Figure I-5).

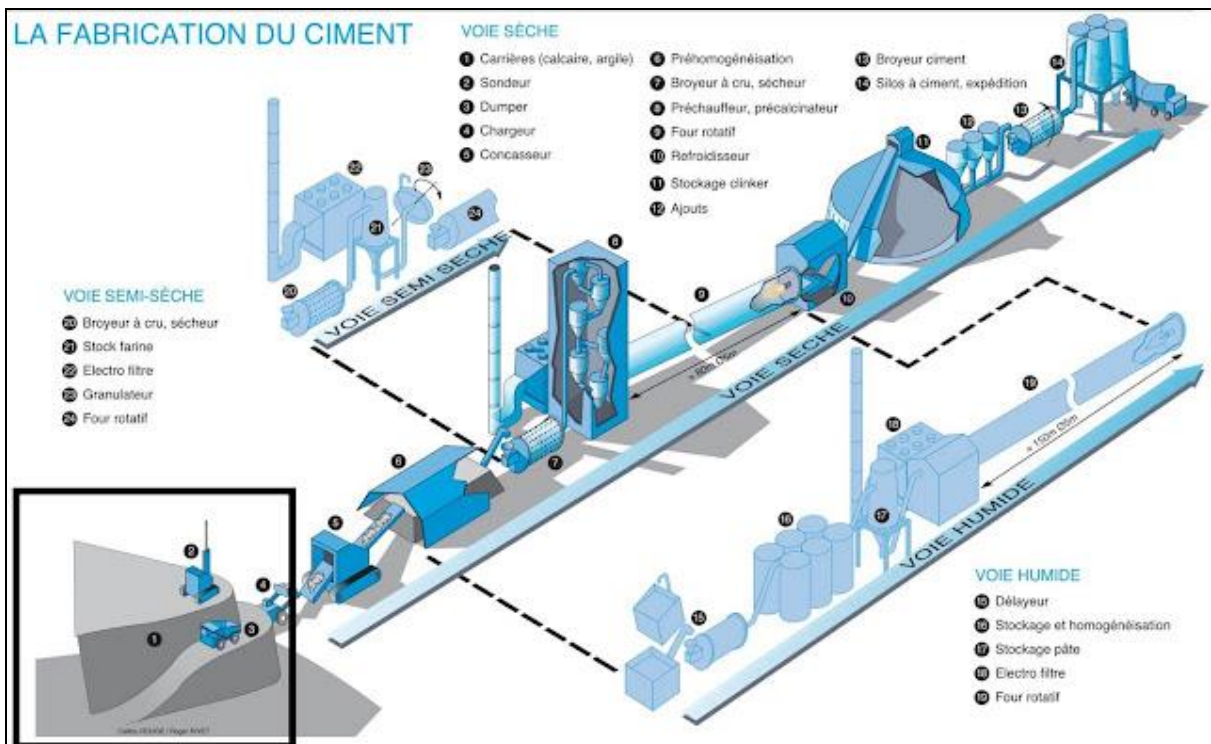


Figure I. 5: Hall de pré-homogénéisation du cru.

I-3-4-Cuisson

Réalisée dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5m de diamètre et de 80 à 100 m de longueur dans le procédé par voie sèche (150 m dans le procédé par voie humide), à une température comprise entre 1400 et 1500°C.

La cuisson permet la transformation du cru en clinker. Ce cycle de traitement comporte les phases suivantes :

- Un préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four où les gaz chauds brassent la farine à contre-courant.
- La décomposition de l'argile qui se produit à une température entre 800 à 1100°C.
- La décarbonatation du calcaire qui s'effectue à une température de 950°C dans la partie médiane du four, soit entre 550 et 1000°C.
- La formation de clinker ou de clinkérisation à 1450 °C qui se produit en aval du four près du brûleur. Cela est dû à l'interaction qui se produit entre la chaux vive CaO et les oxydes d'argile SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

Ces différentes étapes (et d'autres) sont reproduites par les deux figures I-6 et I-7. Moussi et al. [4] ont constaté une forte augmentation de la température de la matière dans les zones de transition et de combustion. Ces quantités de chaleur donnent naissance aux C3A et C4AF, et à la production de C3S.

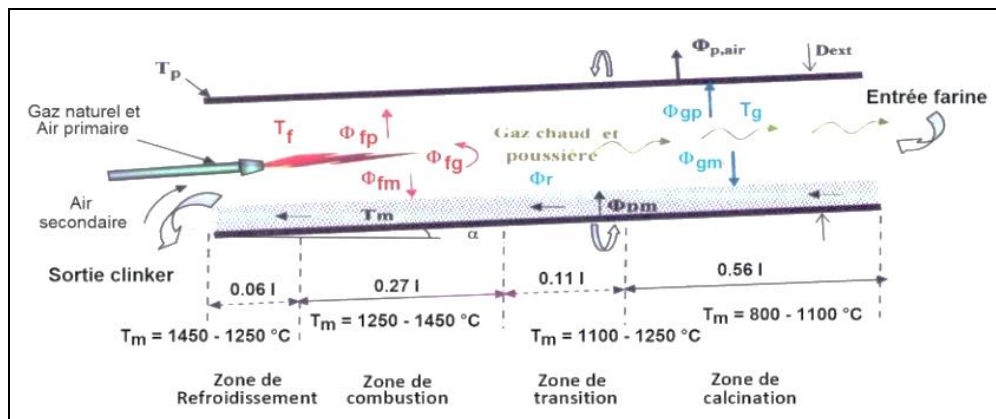


Figure I. 6: Différentes zones de transformation du cru.

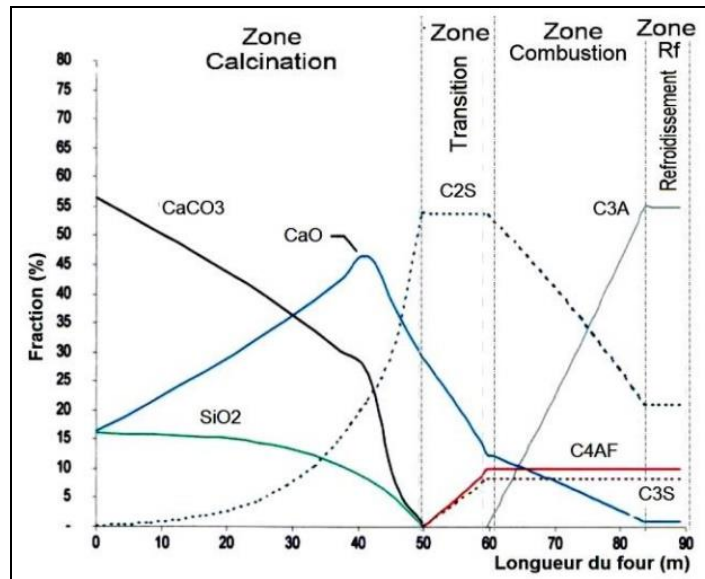


Figure I. 7: Evolution de la composition chimique du cru dans le four rotatif.

I-3-5-Refroidissement

Le but de ce procédé est d'abaisser rapidement la température du clinker, puisqu'elle varie de 1200 à 1450°C en sortie de four, vers 50 à 250°C selon les types de refroidisseurs. Ce processus affecte également la qualité du ciment, car un refroidissement trop lent peut libérer de la chaux libre et transformer le C3S en C2S, ce qui entraîne une diminution de la résistance.

I-3-6-Broyage

Par le moyen des broyeurs à boulet (Figure I-8), l'objectif est réduire les granules de clinker en poudre très fines, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres ...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés.



Figure I. 8: Broyeur à boulet.

I-3-7-Stockage ensachage et expédition

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines soit expédié en vrac. La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches[1]

I-4-Différents types de ciment

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation :

- CEM I : Ciment portland .
- CEM II : Ciment portland composé.
- CEM III : Ciment de haut fourneau.
- CEM IV : Ciment pouzzolanique.
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres.

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau I-2. Le gypse est considéré comme constituant secondaire.

Tableau I. 2: Les types de ciment selon la norme NF P15-301.

Notion	Clinker (K)	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland			
CEM I	95-100	-	0-5
Ciment Portland Composé			
CEM II/A	80-94	6-20*	-
CEM II/B	65-79	21-35*	-
* Les constituants autres que le clinker sont : - (S), (Z), (V), (W), (T), (L) ; - (D), en proportion limitée à 10% ; - (F), en proportion limitée à 5% (constituants secondaire compté avec les autres constituants).			
Ciment de haut fourneau			
CEM III/A	35-64	36-65*	0-5
-CEM III/B	20-34	66-80*	0-5
CEM III/C	5-19	81-95*	0-5
* Laitier granulé de haut fourneau (S) uniquement			
Ciment Pouzzolanique			
CEM IV/A	65-90	10-35*	0-5
CEM IV/B	4-64	36-55*	0-5
* Les constituants autres que le clinker sont : -Les pouzzolanes naturelles (Z) et les cendres volantes siliceuses (V) ; - Les fumées de silice (D), en proportion limité à 10%			
Ciment au Laitier et aux Cendres			
CEM V/A	40-94	18-30*	0-5
CEM V/B	20-39	31-50*	0-5
Pouzzolanes naturelles (Z) ou cendres volantes siliceuses (V)			

I-5-Différents types d'ajouts

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute d'autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques.

I-5-1-La fumée de silice

La fumée de silice, est de la silice non cristalline très fine produite dans des fours à arc électrique en tant que sous-produit de la production de silicium élémentaire ou d'alliages contenant du silicium. La fumée de silice, qui se condense à partir des gaz s'échappant des fours, a une teneur très élevée en dioxyde de silicium amorphe et est constituée de particules sphériques très fines (Figure I.9) mesurant en moyenne 0,1 à 0,2 μm de diamètre. Souvent, plusieurs sphères individuelles peuvent être fusionnées pour former de petits agglomérats.

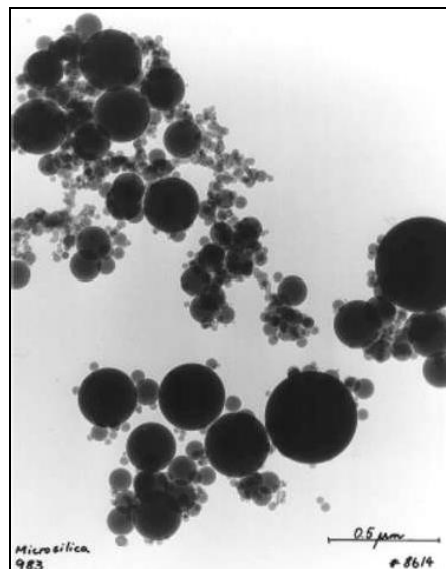


Figure I. 9: Micrographie au microscope électronique à transmission de fumée de silice.

La première mention de la fumée de silice pour une utilisation dans le béton et le mortier se trouve dans un brevet américain de 1946 (Sharp 1946) où l'utilisation de la fumée de silice pour améliorer les propriétés du mortier frais est la revendication principale du brevet.

La fumée de silice a été collectée pour la première fois à Kristiansand, en Norvège, en 1947. Des enquêtes sur les propriétés du matériau et ses utilisations ont commencé rapidement, le premier article étant publié par Bernhardt en 1952. Des enquêtes sur les performances de la fumée de silice dans le béton ont également suivi dans d'autres Pays nordiques : Islande, Danemark et Suède. D'autres premiers articles scandinaves comprenaient ceux de Fiskaa et al. (1971), Traetteberg (1977), Jahr (1981), Asgeirsson et Gudmundsson (1979), Løland (1981) et Gjørsv et Løland (1982). En 1976, une norme norvégienne autorisait l'utilisation de fumée de silice dans le ciment mélangé. Deux ans plus tard, l'ajout direct de fumée de silice dans le béton était autorisé par une norme en Norvège.

En Afrique du Sud, Oberholster et Westra ont publié des résultats de recherche sur l'utilisation de la fumée de silice pour contrôler la réaction alcali-agrégat en 1981.

En Amérique du Nord, le premier article a été publié en 1981 par Buck et Burkes de la U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station (WES). D'autres premières recherches ont été menées par CANMET (Malhotra et Carette 1983; Carette et Malhotra 1983a), l'Université de Sherbrooke (Aïtcin 1983), Norchem (Wolsiefer 1984) et le U.S. Army Corps of Engineers WES (Holland 1983). En 1978, Norchem a effectué le premier placement majeur de béton de fumée de silice prêt à l'emploi aux États-Unis pour la résistance aux attaques chimiques. fumée de béton (Holland et al. 1986) [5].

Parmi les travaux récents sur la fumée de silice Wang et al.[6] ont étudiés la courbe de flux de chaleur de différentes pâtes de ciment confectionnées avec un ciment Portland (OPC), ciment à faible chaleur d'hydratation (LPH) et des pâtes où le ciment LPH est substitué par 4, 8 et 12% de fumée de silice. La Figure I.10 illustre clairement que le comportement d'évolution de la chaleur de toutes les pâtes en 3 jours sont assez similaires et peuvent être divisés en cinq périodes distinctes, la phase de pré-induction (0-2 h), la phase d'induction (2-4 h), la phase d'accélération (4-14 h), la phase de décélération (14-40 h) et stade durci (environ 40 h plus tard).

On peut constater que l'inclusion de la fumée de silice (SF) influence nettement les propriétés de dégagement de chaleur par hydratation. Premièrement, l'ajout de SF dans le ciment LHP est utile pour raccourcir la période d'induction et accélérer l'hydratation du ciment LHP. La durée de la période d'induction des pâtes de ciment LHP est réduite d'environ 20 à 50 minutes en raison de l'ajout de 4 à 12 % en poids de SF. Deuxièmement, l'intensité et l'heure de début du flux de chaleur maximal du ciment LHP modifié au SF pendant la phase d'accélération sont progressivement augmentées et décalées plus tôt avec l'augmentation de la teneur en SF de 0 à 12 % en poids. Troisièmement, la chaleur d'hydratation accumulée du ciment LHP modifié par SF augmente à mesure que la teneur en SF augmente. Cet effet d'accélération du SF est dû à une superposition de l'effet pouzzolanique et de l'effet de nucléation qui favorise la formation de plus de produits d'hydratation.

