



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Matériaux en génie civil

Présenté par :

- 1. MEDEKHEL Anfal**
- 2. BOUZENNA Zineb**
- 3. BENALI Rime**

Intitulé :

**Évaluation du comportement thermique d'un mortier à base de sable de
dune incorporant des déchets non biodégradables**

Soutenu le : 28/05 /2025

Devant le jury composé de :

Dr : FETHIZA ALI Boubaker

Président

Dr : KHELIFI Abdelhamid

Examineur

Dr : FRIK Ali

Encadreur

Dr : CHOUNGARA Toufik

Co-encadreur

Année académique : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont soutenus et accompagnés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons tout d'abord nos remerciements les plus sincères à notre encadreur, le Dr. Ali FARIK ainsi qu'à notre co-encadreur, le Dr. Toufik CHOUNGARA pour leurs conseils avisés, leur accompagnement constant, leur bienveillance et leur disponibilité précieuse.

Nos remerciements vont également aux membres du jury de soutenance, que nous remercions chaleureusement pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Leurs remarques pertinentes et leurs suggestions enrichissantes contribueront sans nul doute à améliorer la qualité scientifique de cette étude.

Nous exprimons notre reconnaissance à nos familles et à nos proches, dont le soutien indéfectible, les encouragements et la patience ont été essentiels tout au long de ce parcours.

Enfin, nous remercions vivement nos amis et camarades de promotion pour leur aide précieuse, leur soutien moral et tous les moments de convivialité partagés, qui ont rendu cette aventure humaine et académique plus agréable et motivante.

DÉDICACE

الحمد لله حباً وشكراً وامتناناً على البدء والختام
(وَأَجْرُ دَعْوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ)

Le voyage n'a pas été court, et la route n'était pas exempte d'obstacles. Mais, par la grâce de Dieu, nous avons su commencer avec foi et persévérer jusqu'à atteindre le but, soutenus par Sa générosité.

Nous dédions ce succès à nous-mêmes d'abord, à ces âmes ambitieuses qui ont entamé ce parcours avec espoir et l'ont achevé avec réussite, puis à tous ceux qui ont marché à nos côtés tout au long de notre parcours universitaire.

Avec tout notre amour, nous offrons les fruits de cette réussite et de ce diplôme à :

La lumière qui a toujours illuminé notre chemin, celle dont la flamme ne s'est jamais éteinte, à ceux qui ont peiné dans l'ombre pendant des années pour que nous puissions gravir les marches du succès.

À ceux qui ont écarté les épines de notre route afin de nous ouvrir le chemin du savoir.

À ceux à qui nous avons promis cette réussite, et à qui nous avons aujourd'hui tenu notre promesse.

À vous, nos chers proches, nous dédions ce succès du fond du cœur.

Anfal

Zineb

Rime

RÉSUMÉ

Ce travail vise à valoriser le sable de dune, une ressource naturelle abondante dans le désert algérien, en améliorant ses propriétés physiques par l'incorporation de déchets de céramique et de brique réfractaire. L'objectif est de développer des mortiers aux performances physico-mécaniques optimisées, dans une démarche respectueuse de l'environnement. L'étude porte sur l'ajout comparatif de ces deux types de déchets, à hauteur de 10 %, 20 % et 30 % du poids du sable de dune, prélevé dans la région d'El-Oued. Les mortiers durcis sont soumis à une série d'essais physico-mécaniques et thermomécaniques, avec des températures d'exposition variant de 25 °C à 800 °C, afin d'évaluer leurs performances globales et d'apprécier l'efficacité de cette stratégie de valorisation. Les résultats obtenus se sont révélés très encourageants, notamment pour les mortiers modifiés avec des déchets de céramique de faïence (DCF). Ces derniers ont montré des gains allant jusqu'à 46 % pour la résistance à la flexion à 200 °C, et jusqu'à 96 % pour la résistance à la compression à la même température. Ces bénéfices atteignent même 116 % pour le mortier contenant 30 % de DCF (MCF 30 %) à 400 °C.

Mots clés : Sable de dune, déchets de céramique de faïence, déchets de brique réfractaire, mortier, propriétés physico-mécaniques, propriétés thermomécaniques.