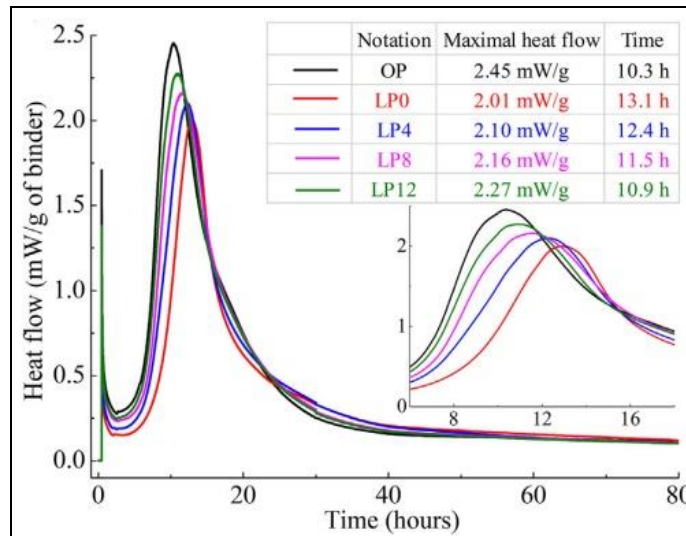


Figure I. 10: Flux de chaleur des pâtes étudiées par Wang et al.

I-5-2-Le calcaire

Il désigne toute roche formée principalement de carbonate de calcium (CaCO_3), mais pour les géologues, le calcaire n'est qu'un des nombreux types de « roches carbonatées ». Ces roches sont composées de plus de 50 % de minéraux carbonatés, généralement les minéraux calcite (CaCO_3 pur) ou dolomite (carbonate de calcium-magnésium, $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$) ou les deux.

La plupart des roches carbonatées ont été déposées à partir de l'eau de mer. Ces roches carbonatées sédimentaires sont communes sur tous les continents et se sont formées au cours de la majeure partie de l'histoire géologique. Le calcaire marin se forme parce que l'eau de mer contient de fortes concentrations de deux produits chimiques dissous clés : les ions calcium (Ca^{+2}) et bicarbonate (HCO^{-3}). Dans la couche proche de la surface de la plupart des océans, les coraux, les palourdes et d'autres créatures marines utilisent ces deux produits chimiques pour fabriquer des coquilles protectrices en les combinant pour former de la calcite ou « aragonite », qui a la même composition chimique que la calcite mais a une composition différente.

Certains calcaires ont été modifiés par l'introduction de magnésium dans les nappes phréatiques. Le magnésium dans les eaux souterraines peut convertir une partie ou la totalité de la calcite du calcaire en dolomite. De plus, certaines roches formées près des rives des mers anciennes dans les climats arides étaient principalement de la dolomie au moment de leur dépôt.

Les dépôts de calcaire sédimentaire peuvent être étendus, couvrant des centaines de kilomètres carrés, et peuvent être relativement uniformes en épaisseur et en qualité. Par conséquent, les carrières de calcaire peuvent être vastes et avoir une longue durée de vie, exploitant des couches de calcaire pouvant atteindre des centaines de pieds d'épaisseur sur des

zones de plusieurs kilomètres carrés. De nombreuses carrières produisent de multiples produits, et les roches concassées qui ne sont pas assez pures pour certains usages peuvent encore convenir comme granulats routiers. Les carrières de marbre peuvent aussi être très grand[7].

Dans leurs étude bibliographique Gupta et al. [8] ont cités les différentes propriétés des ciments calcaire PLC parmi elle est la transformation de l'ettringite (AFt) en monosulfate (AFm) est retardée et le monocarbonate d'aluminate de calcium se forme de préférence à la place de l'AFm. Aux premiers âges, en raison de l'hydratation accélérée de l'alite, le volume total de la phase hydratée augmente et la porosité diminue. Le calcaire, en raison de sa nature molle et de sa large distribution granulométrique, remplit les espaces entre les particules de clinker, réduisant ainsi la demande en eau. Il a également été observé que l'inclusion de calcaire finement broyé diminuait le ressuage dans le béton de masse. Le comportement de prise du PLC est directement proportionnel à la finesse du clinker et du calcaire. Il a été rapporté que le temps de prise des ciments contenant du calcaire < 5 % était augmenté, tandis que l'ajout de calcaire > 5 % au ciment réduirait le temps de prise. Le calcaire fixe l'hydratation d'Alite (C3S), libérant une chaleur d'hydratation élevée pendant le processus d'hydratation. Ils ont observé que l'ajout de calcaire (5% ou 25%) augmenterait le taux d'hydratation de l'alite en favorisant le développement d'une enveloppe de silicate de calcium hydraté (CSH) autour des grains d'alite.

I-5-3-Laitier granulé de hauts fourneaux

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit obtenu lors de la production de fonte brute dans un haut fourneau et comprend principalement des silicates, des aluminosilicates de calcium et d'autres bases. Lorsque le laitier fondu est rapidement refroidi avec de l'eau dans un bassin, ou refroidi par de puissants jets d'eau, il se transforme en une forme vitreuse fine, granuleuse et entièrement amorphe connue sous le nom de laitier granulaire, qui possède des propriétés hydrauliques latentes.

Un tel laitier granulaire, lorsqu'il est finement broyé, s'est avéré présenter d'excellentes propriétés cimentaires avec du ciment Portland ou de l'alcali activé.

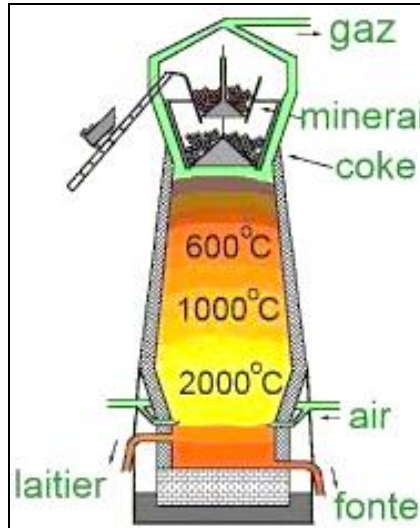


Figure I. 11: Schéma simplifié de la fabrication du laitier.

Dans la pâte de ciment durcie (28 jours), la teneur en hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) et l'eau liée chimiquement ($W_{c,bw}$) diminuent avec l'augmentation de la proportion de laitier dans le liant. La teneur en Ca(OH)_2 dans la pâte de ciment durcie fait du liant avec un dosage de laitier allant jusqu'à 70% est supérieur à 4% (tableau I.3), ce qui est suffisant pour assurer la préservation des armatures dans le béton.

La diminution de la teneur en eau liée chimiquement avec l'augmentation de la proportion de laitier dans le liant met en évidence la présence de silicate de calcium hydraté à faible capacité basique dans la pâte de ciment durcie, favorable à l'augmentation de la résistance au gel du mortier et à l'eau, et la résistance aux agents chimiques dans le ciment mélangé[9].

Tableau I. 3: Teneur en Ca(OH)_2 et ($W_{c,bw}$) en fonction du dosage de laitier selon Schuldyakov et al.

Slag and cement proportion	Ca(OH) ₂ content, %	W _{c,bw} content, %
	Normal maturing	
0/100	14,4	14,2
10/90	14,0	14,9
20/80	13,2	14,1
30/70	11,3	13,8
40/60	9,2	12,3
50/50	8,2	11,9
60/40	6,2	11,1
70/30	5,5	10,6
80/20	2,8	9,2
90/10	1,3	7,3

I-5-4-Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W)

En tant que sous-produit industriel, les cendres volantes résultent de la combustion du charbon pulvérisé dans les centrales électriques. Les impuretés minérales (telles que l'argile, le quartz, le feldspath, le schiste) dans la mèche de charbon en suspension et s'écoulent avec les gaz d'échappement, lors de la combustion à environ 1600°C, des particules de cendres volantes amorphes et sphériques se forment à partir de la solidification de la gangue en refroidissement rapide.

Les configurations les plus utilisées des composites ciment-cendres, sont représentées sur la figure I.12. Les méthodes les plus couramment utilisées pour activer les liants de ciment et de cendres volantes sont : activation mécanique, activation par réactif et l'activation chimique[10].

- L'activation mécanique est principalement obtenue par broyage des cendres volantes, ce qui augmente la surface spécifique des cendres volantes. Le résultat apporte des grains de cendres plus réactifs avec des diamètres de grains très petits ($< 15 \mu\text{m}$) et une surface spécifique beaucoup plus élevée. Grâce à une séparation appropriée des grains, on peut obtenir la bonne qualité de cendres volantes comme composant de ciment ou de béton. En séchant, tamisant et séparant à l'air les cendres volantes à forte perte au feu stockées dans les décharges, on peut obtenir un produit technologiquement avantageux. Le processus de broyage conduit à la modification de la morphologie des grains de cendres volantes, la coupe sphérique des grains est remplacée par des grains de forme irrégulière caractérisés par une demande en eau plus élevée.
- En introduisant des composants plus réactifs dans leur composition : fumée de silice et nanoadditifs, une amélioration de la résistance et de la durabilité des liants ciment-cendres peut être obtenue. La nanosilice est un additif couramment utilisé dans la composition des ciments à base de cendres.
- L'activation alcaline des liants sans ciment (connus dans la littérature sous le nom de géopolymères) est réalisée à l'aide de solutions fortement alcalines, le plus souvent du silicate de sodium ou de potassium, de la soude (NaOH) ou de la potasse (KOH). L'augmentation de la température au cours de la première douzaine ou plusieurs dizaines d'heures du processus d'hydratation (de 40°C à 90°C) est une mesure de soutien importante de l'activation alcaline.

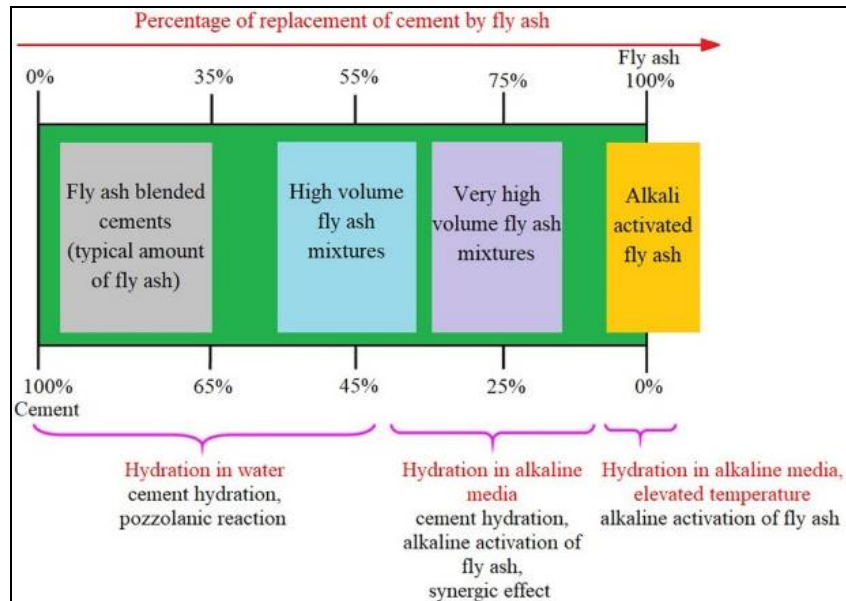


Figure I. 12: Les possibilités générales de remplacement du ciment par des cendres volantes selon Giergiczny.

I-5-5-Le métakaolin

Il est principalement produit par traitement thermique d'argiles de kaolin à une température allant d'environ 600°C à 800°C. Ce processus de traitement est important pour la production de matériaux pouzzolaniques hautement réactifs. L'eau est chassée de l'argile kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et la structure du matériau s'effondre, ce qui donne un aluminosilicate amorphe ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) appelé métakaolin ou métakaolinite. Le processus est nommé déshydroxylation.

Le métakaolin fait partie des matériaux de construction classés comme une nouvelle génération d'adjuvants minéraux utilisables comme ajouts cimentaires. Il offre des avantages techniques et environnementaux précieux.

Wianglor et al. ont [11] remplacé une partie du métakaolin par du ciment Portland (PC) à hauteur de 0, 30, 20, 15, 10, 5% en masse de liant en utilisant l'hydroxyde de sodium et le silicate de sodium comme agents d'activation. La résistance à la compression des mortiers de ciment au métakaolin activé par les alcalis augmente avec l'augmentation du niveau de remplacement du PC. Les éléments de calcium ont réagi avec la silice et l'alumine et ont formé des CSH et CASH supplémentaires qui ont coexisté avec le gel géopolymère. Les spécimens durcis à (23°C, 55 % HR) présentent une faible résistance à la compression par rapport aux spécimens durcis à température élevée (60 °C, 95 % HR) en raison de la réaction accélérée à température élevée (Figure I.13).

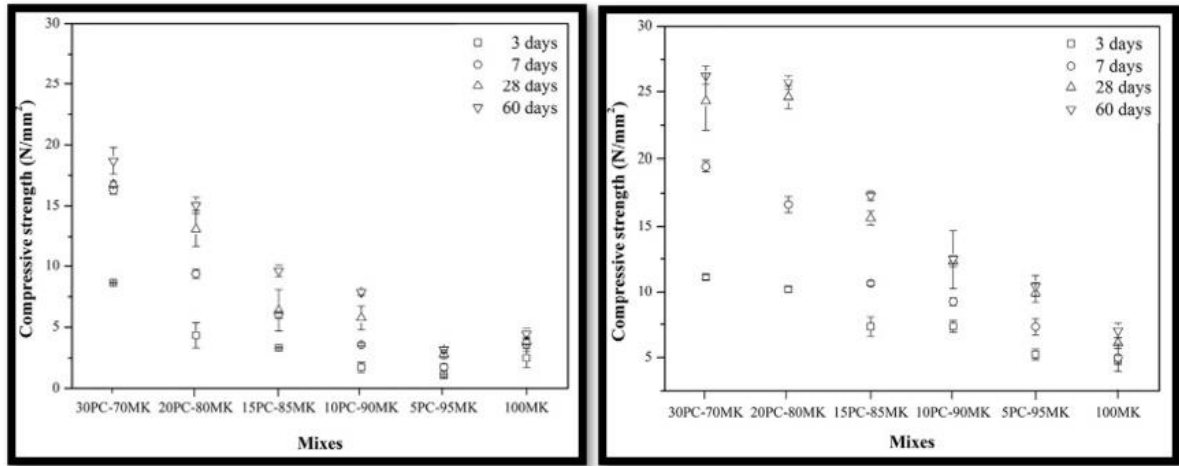


Figure I. 13: Résistance à la compression des mortiers avec métakaolin selon Wianglor.

I-6-La production du ciment

Selon CEMBUREAU, en 1900, la production mondiale totale de ciment était d'environ 10 millions de tonnes ; en 1998, il était de 1,6 milliard de tonnes (Figure I.14). Si l'on suppose qu'en moyenne 250 kg de ciment sont utilisés pour produire 1m³ de béton, en 1900 seuls 40 millions de m³ de béton étaient utilisés, alors qu'en 1998 la quantité produite était d'environ 6,4 milliards de m³. C'est un peu plus de 1m³ de béton par personne et par an, soit plus de 2,5 tonnes de béton par personne et par an [12].

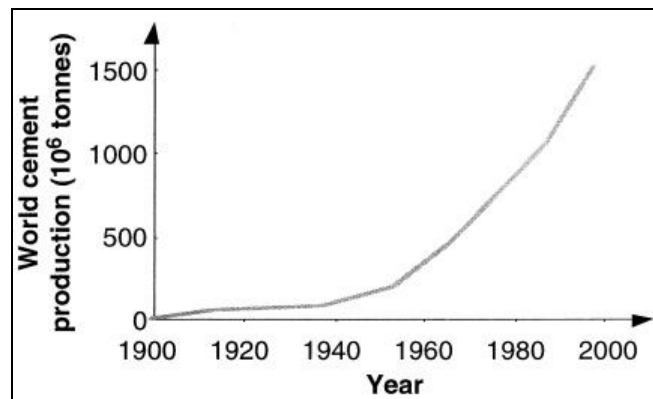


Figure I. 14: Production mondiale entre 1900 et 1998 selon Aïtcin.

Après une forte contraction en 2020 due au COVID-19, la reprise mondiale pour 2021 est estimée à +5,9% et à +5,3% dans les 27 pays de l'union européen (UE27). Pour 2022 et 2023, un rebond de l'économie est attendu avec des prévisions à 4,4% et 3,8% respectivement au niveau mondial, et 4,0% et 2,8% respectivement dans l'UE27.

Selon CEMBUREAU[13], la production mondiale de ciment en 2020 est estimée à environ 4,17 milliards de tonnes (Figure I.15), oscillant autour des 4 milliards magiques, principalement en raison d'une croissance plus élevée en Chine, tandis que l'Inde a connu une baisse, mais l'incertitude sur les volumes pour ces deux acteurs majeurs est élevée. La Chine produit encore environ 57,2 % du ciment mondial, l'UE27 représentant 4 % et les membres de

CEMBUREAU représentant 6,1 % de la production mondiale. Outre les pays du G20 représentés, cinq pays émergents du continent eurasien produisent ensemble près de 7% (6,8%) du volume mondial : le Vietnam (77Mt) et la Thaïlande (36Mt) en Extrême-Orient, et l'Iran (68Mt), l'Egypte (47Mt) et le Pakistan (48Mt) au Moyen-Orient. La production des cinq pays a légèrement diminué en 2020, à l'exception de celle de l'Iran qui a augmenté de 24 % en un an.

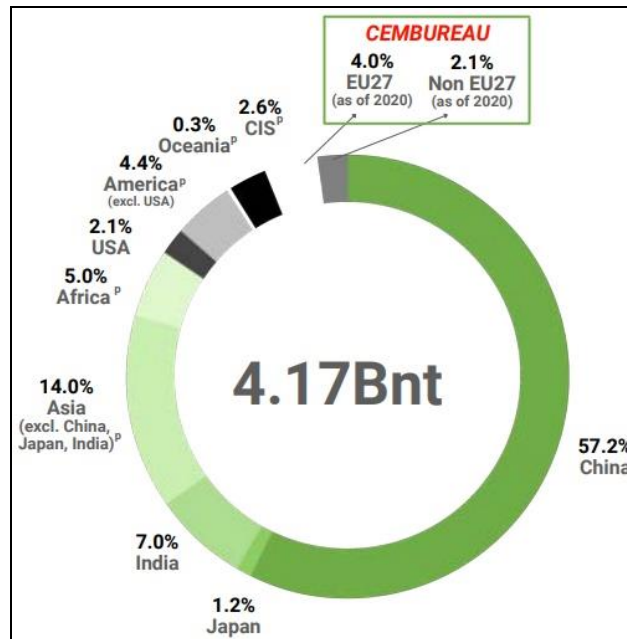


Figure I. 15: Production mondiale de ciment selon CEMBUREAU.

Concernant la neutralité carbone ou zéro carbone tout au long de la chaîne de valeur du ciment et du béton d'ici 2050, la principale conclusion est que les émissions de CO₂ peuvent être réduites en agissant à chaque étape de la chaîne de valeur - clinker, ciment, béton, construction et (re)carbonatation - pour atteindre zéro émission nette d'ici 2050 (Figure I.16).

Certaines de ces réductions d'émissions seront réalisées grâce à la mise en œuvre de technologies révolutionnaires, mais, surtout, des économies de CO₂ peuvent également être réalisées avec des investissements technologiques limités. En effet, un ensemble de technologies, de politiques et de changements de production seront nécessaires tout au long du cycle de vie, depuis la production du clinker jusqu'à la recarbonatation et le recyclage du béton. Celles-ci incluent par exemple l'utilisation de déchets non recyclables et issus de la biomasse pour remplacer les combustibles fossiles ; des fours plus économes en énergie ; le développement de ciments innovants à faible teneur en clinker ; le déploiement de technologies révolutionnaires de captage et de stockage/utilisation du carbone (CCUS) ; des mélanges de béton et des techniques de construction optimisés.



Figure I. 16: Feuille de route de réduction du CO₂ selon CEMBUREAU.

Selon l'Algérie Presse Service, dans l'article apparu le 11 janvier 2023, Près de 3 millions de tonnes de ciment et de clinker seront exportés en 2023 par l'Entreprise des ciments et dérivés de Chlef (ECDE), relevant du Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA).



CHAPITRE II :

La Céramique

II-1-Introduction

La céramique est l'une des classes de matériaux les plus importantes. Les produits céramiques font aujourd'hui partie des matériaux de construction essentiels utilisés dans la plupart des bâtiments. En compte plusieurs types ; des carreaux muraux, des carreaux de sol, des vêtements sanitaires, des céramiques domestiques et des céramiques techniques, etc.

Malgré les bienfaits ornementaux de la céramique, l'industrie de la céramique a un impact significatif sur l'environnement, en termes d'émissions de CO₂ et les besoins énergétiques. A l'Union Européenne, la production annuelle de céramique s'élève à 50 Mt de pièces par an et les émissions de CO₂ ont atteint 1 Mt/an[14].

De plus, les déchets solides deviennent de plus en plus dévastateurs et encombrants dans plusieurs pays. Le cumule des quantités des déchets générés lors de la fabrication, le transport et la pose sur chantier, ne donne pas un temps de réflexion trop long. Afin de réduire ces quantités chercheurs et intervenants valorisent ces déchets dans différents secteurs parmi eux le secteur de génie civil et spécialement la valorisation des céramiques dans les produits cimentaires.

II-2 La céramique

Nous définissons la céramique comme l'art et la science de fabriquer et d'utiliser des articles solides qui ont comme composant essentiel et sont composés en grande partie de matériaux inorganiques non métalliques (Figure II.1). La définition inclut non seulement des matériaux tels que la poterie, les porcelaines, les réfractaires, les produits structuraux en argile, les abrasifs, les émaux de porcelaine, le ciment et le verre, mais également les matériaux magnétiques non métalliques, les ferroélectriques, les vitrocéramiques[15].



Figure II. 1: Travail à la main d'une sculpture en argile.

Le composant essentiel des premières céramiques employées étaient les silicates. Ensuite, elles ont connu une utilisation plus étendue allant de la porcelaine culinaire aux appareils sanitaires. Les oxydes purs, les borures, nitrures, siliciures, etc., ont été successivement inclus dans la catégorie des céramiques. Aujourd'hui, deux grandes familles peuvent être distinguées[16]:

Avec l'établissement des communautés sédentaires dédiées à l'agriculture et à l'élevage l'utilisation de la céramique a considérablement augmenté au cours de la période néolithique. Les céramiques sont devenues populaires comme récipients pour l'eau et la nourriture, les tuiles et les briques, à partir d'environ 9 000 avant notre ère, et leur utilisation s'est répandue vers l'Asie au Moyen-Orient et en Europe.

Les premiers produits étaient simplement séchés au soleil ou cuits à basse température (inférieure à 1000°C) dans des fours creusés dans le sol. La poterie était soit monochrome, soit décorée en peignant de simples motifs linéaires ou géométriques.

Au XV^{ème} siècle, les premiers hauts fourneaux ont été développés en Europe, capables d'atteindre jusqu'à 1500°C. Ils étaient utilisés pour faire fondre le fer et étaient initialement construits à partir de matériaux naturels. Lorsque des matériaux synthétiques plus résistants aux hautes températures (appelés réfractaires) ont été développés au XVI^{ème} siècle, la révolution industrielle est née. Ces réfractaires ont créé les conditions nécessaires à la fusion des métaux et du verre à l'échelle industrielle, ainsi qu'à la fabrication de coke, de ciment, de produits chimiques et de céramiques.

Depuis lors, l'industrie de la céramique a connu une profonde transformation. Non seulement la céramique et le verre traditionnels sont devenus omniprésents, mais au fil des ans, de nouveaux produits ont été développés pour tirer parti des propriétés uniques de ces matériaux, telles que leur faible conductivité thermique et électrique, leur résistance chimique élevée et leur point de fusion élevé.

Après la seconde guerre mondiale, la céramique et le verre ont contribué à la croissance de nombreux domaines technologiquement (l'électronique Figure II.4, l'optoélectronique, le médical, l'énergie, l'automobile, l'aérospatiale et l'exploration spatiale). De plus, les innovations dans les techniques de traitement et de caractérisation de la céramique ont permis la création de matériaux aux propriétés sur mesure qui répondent aux exigences d'applications spécifiques et personnalisées.



Figure II. 4: Condensateur céramique.

Ces dernières années, le traitement de la céramique a acquis une nouvelle vigueur grâce à la nanotechnologie, qui permet aux fabricants d'introduire des matériaux et des produits aux propriétés non conventionnelles, tels que la céramique transparente, la céramique ductile, les condensateurs microscopiques, etc.

II-4-Les grandes ligne de fabrication des céramiques[18]

II-4-1- La matière première

Une grande variété de poudres, est utilisée aujourd'hui dans l'industrie céramique. Les poudres pour les céramiques traditionnelles sont comme exemple l'argile, le feldspath, le kaolin, etc. et les poudres pour céramiques techniques sont l'alumine, le zircon (Figure II.5), les nitrures, etc. Ils présentent des caractéristiques chimiques et physiques variables, qui doivent être maîtrisées pour fabriquer des pièces aux propriétés souhaitées de manière reproductible.



Figure II. 5: Différents états du zircon.

La préparation des poudres est donc une étape importante dans les procédés de mise en forme. L'objectif est d'obtenir une poudre qui, donne la microstructure souhaitée, lors de la mise en forme et assure une densification satisfaisante lors du frittage.

Les poudres de céramique, dont la surface est généralement hydratée, ont tendance à s'agglomérer sous l'influence des forces de Van der Waals. Les agglomérats et les granulats doivent être évités, car ils engendrent des hétérogénéités de tassement des particules lors de la mise en forme, ce qui se traduit par des retraits différentiels lors du frittage et la formation de pores. Pour éliminer ces formations un broyage préalable est généralement réalisée.

Outre leur taille des poudres, les particules se différencient également par leur forme. Les particules de poudres peuvent ainsi être sphéroïdales, équiaxes, sous forme de plaques, de fibres ou d'aiguilles. La microscopie optique ou électronique à balayage permet d'observer la forme et de caractériser l'anisotropie des particules. On peut cependant profiter d'une orientation préférentielle de ces particules pour obtenir une propriété (mécanique, magnétique, etc.) renforcée dans une direction particulière.

II-4-2- Préparation de la suspension

La dispersion des particules céramiques est l'une des étapes fondamentales dans les procédés de mise en forme, que ce soit par voie liquide, plastique ou sèche. Le but est d'aboutir à un système homogène et stable de particules élémentaires, ou partiellement agglomérées dans le cas de la coulée de céramiques traditionnelles, dans un liquide ou une phase, généralement organique, de viscosité plus élevée.

Il faut donc contrôler l'état de dispersion des particules, qui va déterminer la structure du mélange. Elle comporte trois étapes :

- Le mouillage de la surface de la poudre par le liquide, qui se traduit par la substitution des interfaces solide/gaz par des interfaces solide/liquide.
- La désagglomération, c'est-à-dire la rupture des agglomérats « mous » en particules élémentaires ou en agrégats « durs » de particules élémentaires.
- La stabilisation de l'état de dispersion vis-à-vis de la sédimentation et de la réagglomération.

II-4-3-La Coulée

II-4-3-1-Coulée en barbotine

La coulée en barbotine (Figure II.6) est la méthode la plus conventionnelle de réalisation de pièces très variées pouvant avoir des formes complexes (cuisine, sanitaire, matériaux réfractaires, céramiques techniques).



Figure II. 6: Coulée en barbotine pour céramique sanitaire.

Cette méthode consiste à couler une suspension (barbotine) dans un moule poreux, généralement en plâtre. La migration capillaire du liquide dans les pores du moule entraîne la formation d'une couche consolidée de particules à la surface du moule. Les principaux avantages du coulage en barbotine sont la complexité des formes, un faible coût et l'utilisation de suspensions parfaitement dispersées dans les céramiques techniques conduisant à des microstructures vertes denses et homogènes. L'inconvénient majeur est sa faible capacité de production.

Les suspensions aqueuses sont les plus courantes mais les matériaux hydrolysables (MgO, CaO, La₂O₃...) et les non-oxydes (SiC, Si₃N₄, AlN...) sont coulés en milieu organique (alcool, cétone, trichloroéthylène).