ABSTRACT

This study aims to enhance the value of dune sand, a natural resource abundantly available in the Algerian desert, by improving its physical properties through the incorporation of ceramic and refractory brick waste. The objective is to develop mortars with optimized physico-mechanical performance, while adopting an environmentally friendly approach. The study focuses on the comparative incorporation of these two types of waste at replacement levels of 10%, 20%, and 30% by weight of dune sand, sourced from the El-Oued region. The hardened mortars are subjected to a series of physico-mechanical and thermomechanical tests, with exposure temperatures ranging from 25 °C to 800 °C, in order to assess their overall performance and evaluate the effectiveness of this valorization strategy. The results obtained were very promising, particularly for mortars modified with faience ceramic waste (FCW). These mixes demonstrated strength improvements of up to 46% in flexural strength at 200 °C, and up to 96% in compressive strength at the same temperature. These benefits reached as high as 116% for the mortar containing 30% FCW (MCF 30%) at 400 °C.

Keywords: Dune sand, faience ceramic waste, refractory brick waste, mortar, physico-mechanical properties, thermomechanical properties

ملخص

يهدف هذا العمل إلى تعزيز قيمة رمال الكثبان، وهي مورد طبيعي وفير في الصحراء الجزائرية، من خلال تحسين خصائصها الفيزيائية بدمج نفايات السيراميك والطوب الحراري. الهدف هو تطوير ملاط ذو أداء فيزيائي وميكانيكي أمثل، بطريقة صديقة للبيئة. وتركز الدراسة على الإضافة بطريقة المقارنة لهذين النوعين من النفايات، بمعدل 10% و20% و30% من وزن رمال الكثبان المأخوذة من منطقة الوادي. يتم إخضاع الملاط المتصلب لسلسلة من الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية والحرارية الميكانيكية، مع درجات حرارة تتراوح من 25 درجة مئوية إلى 800 درجة مئوية، من أجل تقييم أدائها الإجمالي وتقييم فعالية استراتيجية عملية التثمين لهذه النفايات. وكانت النتائج التي تم الحصول عليها مشجعة للغاية، وخاصة بالنسبة للملاط معدل بنفايات السيراميك، وأظهرت هذه النتائج مكاسب تصل إلى 46% لقوة الانحناء عند 200 درجة مئوية، وما يصل إلى 96% لقوة الضغط عند نفس درجة الحرارة. وتصل هذه الفوائد إلى 116% بالنسبة للملاط الذي يحتوي على 30% من نفايات السيراميك عند 400 درجة مئوية.

الكلمات المفتاحية: رمل الكثبان الرملية، نفايات السيراميك، نفايات الطوب الحراري، ملاط، خصائص فيزيائية وميكانيكية، خصائص حرارية ميكانيكية.

Table des matières

Remerciements	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale.	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
1 Introduction	5
2 Sable de dune	5
2.1 Introduction	5
2.2 Historique	5
2.3 Définition du sable	6
2.4 Types des sables	6
2.5 Définition de sable de dune	7
2.6 Types de sable de dune	7
2.7 Répartition des dunes de sable en Algérie	8
2.8 Caractéristiques des grands Ergs	8
2.9 Sable de dune de la région d'Oued Souf	9
2.9.1 Avantages du sable de dune	9
2.9.2 Propriétés physiques	9
2.9.3 Propriétés chimiques	12
2.9.4 Propriétés thermiques	13
3. Ciment	13
3.1 Origines du ciment	13
3.2 Définition du ciment	14
3.3 Principaux ingrédients	14
3.4 Laitier granulé de haut fourneau	16
3.5 Classification et types de ciment	17
3.6 Propriétés du ciment	18
3.6.1 Propriétés mécaniques	18