Dans le cas de la coulée à l'air libre, la forme extérieure de la pièce est définie par le moule et lorsque l'épaisseur de la paroi consolidée est suffisante (temps de prise), la suspension est vidée. Les pièces réalisées par coulée entre deux moules (ou entre deux plâtres) ont la forme de la cavité du moule. Les parois peuvent être épaisses et avoir des épaisseurs variables.

L'obtention de pièces céramiques, aux propriétés satisfaisantes de manière reproductible par coulée en barbotine nécessite un choix judicieux de la granulométrie et la maîtrise de la chimie de surface des particules. Le comportement rhéologique et la viscosité des suspensions dépendent en effet directement de la granulométrie des poudres, des interactions interparticulaires (état de dispersion) et de la concentration en particules.

Dans le cas des céramiques techniques, la granulométrie est généralement faible avec une distribution étroite pour assurer une réactivité au frittage satisfaisante et une microstructure homogène. En revanche, dans le cas des céramiques traditionnelles, le mélange est typiquement constitué de fines plaquettes d'argile, ainsi que de particules de silice et de feldspath de l'ordre de quelques dizaines de micromètres.

II-4-3-2-Coulée sous pression

Un apport de pression, diminue le temps de prise. La coulée sous pression consiste donc à appliquer une pression, généralement inférieure à 5 MPa, à la suspension dans le moule poreux.

Le gradient de pression ainsi créé forcera le fluide à travers le réseau poreux et la couche formée, réduisant considérablement le temps de prise par rapport à la coulée traditionnelle. La coulée sous pression réduit la teneur en eau dans la partie crue et augmente sa densité et sa cohésion. Ce processus informatisé offre une productivité élevée. Il est largement utilisé dans l'industrie pour la production d'articles sanitaires et de vaisselle en céramique.

Deux autres méthodes de coulée réduisent également le temps de prise par rapport à la coulée traditionnelle : la coulée sous vide et la coulée par centrifugation. La première méthode est similaire à la coulée sous pression, mais la suspension est aspirée à travers le moule poreux. Dans le deuxième procédé, les particules sont entraînées par centrifugation, ce qui donne un dépôt de haute densité. La coulée par centrifugation est utilisée dans le domaine des céramiques techniques.

II-4-4-Pressage et moulage

Le pressage (Figure II.7) est la compression d'une poudre ou de granulés dans une matrice rigide (pressage uni-axial) ou dans un moule souple (pressage isostatique). C'est la méthode la plus utilisée pour façonner des pièces en céramique, car elle permet la fabrication de pièces relativement complexes avec des tolérances dimensionnelles serrées et une productivité élevée. Une large gamme de pièces en céramique est produite grâce à la technique de pressage : carreaux, plaques, matériaux réfractaires, abrasifs, outils de coupe, ainsi que diverses pièces électro-céramiques, magnétiques et diélectriques.

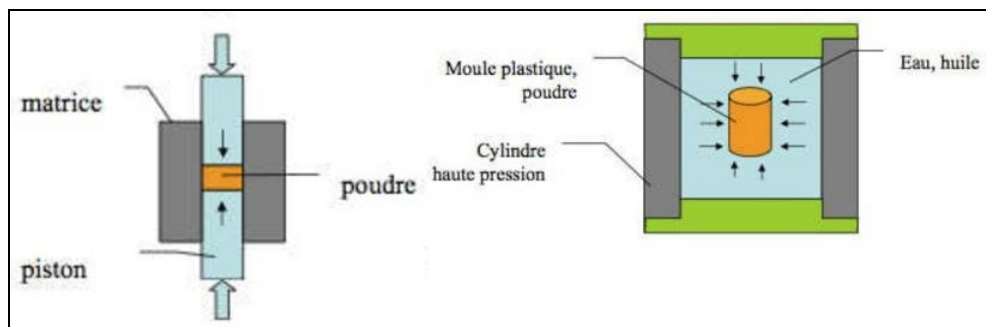


Figure II. 7: Pressage uni-axial (à gauche) et isostatique (à droite).

Le pressage uni-axial dans une matrice métallique, à un (simple effet) ou deux (double effet) pistons presseurs, est utilisé pour la réalisation de pièces dont l'épaisseur est supérieure à 0.5 mm, avec un rapport surface/épaisseur élevé et ne présentant des reliefs que dans la sens de pression.

Les étapes du pressage de la poudre séchée sont les suivantes :

- Etape 1 : réarrangement des granules ;
- Etape 2 : déformation ou fragmentation des granules et élimination de la porosité entre les granules (macroporosité intergranulaire) ;
- Etape 3 : élimination de la microporosité présente initialement à l'intérieur des granules (microporosité intergranulaire), par réarrangement ou fragmentation des particules.

Le pressage isostatique dans un moule souple permet la fabrication de formes complexes avec des reliefs dans trois directions, ainsi que des formes allongées comme des tubes

Le pressage isostatique est utilisé pour la réalisation de pièces difficiles à obtenir par pressage uni-axial. Ce procédé de pressage présente l'avantage de l'obtention d'une répartition homogène de la pression à l'intérieur de la pièce. Il est utilisé pour réaliser des pièces nécessitant une densité crue élevée et très homogène.

Le pressage semi-isostatique est une combinaison de pressage isostatique et uni-axial. Il est largement utilisé pour la production de pièces plates comme les assiettes et les plats qui ont un rapport diamètre/épaisseur élevé avec des épaisseurs inférieures à 5 mm. Un poinçon

métallique applique une pression uni-axial sur la surface la plus simple de la pièce (partie creuse de la plaque) et une membrane souple applique, à l'aide d'un fluide, une pression isostatique sur l'autre surface de forme plus complexe. Le remplissage, le pressage et l'extraction effectués simultanément sur des tables tournantes permettent des cadences élevées.

Le moulage par injection est l'un des procédés de mise en forme des matières plastiques. Il permet la fabrication, de manière reproductible et à cadence élevée, de pièces aux formes complexes et aux tolérances dimensionnelles étroites nécessitant peu d'opérations ultérieures d'usinage et de finition de surface.

Le moulage par injection consiste à forcer le mélange plastique dans la cavité d'un moule. Basée sur les connaissances technologiques dans le domaine de la plasturgie, la production de masse de pièces céramiques par moulage par injection s'est généralisée d'abord dans le domaine du textile (guides fils) et de l'électronique (boîtiers) avant d'être utilisée pour la conception de céramiques thermomécaniques (soupapes, culbuteurs chaussures de bras) et matériaux réfractaires (buses). Dans le domaine de la céramique traditionnelle, cependant, les tentatives d'industrialisation de cette technique de fabrication ont été freinées jusqu'à présent par les surcoûts d'équipement et d'additifs organiques, par rapport aux méthodes traditionnelles de coulée et de pressage. Les pièces produites sont généralement de taille limitée et ont une épaisseur inférieure à 1 cm, à l'exception notable des pièces réfractaires qui peuvent avoir une épaisseur de 2 à 3 cm.

II-4-5-Traitement de surface

L'objectif de traitement de matériaux céramiques, est de déposer une couche de céramique sur un support (métallique, céramique, organique) pour obtenir des propriétés de surface différentes du matériau. Les applications de ces matériaux enrobés sont nombreuses (tribologie, isolation thermique, résistance à la corrosion, électronique, optique, optoélectronique, biomédical, etc.). L'épaisseur des couches peut varier de quelques couches atomiques pour les techniques de dépôt sous vide (on parle alors de couches minces) à quelques millimètres dans le cas de la projection plasma

II-4-6-La 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.

II-5-Différents types de céramique[19]

Selon la méthode de fabrication et la structure, les briques, les tuiles, les tuyaux, la terre cuite, la faïence, le grès, la porcelaine et la majolique sont bien connus et utilisés dans la construction de bâtiments.

Les briques en terre cuite ont une apparence, une résistance et une durabilité agréables, tandis que les tuiles en terre cuite utilisées pour les cloisons et les sols légers possèdent une résistance et une résistance au feu élevées.

II-5-1-La brique

C'est l'un des plus anciens matériaux de construction. Il continue d'être le matériau de le plus populaire en raison de son bon marché, de sa durabilité et de sa facilité de manipulation. Les briques d'argile sont utilisées pour construire des murs extérieurs et intérieurs, des cloisons, des piliers, etc.

Une brique est de forme rectangulaire (Figure II.8) et d'une taille qui peut être facilement manipulée d'une seule main. La brique peut être faite d'argile cuite ou d'un mélange de sable et de chaux ou de béton de ciment Portland.

Pour la préparation des briques, l'argile ou toute autre terre appropriée est moulée à la forme souhaitée après l'avoir soumise à plusieurs processus. Après séchage, elle ne doit pas rétrécir et aucune fissure ne doit se développer.

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.

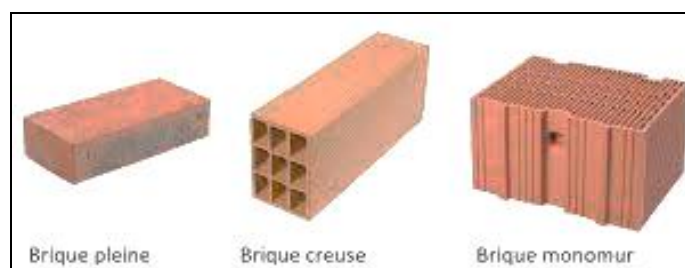


Figure II. 8: Différents types de brique.

II-5-2-La tuile

Les tuiles sont de fines dalles d'argiles à bas point de fusion utilisées à diverses fins dans les constructions. 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 (Figure II.9) sont fabriquées de la même manière que les briques, mais sont plus fines et plus légères et nécessitent donc plus de soin. Ceux-ci sont fabriqués à partir d'une masse d'argile avec ou sans mélanges d'impuretés colorantes par moulage et cuisson ultérieure jusqu'à la cuisson, jusqu'à environ 1300 °C. L'argile doit être très plastique avec des mélanges maigres et des agents de fusion pour abaisser le point de fusion. Ils sont moulés dans des machines du type à vis sans fin ou à piston et sont généralement brûlés dans des fours continus.



Figure II. 9: La tuile.

II-5-3-La terre cuite

L'origine du mot vient de l'italien « Terracotta », Terra signifie argile et Cotta signifie brûler. La terre cuite est un produit d'argile réfractaire et est utilisée dans les parties ornementales des bâtiments.

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 (Figure II.10), 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 brûlé dans des fours spéciaux (four à moufle).

L'argile est soigneusement mélangée avec de l'eau dans une cuve. Le mélange est ensuite placé dans des caisses en bois avec joints. Cela permet à l'excédent d'eau de s'écouler. Par la suite, le mélange est passé plusieurs fois dans des moulins à carlin.

La terre cuite est brûlée avec soin pour obtenir une couleur uniforme dans un four à moufle entre 1100 et 1200°C.



Figure II. 10: Carrelage en terre cuite.

II-5-4-La porcelaine

C'est la céramique de haute qualité ayant une couleur blanche (Figure II.11), une absorption d'eau nulle et une surface émaillée qui peut être molle ou dure. Elle se compose d'argile finement dispersée, de kaolin, de quartz et de feldspath, cuite à haute température et recouverte d'une glaçure colorée ou transparente. Le matériau d'émaillage est appliqué avant la cuisson.

A des températures élevées, les particules de feldspath fusionnent et lient les autres constituants en une masse dure, dense et vitreuse. La température élevée assure la non-porosité et un meilleur produit.



Figure II. 11: La porcelaine sanitaire.

II-5-5-Le grès

C'est un matériau dur qui ressemble à de la porcelaine avec une couleur différente, généralement grise ou brunâtre. L'argile utilisée pour la fabrication du grès se compose d'environ 75 % de silice et 25 % d'alumine. De l'oxyde de fer est ajouté pour donner de la couleur.

II-6-Le marché des céramiques

En 2013[20], le marché total des céramiques en Union européenne était de l'ordre de 30 milliards d'euros/an. Les secteurs les plus importants (Figure II.12) étaient l'industrie des carreaux de revêtement et de dallage, les tuiles et briques (24 %) et les réfractaires. La plus grande partie de la production a lieu en Allemagne, Grande-Bretagne, Espagne et Italie.

20 à 25 % de la production européenne a été exportée vers les USA, la Russie, la Suisse. L'Europe importait 8 % des produits réfractaires et jusqu'à 60 % de vaisselle et la céramique d'ornementation.

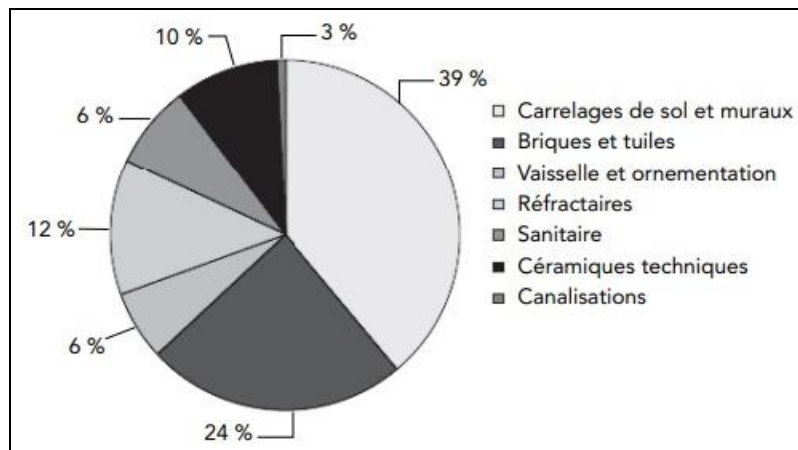


Figure II. 12: Répartition en chiffre d'affaires des céramiques en Europe par secteur selon Fantozzi et al .

Selon le rapport publié par Ceramic World Review[21] (CWR), les flux mondiaux d'import/export d'articles sanitaires en céramique ont augmenté de 81 %, passant de 2,16 millions à 3,9 millions de tonnes sur la période 2010-2021, correspondant à un taux de croissance annuel composé de 5,6 % (Tableau II.1). La tendance positive qui a duré presque toute la décennie a été encore renforcée par la forte reprise des exportations observée dans toutes les zones géographiques de production et dans les plus grands pays exportateurs en 2021 (+16,5% sur 2020).

L'Asie consolide sa position de premier exportateur mondial d'articles sanitaires, augmentant sa part des exportations mondiales à 64,6 % grâce à une croissance de 19 % à 2,5 millions de tonnes. Cette évolution est le résultat des rebonds enregistrés la Chine, l'Inde, la Thaïlande, le Vietnam et l'Iran.

La Chine en tête du classement en 2021 avec 1,98 million de tonnes (en hausse de 16 % par rapport à 2020 et 902 000 tonnes en 2010). Elle représente à elle seule 78 % des exportations asiatiques et 50 % des exportations mondiales.

Le Mexique, deuxième pays exportateur (Tableau II.2) avec une part de 8,4% des exportations mondiales. Portée par une croissance de 54% sur 2020 de 172 000 à 264 000

tonnes, l'Inde est à la troisième place suivie de la Turquie avec 203 000 tonnes (+22% sur 2020), puis de la Thaïlande, de la Pologne, de l'Allemagne, du Portugal et du Vietnam. Dans l'ensemble, les 10 plus grands pays exportateurs d'articles sanitaires représentaient 83 % des exportations mondiales.

Tableau II. 1: Exportations mondiales de céramique sanitaires (en tonnes) 2010-2021 selon CWR.

	2010	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	% 21/20	CAGR 21/10	% on 2021 world exports
Asia	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%
European Union	522,118	530,149	569,475	583,409	570,549	585,034	541,584	488,917	552,268	13.0%	0.5%	14.1%
Other 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%
NAFTA	268,401	329,677	340,565	368,326	366,973	375,412	365,789	368,372	379,235	2.9%	3.2%	9.7%
South America	100,043	82,515	72,548	80,315	79,513	89,375	86,782	78,814	99,851	26.7%	-0.02%	2.5%
Africa	35,861	88,524	84,042	71,958	65,933	66,113	75,238	64,296	75,386	17.2%	7.0%	1.9%
Oceania	1,960	847	902	1,084	411	583	580	315	364	15.6%	-14.2%	0.0%
TOTAL WORLD	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%	100.0%
% var y-o-y		11.8	2.1	-1.9	5.1	9.3	6.1	-4.7	16.5			

Tableau II. 2: Les dix premiers pays exportateurs de céramique sanitaires (en tonnes) 2010-2021 selon CWR.

	2010	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	% 21/20	CAGR 21/10	% on 2021 world exports
China	901,962	1,280,270	1,335,212	1,238,558	1,378,951	1,532,833	1,747,579	1,698,152	1,968,003	15.9%	8.1%	50.2%
Mexico	226,569	276,984	295,439	322,169	326,289	342,666	335,958	333,230	328,904	-1.3%	3.8%	8.4%
India	15,076	119,626	119,752	135,776	137,717	182,691	199,371	171,698	264,253	53.9%	33.2%	6.7%
Turkey	94,354	125,256	120,613	127,065	140,759	154,285	164,809	166,370	203,467	22.3%	8.0%	5.2%
Thailand	57,189	75,794	79,242	81,016	86,512	96,067	92,094	87,129	111,703	28.2%	6.9%	2.9%
Poland	67,572	69,913	77,048	80,323	76,620	78,617	77,470	82,537	91,206	10.5%	3.0%	2.3%
Germany	63,742	58,343	65,734	79,124	75,478	81,952	80,382	75,861	88,863	17.1%	3.4%	2.3%
Portugal	75,049	78,360	87,434	93,891	94,164	101,654	81,574	65,438	82,200	25.6%	0.9%	2.1%
Vietnam	19,590	57,424	47,892	35,034	40,457	41,292	52,982	51,986	67,565	30.0%	13.2%	1.7%
Iran	25,895	38,894	31,420	33,962	35,206	46,573	46,469	48,893	52,869	8.1%	7.4%	1.3%
TOTAL	1,546,998	2,180,864	2,259,786	2,226,918	2,392,153	2,658,630	2,878,688	2,781,294	3,259,033	17.2%	7.7%	
% on total world exports	71.6%	75.5%	76.6%	76.9%	78.6%	79.9%	81.6%	82.7%	83.2%			

En Algérie, selon le président de l'Association des céramistes algériens (ACA) [22] le potentiel à l'export de l'Algérie peut aller jusqu'à 300 millions m² de céramique car, les 50 usines implantées sur tout le territoire national, ont un accès facile à la matière première disponible dans toutes les wilayas de l'Algérie. Ceci permet d'aller sur le plan international, en particulier le marché africain.

II-6-1- Le marché des déchets de céramique

En ce qui concerne les déchets générés par les activités de construction, Juan et al.[23] déclarent qu'environ 200 millions de tonnes de gravats sont produits chaque année dans l'Union européenne (UE) à la suite de la construction et de la démolition de bâtiments.

Selon les données du Plan national espagnol des déchets de construction et de démolition, 40 millions de tonnes sont générées annuellement en Espagne, soit l'équivalent de 2 kg par habitant et par jour, ce qui représente un chiffre supérieur à celui des déchets domestiques.

Dans l'ensemble de l'UE, 28 % de ces déchets sont recyclés. Parmi les pays européens pionniers en la matière figurent les Pays-Bas, où 95 % des déchets de construction sont recyclés, l'Angleterre, avec 45 % et la Belgique, avec 87 %, dont 17 % sont utilisés dans la fabrication du béton. En Espagne, environ 10 % du total des déchets de construction et de démolition sont recyclés, et la réutilisation consiste principalement à utiliser les déchets pour les fondations des routes.

Les déchets de construction et de démolition sont principalement constitués de deux fractions : la fraction pierreuse et le reste (tableau II.3). La fraction la plus importante est la fraction pierreuse, composée de matériaux céramiques (briques, faïences, sanitaires, etc.), de béton, de sable, de gravier et d'autres granulats.

Tableau II. 3: Composition des déchets de construction et de démolition selon Juan et al.

MATERIALS	COMPOSITION (%)
STONY FRACTION	75
Bricks, wall tiles and other ceramic materials	54
Concrete	12
Stone	5
Sand, gravel and other aggregates	4
REST	25
Wood	4
Glass	0,5
Plastic	1,5
Metals	2,5
Asphalt	5
Plaster	0,2
Rubbish	7
Paper	0,3
Others	4

II-6-2- Gestion des déchets céramiques

La céramique peut être divisée en deux groupes, selon les matériaux utilisés pour sa production. Le premier groupe comprend les produits en argile rouge (briques, tuiles, etc.), le deuxième groupe est produit en argile blanche : céramiques techniques (isolants électriques en céramique), céramiques sanitaires (lavabos, cuvettes, bidets, baignoires), récipients médicaux, etc.

Le recyclage des déchets non biodégradables (comme les céramiques) est particulièrement difficile du fait que la période de biodégradation de la céramique est très longue (jusqu'à 4 000 ans) [24].

A cause de leur caractère fragile, les céramiques sanitaires génèrent de plus en plus de déchets encombrants. Ces déchets proviennent de marchandises défectueuses rejetées lors du contrôle de qualité (les fissures, les entailles et les dommages causés par la glaçure), lors du stockage en usine, le transport ou la pose sur chantier.

L'une des voies de valorisation des déchets industriels inorganiques est leur utilisation dans la production de matériaux de construction, notamment comme matière première dans la fabrication des produits cimentaires. Ce mode de recyclage a un impact positif sur l'environnement car il réduit la quantité de déchets déposés et limite l'exploitation des gisements minéraux. Les déchets céramiques inorganiques présentent un avantage supplémentaire : ils ne nécessitent aucun traitement spécial lorsqu'ils sont utilisés.

L'utilisation de la céramique sanitaire comme poudre (SCW) a fait l'objet de quelque recherche. Nasr et al. [25] ont substitué le ciment par SCW par incrément de 5% jusqu'à 20%. L'étalement des mortiers à ciment modifié se trouve réduit lors de l'introduction des SCW (selon le tableau II.4), cette réduction est peut-être le résultat de l'absorption d'eau plus élevée du SCW. La résistance à la compression des mortiers est elle aussi réduite par 37 %, 39 %, 33 % et 6 % à des taux de remplacement de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %, respectivement. Cette diminution est due à un faible comportement pouzzolanique du SCW.

Tableau II. 4: Essai d'étalement des mortiers selon Nasr et al.

Mix designation	Flow (mm)
Control	227
5SCW	219
10SCW	204
15SCW	196
20SCW	212

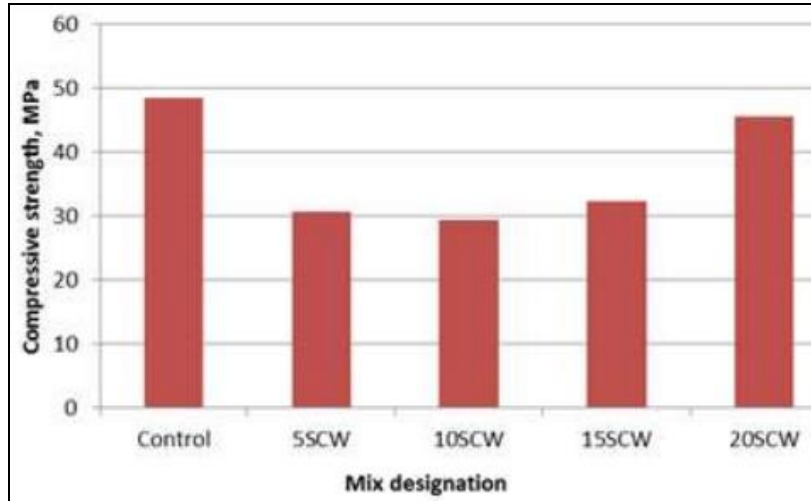


Figure II. 13: Résistance à la compression des mortiers avec SCW selon Nasr et al.

Jackiewicz-Rek et al. [26] trouvent les mêmes résultats que Nasr et al. Dans les tableaux II.5 et II.6, on peut voir que la consistance la plus élevée est obtenue pour le mortier de référence. L'incorporation d'une quantité croissante de céramique sanitaire entraîne une consistance et une plasticité inférieures du mortier.

Les résultats des tests de consistance et de plasticité montrent qu'à mesure que la teneur en céramique sanitaire dans le mortier augmente, le temps de rétention de l'ouvrabilité augmente également. Cela peut clairement être attribué à la plus grande absorption d'eau de la céramique sanitaire.

Tableau II. 5: Consistance des mortiers étudiés selon Jackiewicz-Rek et al.

Mortar	Consistency measurements [cm]				
	After mixing		After 30 min.		After 60 min.
	Mean immersion	Mean immersion	Difference	Mean immersion	Difference
M0	5.90	3.80	2.10	2.90	3.00
M10	5.53	4.35	1.18	2.60	2.93
M15	4.30	3.25	1.05	3.00	1.30
M20	3.47	2.35	1.12	2.26	1.21

Tableau II. 6: Plasticité des mortiers étudiés selon Jackiewicz-Rek et al.

Mortar	Plasticity measurements [cm]				
	After mixing		After 30 min.		After 60 min.
	Mean flow	Mean flow	Difference	Mean flow	Difference
M0	15.35	13.45	1.90	12.00	3.35
M10	13.30	12.90	0.40	11.15	2.15
M15	13.15	12.40	0.75	12.05	1.10
M20	12.80	11.15	1.65	-	-



CHAPITRE III:
Essais, résultats et discussion

III.1. Introduction aux essais réalisés

III.1.1. Mesure des oxydes

III.1.1.1 La fluorescence X

C'est une technique spectrale non destructive exploitant la photoluminescence des atomes dans le domaine des rayons X, pour établir la composition élémentaire d'un échantillon. L'excitation des atomes généralement par un faisceau de rayons X ou par bombardement avec des électrons, génère des radiations spécifiques après retour à l'état fondamental de l'atome. Le spectre de fluorescence X a l'avantage de dépendre très peu de la combinaison chimique de l'élément, ce qui offre une détermination précise, à la fois quantitative et qualitative.

III.1.1.2. La perte au feu

Pour totaliser 100% en fraction massique une analyse d'oxydes, une détermination de la perte au feu, c'est-à-dire la quantité d'eau et de dioxyde de carbone combinés, est nécessaire. La perte au feu est une approximation très proche de la variation de masse lors de la fusion.

Pour avoir cette perte au feu « PAF », on pèse en premier une masse de ciment ($m_1=1g\pm 0.05g$) dans un creuset préalablement calciné et taré. Après 5mn de chauffage à ($950 \pm 25^\circ C$) dans un four (Figure III.1), on retire le couvercle et on laisse le creuset pendant 10mn supplémentaires. On laisse refroidir le creuset dans un dessiccateur. Lorsque la masse devient constante, on procède à une deuxième pesée, notée « m_2 ».

La perte au feu est exprimée en pourcentage

- $PAF = (m_1 - m_2)/m_1$
- m_1 : la masse de la prise d'essai en grammes.
- m_2 : la masse de la prise d'essai calcinée en grammes



Figure III. 1: Four de mesure pour la PAF.

III.1.1.3. La chaux libre

La teneur en chaux libre (non liée) est une des caractéristiques les plus importantes. La teneur en chaux libre définit la qualité et le degré de cuisson de clinker, Le pourcentage de la chaux libre dans le ciment compris entre 0.6 et 2.8 %.

Afin de quantifier cette valeur, on ajoute 25ml d'un mélange (Ethylène glycol+Ethanol) à 0.5g de ciment placé dans un erlenmeyer. Après 4mn d'agitation dans le calcimètre (Figure III.2) la couleur devienne grise après titrage avec solution d'acide benzoïque. La quantité de chaux libre est donnée alors par : $0.6266 * \text{Volume acide benzoïque}$.



Figure III. 2: Le calcimètre

III.1.2. La diffraction aux rayons « X »

Pour identifier la structure des produits cristallins, la technique la plus connue et la diffraction des rayons X (Figure III.3).

Les atomes s'organisent en plans réticulaires plus ou moins denses désignés par leurs coordonnées (h, k, l) dans un système de repérage dans l'espace. Ces plans sont séparés par des distances caractéristiques « d » selon la nature du cristal ou du minéral.