3.6.2 Propriétés chimiques	18
3.6.3 Propriétés physiques	19
3.7 Hydratation du ciment	20
3.8 Utilisations du ciment	22
4. Déchets	23
4.1 Introduction	23
4.2 Déchets non biodégradables	23
4.2.1 Définition des déchets non dégradables	23
4.2.2 Origine des déchets non biodégradables	23
4.2.3 Types de déchets non biodégradables	25
4.2.4 Les déchets de briques réfractaires	26
4.2.4.1 Définition des briques réfractaires	26
4.2.4.2 Types de briques réfractaires	26
4.2.4.3 Principales propriétés des briques réfractaires	27
4.2.4.4 Avantages des briques réfractaires	28
4.2.4.5 Application de briques réfractaires	29
4.2.5 Déchets de céramique	30
4.2.5.1 Définition de la céramique	30
4.2.5.2 Historique de la céramique	30
4.2.5.3 Processus de fabrication général	30
4.2.5.4 Types de céramique	31
4.2.5.6 Inconvénients et effets des déchets non biodégradables	32
5. Mortier	34
5.1 Introduction	34
5.2 Définition du mortier :	34
5.3 Composition d'un mortier	35
5.4 Propriétés des mortiers	35
5.5 Différents types de mortier	36
5.5.1 Mortiers de ciment	36
5.5.2 Mortiers de chaux	36
5.5.3 Mortiers bâtards	36
5.5.4 Mortiers de ciment réfractaire	37
5.5.5 Mortier de plâtre	37
5.5.6 Mortier de réparation	37
5.5.7 Mortier d'isolation thermique	37
5.5.8 Mortier de pierre	38

5.6 Utilisation des mortiers	38
6. Conclusion	38

Chapitre II : Matériaux et méthodes

1.Introduction	40
2. Matériaux utilisés	40
2.1 Sable de dune utilisé	40
2.2 Ciment utilisé	41
2.2.1 Caractéristiques techniques du ciment utilisé	41
2.3 L'eau de gâchage	42
2. 4 Déchets utilisés	42
2.4.1 Déchets de briques réfractaires	42
2.4.2 Déchets de céramique (faïence)	43
2.5 Broyage	44
3. Caractéristiques des matériaux	45
3.1 Essais physiques	45
3.1.1 Masse volumique (NF P18-301)	45
3. 1.2 Analyse granulométrique (NF P18-560)	48
3.1.3 Analyse sédimentométrique : NFP 94-056	49
3.1.4 Équivalent de Sable (NF P18 598)	53
4. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	55
5. Formulation des mortiers à élaborer : Selon la norme (NF EN 196-1)	57
6. Essais sur mortier à l'état frais	58
6.1 La masse volumique apparente du mortier	58
6.2 Temps de prise : (NF P15-431)	59
6.3 Maniabilité	61
7. Essais sur mortier à l'état durci	63
7. 1 Propriétés thermophysiques	64
7.1.1 La masse volumique :	64
7.1.2 Absorption d'eau par immersion totale	65
7.2 Caractéristiques mécaniques	65
7.2.1 Essai de flexion	65
7.2.2 Essai de compression	67
8. Conclusion	68

Chapitre III : Résultats et discussions

1.Introduction	70
2. Résultats expérimentaux des mortiers à l'état frais	70

2.1 Maniabilité	70
2.2 La masse volumique apparente	71
2.3 Temps de prise	72
3. Résultats expérimentaux à l'état durci à la température ambiante (25 °C)	73
3.1 Résultats d'absorption d'eau	73
3.2 Résultats de la masse volumique apparente des mortiers durcis :	74
3.3 Résultats de l'UPV sur mortiers durcis	76
3.4 Résultats de la résistance à la flexion	77
3.5 Résultats de la résistance à la compression	78
4. Caractéristiques thermophysiques	79
4.1 Perte de masse	79
5. Caractéristiques thermomécaniques	80
5.1 Résistance à la flexion	80
5.2 Résistance à la compression	82
6. Conclusion	84
Conclusion général	86
Références Bibliographiques	88