Selon la relation de Wulff-Bragg, un faisceau de rayons « X » incident de longueur d'onde « λ » ne sera réfléchi par une famille de plan (h,k,l), que dans la mesure où il rencontre ces plans sous un certain angle « θ » dit angle de Bragg tel que :

$$\sin\theta = n \cdot \lambda / 2 \cdot d_{(h,k,l)}$$

La procédure d'identification des phases se fait en deux étapes : une étape de recherche dans une base (search), puis une confrontation des fiches probables avec ce qui est possible chimiquement (match) ; on parle donc fréquemment de search/match pour désigner cette procédure.

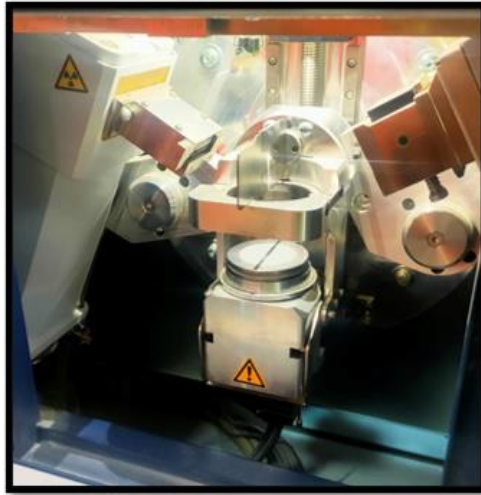


Figure III. 3: Diffractomètre à rayons X.

III.1.3- Essais sur ciment anhydre

III.1.3.1-La finesse Blaine

L'appareil utilisé (Figure III.4) pour déterminer la finesse de mouture des ciments est appelé « Perméabilimètre de Blaine ».



Figure III. 4: Perméabilimètre de Blaine.

Après la mesure d'une masse « m_c » de ciment de compacité $c = 0.5$, elle est mise en place dans la cellule puis compacté par le piston ; le lit de ciment ainsi compacté à un volume « V » ; la cellule est alors placée dans le rodage conique au sommet du manomètre.

On place la grille au fond de la cellule. Le robinet étant ouvert, on amène par une aspiration le liquide manométrique au niveau du repère supérieure.

Après fermeture du robinet, on déclenche le chronomètre lorsque le liquide atteint le repère n°2 sur le tube et on l'arrête lorsque le liquide atteint le repère n°3. La surface massique « S » est :

$$S = K \cdot \sqrt{t} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\sqrt{p^3}}{1-p} \cdot \frac{1}{\sqrt{0.1\eta}}$$

Dans cette expression « K » est la constante de l'appareil ; « η » la viscosité de l'air à la température de l'essai ; la porosité $p = 1 - c$; $\rho_c = m_c/V$

III.1.3.2. Analyse granulométrique (Méthode alpine) :

Cette méthode permet la mesure de la granulométrie des poudres. A l'aide d'un courant d'air et deux tamis 45 μ m, 90 μ m une courbe granulométrique peut être tracé.

Le tamis à air ALPINE (Figure III.5) est un appareil utilisé pour effectuer des tamisages à secs très fins, sans manipulation de la matière. Après un séchage de la matière, 10g sont introduit dans la tamiseuse. Elle est mise en marche pendant 5mn. A la fin on procède aux pesées des deux tamis avec poudre.



Figure III. 5: Tamiseuse ALPINE.

III.1.3-2- Masse volumique

a. Masse volumique absolue

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue du ciment anhydre. Pour arriver à notre fin on remplit un pycnomètre (Figure III.6) de l'éthanol, jusqu'à ce que le niveau parvienne entre les divisions zéro et 1. On verse une masse de ciment de 64 g à 0,1 g près. On bouche le pycnomètre et on l'incline à 45° par rapport à la table tout en lui donnant des mouvements de va-et-vient de manière à faciliter de départ de l'air. A la fin on lit le niveau « N_1 » du liquide.

La masse volumique absolue est donnée par le rapport :

$$\rho_c = 64 / (N_1 - N_0)$$

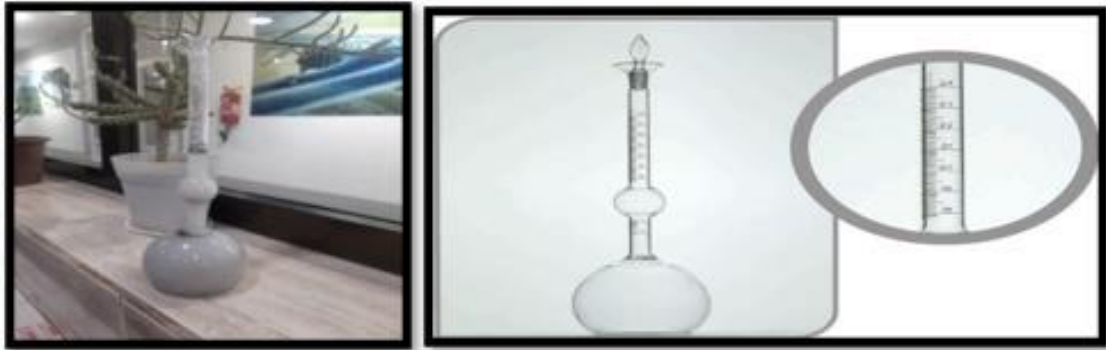


Figure III. 6: Flasque Le Chatelier pour masse volumique absolue.

b. Masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps. C'est-à-dire que le volume est constitué par la matière du corps et le vide qu'elle contient.

Pour déterminer la masse volumique apparent, on verse à 10cm d'un entonnoir (Figure III.7) le matériau qui sera récupéré par un récipient de 1L pesé au préalable. On verse le matériau jusqu'à débordement du récipient puis à l'aide d'une règle métallique on arase le bord. Si « m_1 » la masse du récipient vide et « m_2 » rempli, la masse volumique est :

$$\rho = (m_2 - m_1)/V$$



Figure III. 7: Entonnoir et récipient pour masse volumique apparente.

III.1.4. Essai sur pâte de ciment

III.1.4.1- La consistance

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Elle est une caractéristique, qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres :

- On introduits 500 g de ciment dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau choisie est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes.

- Mettre immédiatement le malaxeur en route à la vitesse lente pendant 90 s. Arrêter la machine pendant 15 s et ramener, dans la gâchée avec une petite truelle. Remettre la machine en route pour une durée de 90s à vitesse lente.
- La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique, puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat (Figure III.8).
- Après 4 minutes du début de malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte.
- Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente), on mesure la distance « d » séparant l'extrémité de la sonde et la plaque de base. Si « d » = $6\text{mm} \pm 1\text{mm}$, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée (consistance normalisée).

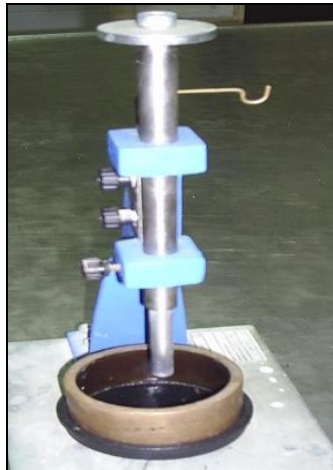


Figure III. 8: Appareil de Vicat muni d'une sonde de consistance.

III.1.4.2. La prise

Le début de prise se mesure au moyen d'une aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance « d ». De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

Après la détermination de la consistance la sonde est remplacée par une aiguille est amenée à la surface supérieure de la pâte et lâchée sans élan. Elle s'enfonce alors dans la pâte, et lorsqu'elle s'immobilise, ou au plus tard 30 s après l'avoir relâchée, on mesure la distance « d » entre l'extrémité de l'aiguille et le fond du moule. Cette distance doit être égale à $4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$. Le temps de fin de prise est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5 mm, comme le montre le dispositif dans la figure III.9.



Figure III. 9: Dispositif de temps de début de prise.

III.1.5. Essai sur mortier

Un mortier normalisé est définie par la norme EN 196-1. Chaque gâchée d'essai doit comporter $450 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$ de ciment, $1350 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ de sable et $225 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ d'eau.

Après l'introduction de l'eau et le ciment, le malaxeur (Figure III.10) est mis en marche à petite vitesse. Après 30 s, on introduit régulièrement tout le sable (pendant les 30 s suivantes). Après 30s en en première vitesse, on arrête le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, on enlève au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci. On reprend le malaxage à grande vitesse pendant 60s.



Figure III. 10: Malaxeur à mortier normalisé.

III.1.5.1-Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes sont de forme prismatique $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$. Elles doivent être moulées le plus vite possible après la confection du mortier.

Le moule métallique à trois alvéoles (Figure III.11) et sa hausse étant fermement fixés à la table à choc, on introduit la première des deux couches de mortier. La couche est étalée uniformément en utilisant la grande spatule puis serrée par 60 chocs. La deuxième couche est alors introduite, nivelée avec la petite spatule et serrée à nouveau par 60 chocs.

Le moule est enlevé de la table à choc, et après avoir retiré la hausse, on enlève l'excédent de mortier par arasage. La surface des éprouvettes est ensuite lissée.



Figure III. 11: Moule métallique pour confection de mortier.

III.1.5.2-Conservation des éprouvettes

Le moule rempli de mortier est convenablement identifié, puis placé jusqu'au moment du démoulage couvert d'un couvercle, sur un support horizontal dans une armoire humide ($20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, humidité relative supérieure ou égale à 90 %, Figure III.12).

Le démoulage est effectué entre 20 h et 24 h après le moulage. Les éprouvettes sont alors marquées convenablement et immergées dans l'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ dans des récipients adéquats jusqu'au moment de l'essai. Les éprouvettes doivent être retirées de l'eau, essuyées au maximum 15 min avant que l'essai soit exécuté.



Figure III. 12: Chambre de conservation des éprouvettes.

III.1.5.3. Résistances mécaniques des mortiers

Pour la détermination de la résistance à la flexion (Figure III.13), on utilise la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé. Les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion doivent être essayés en compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 40 mm x 40 mm.

- La résistance en flexion R_f (en N/mm²) est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = 1.5.F_f.l/b^3$$

R_f : Résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.

b : Le côté de la section carrée du prisme, en millimètres.

F_f : La charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

l : est la distance entre les appuis, en millimètres.

- La résistance en compression R_c (en N/mm²) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = F_c/1600$$

R_c : est la résistance en compression, en newtons par millimètre carré ou en MPa.

F_c : est la charge maximale à la rupture, en newtons.



Figure III. 13: Dispositif de mesure des résistances mécaniques.

III.1.5.4. Chaleur d'hydratation

La norme décrit la méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique, dite méthode de Langavant. L'essai a pour but de mesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment au cours des tout premiers jours. Elle est exprimée en joules par gramme de ciment.

La méthode consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre (Figure III.14) afin de déterminer l'évolution de la température. A une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de

la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.



Figure III. 14: Calorimètre Langavant.

III.2. Résultats et discussion

En premier le déchet en céramique sanitaire a été lavé pour enlever les impuretés et d'éventuelle poussière. L'échantillon est ensuite broyé pour réduire son volume. A la fin une pulvérisette continue le broyage jusqu'à l'obtention de la finesse voulue (Figure III.15).

Après avoir menée le déchet de céramique sanitaire en poudre (PC), elle est mélangée au ciment CEMI 52.5 R (Tableau III.1) fourni par l'usine Holcim établi à M'sila pendant 10 à 15 min puis laisser 48 heures pour homogénéisation. La substitution de 5% de CEMI par la PC est nommée ciment modifié « CM5 » et ainsi de suite.

Tableau III. 1: Les différents mélanges étudiés.

Désignation	Pourcentage de CEMI	Pourcentage de PC
CEMI	100	0
CM5	95	5
CM10	90	10
CM15	85	15
CM20	80	20



Figure III. 15: Concassage et broyage de la céramique sanitaire

III.2.1-Fluorescence des rayons X

L'analyse chimique au moyen de la fluorescence aux rayons « X » des échantillons montre que la poudre de déchets de céramique sanitaires « nommée PC » est riche en silice avec environ 69% est on alumine 22% (Tableau III.2).

Tous les ciments répondent parfaitement aux critères chimiques de la norme 197-1. Le sulfate SO_3 est largement inférieur à 3.5% et la magnésie MgO à 3%.

Avec l'augmentation du pourcentage de PC on remarque que la silice et l'alumine augmente, mais comme on le verra au tableau III.3, cette augmentation n'a pas de répercussion sur les minéraux cimentaires C_2S , C_3S , C_3A et C_4AF .

Tableau III. 2: Analyse chimique en (%) des matières premières et les mélanges résultants.

Désignation	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
PC	68,94	22,06	1,86	0,78	0,26	0,08	3,55	1,13
CEMI	20,60	3,60	4,37	63,21	1,90	2,15	0,49	0,10
CM5	23,18	4,48	4,36	60,92	1,88	2,05	0,64	0,14
CM10	24,97	5,14	4,29	58,07	1,8	1,92	0,77	0,18
CM15	27,73	6,2	4,24	54,29	1,71	1,80	0,94	0,21
CM20	29,97	6,97	4,19	51,19	1,64	1,69	1,09	0,26

III.2-2-Diffraction des rayons X

Les éléments majeurs quand trouve dans le PC sont le quartz et l'illite avec environ 52 et 11% respectivement (Tableau III.3). Le silicate d'alumine type potassique (K-Feldspath) est un minéral commun à tous les roches terrestres, sa température de fusion dépasse les $1400^{\circ}C$. Etant donnée que les céramiques sont des argiles calcinées on trouve différentes argiles dans la PC comme la kaolinite et la dolomite.

Après le mélange de PC et un ciment CEMI l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X, n'a révélée aucune anomalie dans les minéraux cimentaires donné au tableau III.3. La teneur de l'Alite « C3S » est comprise entre 45 et 79.7, la teneur de la Belite « C2S » est comprise entre 5.7 et 29.8, la teneur en aluminat tricalcique « C3A » est entre 1.1 et 14.9 et la Ferrite « C4AF » est comprise entre 2.0 et 16.5.

Tableau III. 3: Analyse minéralogique en (%) des matériaux utilisés.

La poudre céramique « PC »							
Calcite	Dolomite	Magnésite	Quartz	Illite	Kaolinite	Albite	K-Feldspath
6,09	9,37	1,35	52,23	11,58	7,05	2,75	13,31
Les ciments étudiés							
Désignation	Alite (C3S)		Belite (C2S)		Aluminat (C3A)		Ferrite (C4AF)
CEMI	57,73		19,84		1,34		13,12
CM5	57,63		18,92		1,3		13,84
CM10	55,39		19,96		1,23		13,81
CM15	53,94		20,49		1,54		12,8
CM20	51,66		20,24		1,17		13,5

III.2.2.1. La perte au feu et la chaux libre

Ces deux essais doivent être exécuter pour avoir la somme de 100% de fraction massique de tous les oxydes de la matière. La perte au feu doit être inférieur à 5% selon la norme 197-1, ce que tous nos ciments satisfassent (Tableau III.4). Le CEMI enregistre une perte au feu de 3%. Avec l'introduction de PC qui elle enregistre une perte au feu presque nulle, la perte au feu des différents ciments étudiées diminue. Ceci veut dire une quasi absence d'eau ou de dioxyde de carbone combiné.

L'oxyde de silicium et de calcium réagissent ensemble pour former la Belite (C2S) qui, lui-même, se transforme en Alite (C3S) tant qu'il reste de l'oxyde de calcium non combiné. A la sortie du four, l'oxyde de calcium non combiné s'appelle chaux libre. La chaux libre est un facteur défavorable pour le développement des résistances. Une augmentation de la chaux libre est le signe d'une dégradation de la résistance.

Tableau III. 4: Analyse de la perte au feu des matériaux utilisés.

La perte au feu (PAF)						
Désignation	PC	CEMI	CM5	CM10	CM15	CM20
Résultat (%)	0,26	3	2,82	2,66	2,58	2,45
La chaux libre (FL)						
Résultat (%)	0,00	0,81	0,78	0,78	0,78	0,78

III.2-3-Mesure de la finesse

La finesse du PC a été choisie dans la perspective d'avoir un intervalle de finesse des ciments le plus serré que possible. Cette finesse est une caractéristique importante : lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète. On remarque qu'avec l'augmentation de la finesse des ciments avec l'incorporation de PC, les refus à 45 μ m et 90 μ m augmente. L'augmentation du refus, est peut-être due à la quantité de silice difficile à broyé et qui a une taille supérieure à celle de tamis ou peut être qu'avec une finesse accrue l'air ne peut passer à travers les agglomérats de ciment.

Tableau III. 5: Finesse des matériaux utilisés.

Désignation	PC	CEMI	CM5	CM10	CM15	CM20
Résultats (cm ² /g)	4640	3055	3102	3165	3220	3235

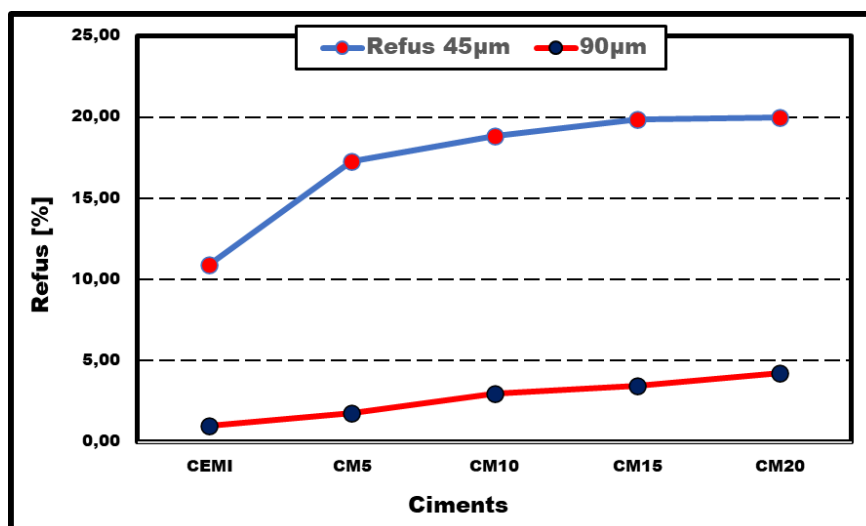


Figure III. 16: Refus des tamis 45 μ m et 90 μ m des ciments étudiés.

III.2.4- La masse volumique

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. La masse volumique absolue est le rapport entre la masse et le volume du matériau sans aucun vide. Avec une masse volumique absolue de 2,83 g/cm³, l'augmentation du taux de PC diminue la masse volumique des ciment modifiés « CM ».

La masse volumique apparente du ciment est entre 900 et 1200 Kg/m³, soit en moyenne 1,1 g/cm³. Les ciments étudiés ont une masse volumique qui oscille sur cette moyenne Il est utile de la connaître car le ciment est toujours transporté ou stocké donc on doit connaître le volume qui occupe d'ailleurs cette masse volumique est appelé aussi masse volumique en vrac

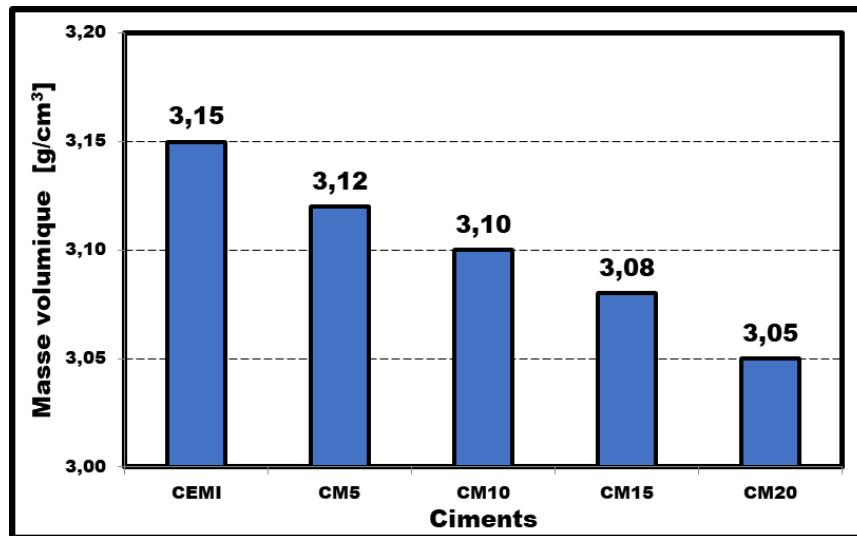


Figure III. 17: La masse volumique absolue des ciments étudiés.

Tableau III. 6: Masse volumique apparente

Désignation	PC	CEMI	CM5	CM10	CM15	CM20
Résultats (g/cm ³)	1,04	0,89	1,03	1,02	1,01	1,01

III-2-5-Essai de consistance

La pâte de ciment doit avoir une consistance telle qu'elle puisse maintenir les grains de ciment forment une suspension stable dans l'eau. On remarque dans la figure III.18 que le rapport E/C augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. Elle passe 132,5 ml pour le CEMI à 136 ml pour le CM20.

Cela est due à la nature d'ajouts qui absorbe une partie de l'eau destinée à l'hydratation du ciment, ce qui réduit la quantité d'eau disponible pour l'hydratation du ciment anhydre et la formation des hydrates comme la portlandite et l'ettringite. De plus la finesse des ciments est en constante augmentation synonyme d'une aire de surface supérieure qui doit être mouillée.

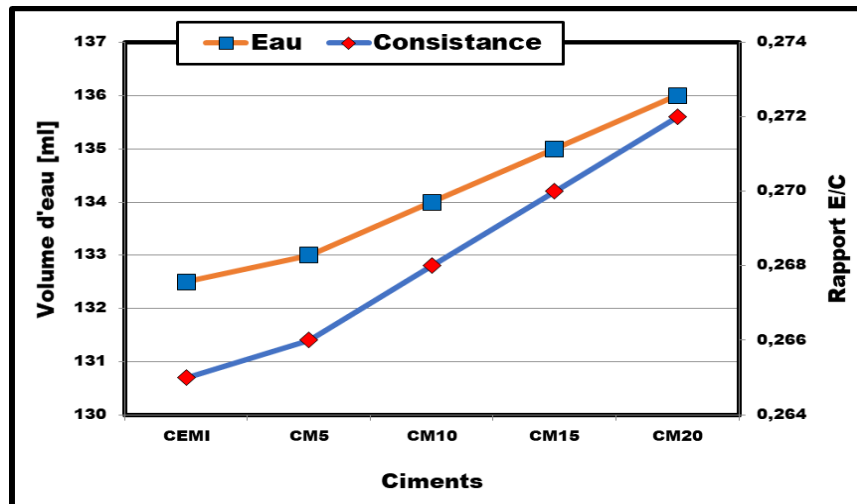


Figure III. 18: Quantité d'eau et consistance des ciments étudiés.

III-2-6-Début et fin de Prise

Le temps de prise est influencé par plusieurs facteurs, comme exemple le rapport E/C, la finesse du ciment, la température du mélange, etc. Avec l'introduction et l'augmentation du pourcentage de la PC la demande en eau à augmente ce qui a allongé le temps de prise des CM par rapport au CEMI. Le temps de prise passe de 545mn pour le CEMI à 578mn pour le CM20 selon la figure III.19.

Suite à son contact avec l'eau, le ciment commence à faire prise. Les deux minéraux principaux dans les réactions initiales sont les C3S et le C3A, or ces deux minéraux diminuent progressivement avec l'introduction de la PC. Suite à cette diminution le temps de prise s'allonge.

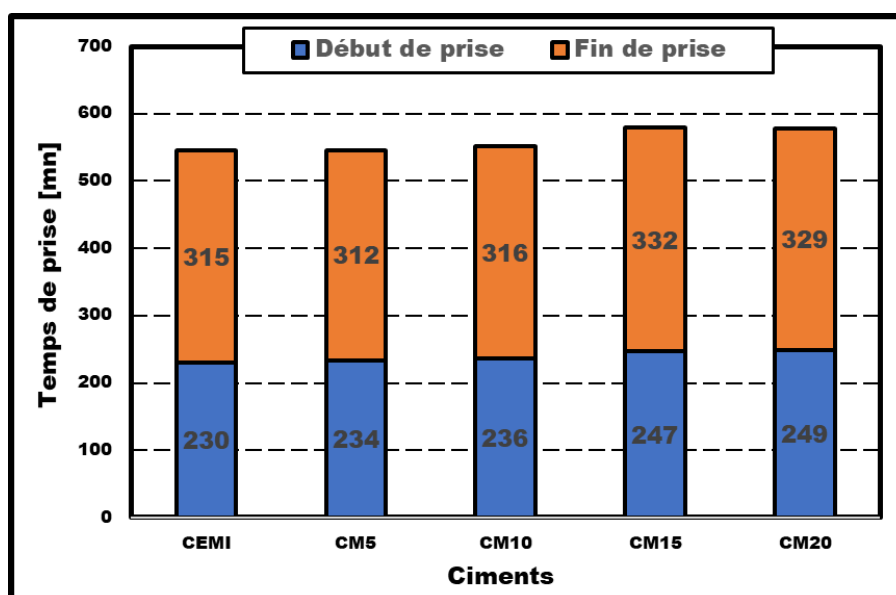


Figure III. 19: Début et fin de prise des ciments étudiés.

III-2-7- Chaleur d'hydratation

L'hydratation du ciment est un système complexe de réaction chimique. La formation des hydrates comme le gel CSH, la portlandite et l'ettringite produisent de la chaleur. Cette chaleur d'hydratation est déterminée par la méthode Langavant.

On remarque que les courbes de la figure III.21, sont toutes identiques. Une pente aigue dans les premiers 24 heures d'hydratation, puis elles commencent leurs stabilisations au-delà de 5 jours. Dans les premières 12 heures le CEMI enregistre le taux le plus élevé de chaleur d'hydratation. Au-delà de 48 heures, il y a que le CM5 qui produit plus de chaleur que le CM5.

Suite à la réduction des minéraux cimentaires et la chaux libre, comme l'indique le tableau III.3 et le tableau III.4, les réactions exothermiques sont réduites. En effet, suite à l'hydratation de la chaux libre et la transformation de l'aluminate tricalcique la chaleur d'hydratation s'accroît dans le CEMI. Au-delà de ces premières minutes le remplissage et la compacité de l'interface pâte/granulats augmente la chaleur d'hydratation comme dans le cas du CM5. Dans les autres ciments surtout CM15 et CM20, l'effet de la réduction des minéraux cimentaires est plus senti que l'effet filler.

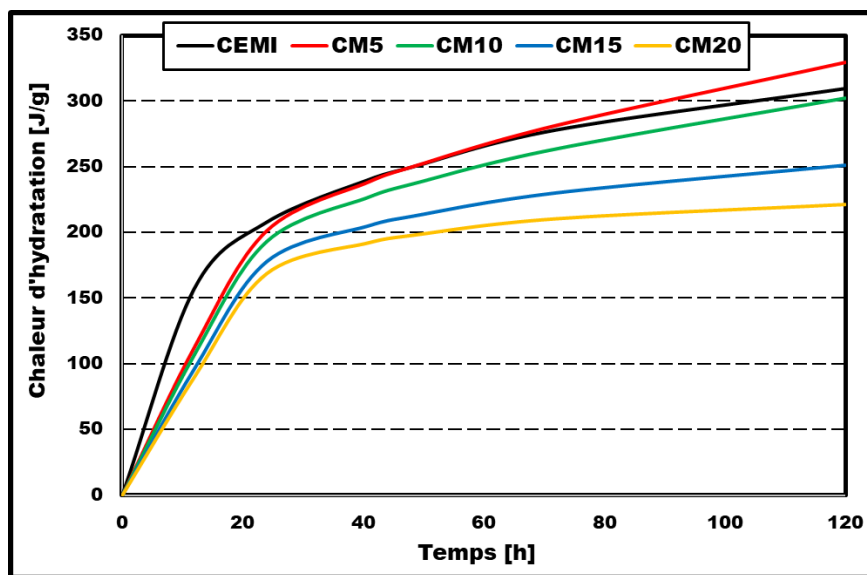


Figure III. 20: Courbe de chaleur d'hydratation des ciments étudiés.

III-2-8- Résistances mécaniques des mortiers

Les résistances mécaniques ont fait l'objet d'un suivi pendant 28 jours (Tableau III.6 et Figure III.20) . On remarque que les deux résistances à la flexion et à la compression diminuent avec l'introduction et l'augmentation du pourcentage de PC. Suite à cette substitution dans les mortiers la résistance à la flexion passe de 8,4 Mpa pour le CEMI à 7,6

Mpa pour le CM20. La résistance à la compression chute de 51 Mpa dans le cas du CEMI à presque 38 Mpa dans le cas du CM20.

Ce déclin des résistances mécaniques, est due à la diminution des minéraux cimentaires dans les ciments modifiés « CM » comme l'indique le tableau III.3. Cet effet connu sous l'effet de dilution diminue les résistances.

Tableau III. 7: Valeurs en Mpa, des résistances à la flexion des ciments étudiés.

Désignation	A 2 jours	A 7jours	A 28 jours
CEMI	4,2	6,5	8,4
CM5	3,9	6,7	8,5
CM10	4,0	6,2	8,1
CM15	3,5	6,0	8,0
CM20	3,6	5,7	7,6

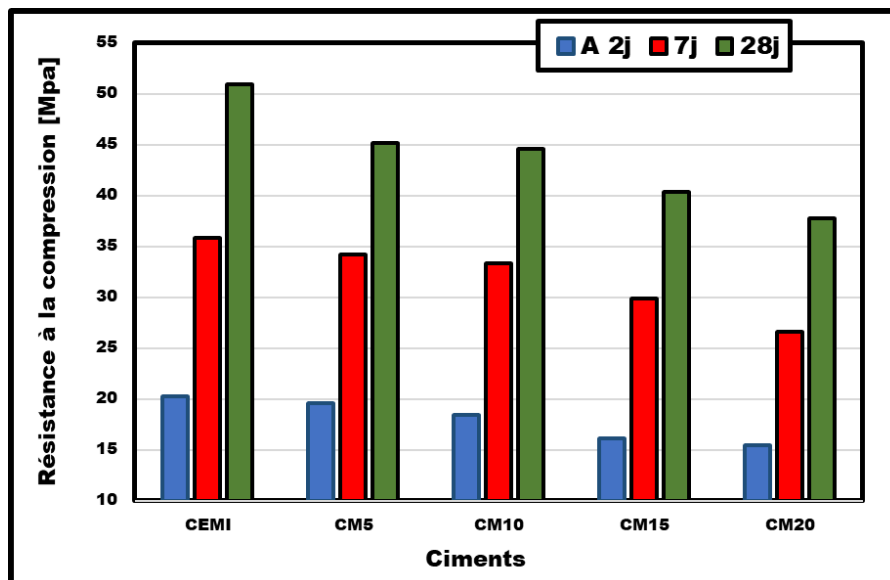
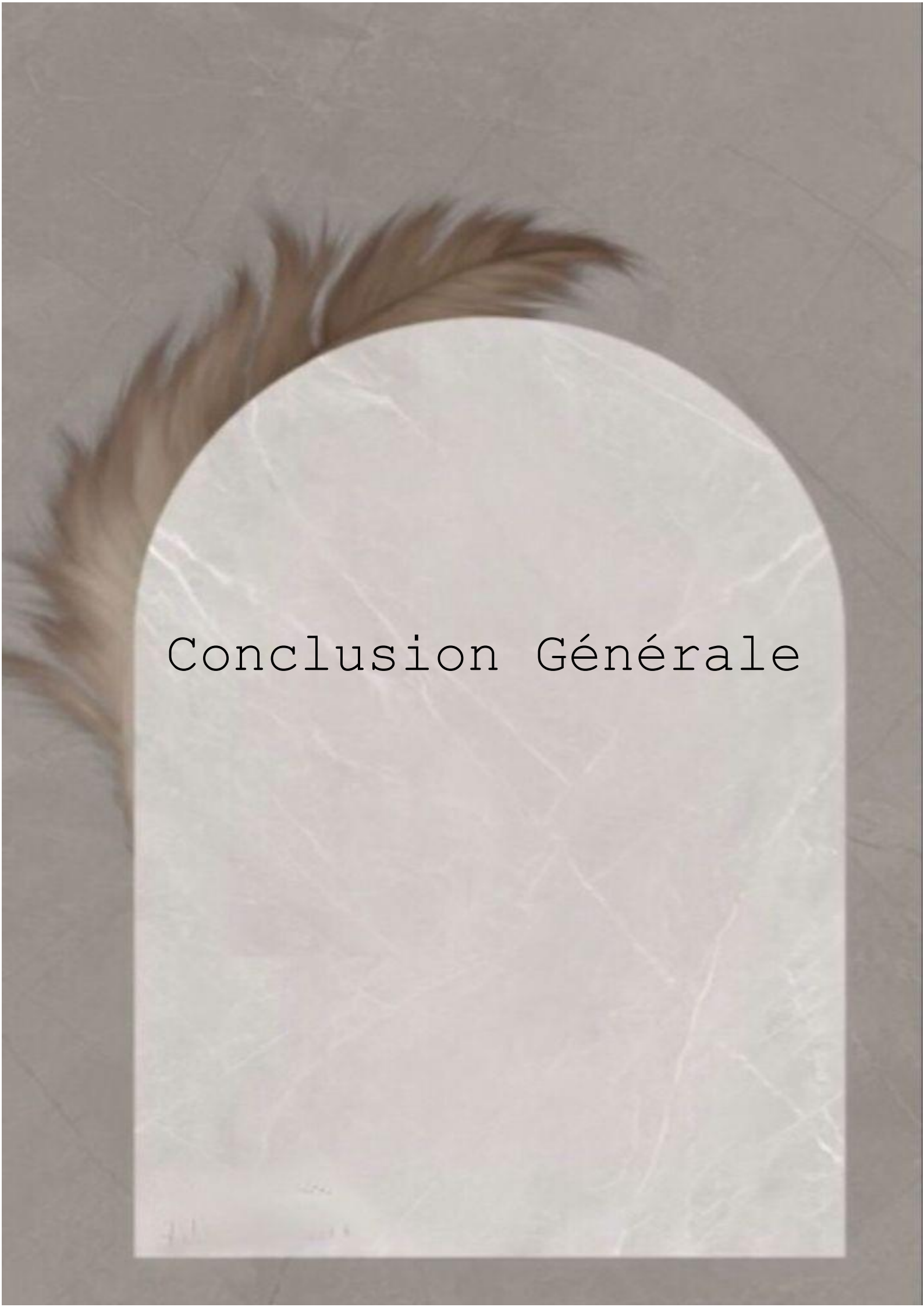


Figure III. 21: Evolution de la résistance à la compression des ciments étudiés.



Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Suite à la croissance démographique rapide et afin de répondre aux besoins des citoyens, les pays sont incités à développer l'infrastructure. La construction des bâtiments, ponts, barrages, hôpitaux, stades, tunnels, autoroutes, etc. sont toujours inscrites en caractère gras dans les plans gouvernementaux.

Ces projets de petites ou grandes envergures sont liés de près ou de loin à l'industrie cimentaires. Cette industrie fournit, une poudre minérale finement broyée, généralement de couleur grise, mélangé à de l'eau, sert comme d'adhésif pour lier le sable, le gravier et la roche dure dans le béton.

Cette poudre nommée « ciment » est classée selon la résistance initiale et finale ainsi que sa composition. Outre les ciments composés à 100 % de clinker, il existe des ciments dits composites, dans lesquels une partie du clinker est remplacée par des matières premières alternatives, comme les cendres volantes, le laitier broyé ou le calcaire.

Ces remplaçants, alternatives ou ajouts sont introduits pour réduire le rapport clinker/ciment ou ciment/béton car la production d'un ciment est énergivore et libère de grandes quantités de CO₂. L'utilisation donc de ces matières alternatives peut préserver les ressources naturelles et réduire les émissions de CO₂.

D'un autre côté, dans l'industrie céramiques productrice de brique, majolique, porcelaine etc. suite aux imperfections et leur caractère fragile et non résistant aux chocs sont réduites en déchets. Mais ces déchets de type inertes prennent de plus en plus de place et les centres de rejet ne peuvent plus ou pas contenir toute cette quantité.

Dans notre étude, on a exposé les effets d'un remplacement du ciment par des déchets sanitaires d'origine céramique. On a constaté les points suivants :

- Avec une augmentation de la proportion de PC, il y a une augmentation de la silice et de l'alumine, mais cette augmentation n'a pas d'effet sur les minéraux cimentaires C2S, C3S, C3A et C4AF.
- Après le mélange de ciment PC et CEMI, l'analyse minérale par diffraction des rayons X n'a montré aucune anomalie dans la minéralogie cimentaire. La teneur en Alite « C3S » varie de 45 à 79,7, la teneur en Belite « C2S » varie de 5,7 à 29,8, l'aluminate tricalcique « C3A » varie de 1,1 à 14,9 et la ferrite « C4AF » varie de 2,0 à 16,5.

pour la perte au feu et chaux libre :

CEMI a donné une perte sur feu de 3%. Avec l'introduction de PC qui ne donne quasiment aucune perte au feu, la perte au feu diminue pour les différents ciments étudiés. Cela signifie presque pas d'eau ou de dioxyde de carbone combinés.

CEMI a donné 0,81 % de chaux libre. Avec l'introduction de PC qui ne donne pas de chaux libre, donc la chaux libre des différents ciments considérés diminue. Ce dernier est bon pour la résistance du ciment parce que La chaux libre est un facteur défavorable pour le développement des résistances.

- Avec l'ajout de PC au ciment, la finesse du mélange est augmentée, cette finesse est une caractéristique importante lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète.
- Avec l'introduction et l'augmentation du pourcentage de poudre de céramique, cela s'est accompagné d'une augmentation de la demande en eau, ce qui a conduit à un allongement du temps d'ajustement du CM par rapport au CEMI. La raison en est que Les deux minéraux principaux dans les réactions initiales sont les C3S et le C3A, or ces deux minéraux diminuent progressivement avec l'introduction de la PC. Suite à cette diminution le temps de prise s'allonge.
- Avec l'introduction et l'augmentation du pourcentage de PC les deux résistances à la flexion et à la compression diminuent, Ce déclin des résistances mécaniques, est due à la diminution des minéraux cimentaires dans les ciments modifiés « CM »



Références
bibliographique

Références bibliographie

- [1] GEORGES DREUX, Nouveau guide du béton et de ces constituants, septième édition EYROLLES ,1998.
- [2] John Newman Advanced Concrete Technology Department of Civil Engineering. Imperial College London 2003
- [1] Brocard, J. (1972). Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment. *Tome I, Librairie Aristide Quillet.*
- [2] Moussi, K., Touil, D., Fedailaine, M., & Belaadi, S. (2015). Modèle d'échange d'énergie et de matière dans un four rotatif, incluant la combustion. *Journal of Renewable Energies, 18(1), 143-152.*
- [3] Aldred, J. M., Holland, T. C., Morgan, D. R., Roy, D. M., Bury, M. A., Hooton, R. D., ... & Jaber, T. M. (2006). Guide for the use of silica fume in concrete. *ACI–American Concrete Institute–Committee: Farmington Hills, MI, USA, 234.*
- [4] Wang, L., Jin, M., Wu, Y., Zhou, Y., & Tang, S. (2021). Hydration, shrinkage, pore structure and fractal dimension of silica fume modified low heat Portland cement-based materials. *Construction and Building Materials, 272, 121952.*
- [5] <https://pubs.usgs.gov/fs/2008/3089/fs2008-3089.pdf> consulté le 23/04/2023.
- [6] Gupta, S., Mohapatra, B. N., & Bansal, M. (2020). A review on development of Portland limestone cement: A step towards low carbon economy for Indian cement industry. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 3, 100019.*
- [7] Schuldyakov, K. V., Kramar, L. Y., & Trofimov, B. Y. (2016). The properties of slag cement and its influence on the structure of the hardened cement paste. *Procedia Engineering, 150, 1433-1439.*
- [8] Giergiczny, Z. (2019). Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research, 124, 105826.*
- [9] Wianglor, K., Sinthupinyo, S., Piyaworapaiboon, M., & Chaipanich, A. (2017). Effect of alkali-activated metakaolin cement on compressive strength of mortars. *Applied Clay Science, 141, 272-279.*
- [10] Aïtcin, P. C. (2000). Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. *Cement and Concrete research, 30(9), 1349-1359.*
- [11] <https://www.cembureau.eu/media/03cgodyp/2021-activity-report.pdf> consulté le 24/04/2023.
- [12] Marinoni, N., Diella, V., Confalonieri, G., Pavese, A., & Francescon, F. (2017). Soda-lime-silica-glass/quartz particle size and firing time: Their combined effect on sanitary-

- ware ceramic reactions and macroscopic properties. *Ceramics International*, 43(14), 10895-10904.
- [13] Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to ceramics* (Vol. 17). John Wiley & Sons.
- [14] Clément, P. (2013). *Détermination des propriétés mécaniques de céramiques poreuses par essais de microindentation instrumentée sphérique* (Doctoral dissertation, INSA de Lyon).
- [15] <https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/brief-history-of-ceramics-and-glass> consulté le 02/05/2023.
- [16] Boch, P., & Niepce, J. C. (2007). *Ceramic Materials: Processes. Properties and Applications*. (eds.) ISTE Ltd.
- [17] Duggal, S. K. (2008). *Building materials*. 3rd Ed. New age international publishers.
- [18] Fantozzi, G., Niepce, J. C., & Bonnefont, G. (2013). *Les céramiques industrielles: Propriétés, mise en forme et applications*. Dunod.
- [19] <https://issuu.com/tiledizioni/docs/cwr-149-2022?e=2185981/95337707> consulté le 03/05/2023.
- [20] <https://www.algerie-eco.com/2022/01/06/ceramique-un-potentiel-a-lexport-de-300-millions-m%C2%B2/> consulté le 03/05/2023.
- [21] Juan, A., Medina, C., Guerra, M. I., Morán, J. M., Aguado, P. J., Isabel, M., & Rodríguez, O. (2010). Re-use of ceramic wastes in construction. *Ceramic materials*, 197-214.
- [22] Halicka, A., Ogrodnik, P., & Zegardlo, B. (2013). Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 48, 295-305.
- [23] Nasr, M. S., Hussain, T. H., & Najim, W. N. (2018). Properties of cement mortar containing biomass bottom ash and sanitary ceramic wastes as a partial replacement of cement. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 9(10), 153-165.
- [24] Jackiewicz-Rek, W., Załęgowski, K., Garbacz, A., & Bissonnette, B. (2015). Properties of cement mortars modified with ceramic waste fillers. *Procedia Engineering*, 108, 681-687.