Liste des figures

La liste des figures

N°		P
Chapitre I : Synthèse bibliographique		
1	Répartition de sable de dune en Algérie	8
2	Différentes formes des dunes	10
3	Classification des grains de sable et de leurs dimensions	11
4	Composition du clinker	15
5	Etapas d'hydratation du ciment	22
6	Processus général de fabrication	31
7	Fabrication du mortier	35
Chapitre II : Matériaux et méthodes		
8	sable de dune utilisé	40
9	Ciment Portland au calcaire (MATINE LAFARGE).	41
10	Fiche technique du ciment utilisé (MATINE LAFARGE)	42
11	Déchets de briques réfractaires	43
12	Déchets de céramique (faïence)	43
13	Appareil « Los Angeles » utilisé pour le broyage	44
14	Déchets au moment de broyages	45
15	Balance électronique et récipient .	45
16	Balance électronique , Éprouvette graduée	46
17	Mesure de la masse volumique absolue	47
18	Série des tamis des analyses granulométriques	49
19	Analyse sédimentométrique des particules fines des déchets	50
20	Courbe des résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune	50
21	Courbes granulométriques de déchets de brique réfractaire (DBR) et déchets de céramique faïence (DCF)	51
22	Outils utilisés dans l'essai de l'équivalent de sable.	54
23	Diffractogramme de sable de dune utilisé	56
24	Appareil de malaxage	58
25	Appareil de vicat	59

Liste des figures

26	Table de secousse	62
27	Moule prismatique de mortier (40 × 40 × 160 mm)	63
28	Échantillons conservés dans l'eau	63
29	Moyens utilisés en haute température	64
30	Balance électronique et Pied à coulisse	64
31	Appareil ultrasons.	65
32	Appareil d'essai de flexion	66
33	Schéma d'essai de rupture par flexion	66
34	Appareil de rupture par compression	67
35	Mécanisme de rupture par compression	68
Chapitre III : Résultats et discussions		
36	Evolution de maniabilité des mortiers à l'état frais	70
37	Evolution de la masse volumique apparente des mortiers à l'état frais	71
38	Evolution du temps de début de prise selon le type de déchets	72
39	Evolution du temps de fin de prise selon le type de déchets	73
40	Evolution de l'absorption d'eau des mortiers à l'état durci	74
41	Eprouvette soumises à la mesure de la masse volumique apparente	74
42	Evolution de la masse volumique apparente des mortiers à l'état durci	75
43	Evolution l'UPV des mortiers à l'état durci	76
44	Ecrasement des éprouvettes à la flexion	77
45	Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à l'état durci	77
46	Evolution de la résistance à la compression des mortiers à l'état durci	78
47	Perte de masse des échantillons en fonction de la température (MCF)	79
48	Perte de masse des échantillons en fonction de la température (MBR)	80
49	Evolution de la résistance à la flexion sous haute température (MCF)	81
50	Evolution de la résistance à la flexion sous haute température (MBR)	82
51	Evolution de la résistance à la compression sous haute température (MCF)	83
52	Evolution de la résistance à la compression sous haute température (MBR)	84

Liste des tableaux

Liste des tableaux

N°		P
Chapitre I : Synthèse bibliographique		
1	Caractéristiques des grands Ergs	8
2	Relation entre la perméabilité du sol, le type de sol et le taux d'infiltration de l'eau.	12
3	Composition chimique des sables de dune de trois régions	12
4	Propriétés thermiques	13
5	Caractéristiques de la faïence	32
Chapitre II : Matériaux et méthodes		
6	Résultats de Masse volumique	48
7	résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune	50
8	Analyse granulométrique des déchets de brique réfractaire	51
9	Analyse granulométrique des déchets de céramiques faïence	51
10	Résultats du module de finesse	52
11	Résultats de L'équivalent de sable	55
Chapitre III : Résultats et discussions		
12	Maniabilité des mortiers à l'état frais	70
13	Résultats de la masse volumique apparente des mortiers frais	71

La liste des symboles

SD = Sable de dune

DBR = Déchets de brique réfractaire

DCF= Déchets céramique (faïence)

C= Ciment

E= Eau

ρ_a = Masse Volumique apparente (g/cm^3)

V = Volume total(cm^3)

m= *Masse des solide*(g)

m_s =La masse de sable (g)

m_{cf} = La masse de céramique (faïence) (g)

m_{Br} = La masse de brique réfractaire (g)

m_c = La masse de ciment(g)

d = Masse Volumique Absolue (g/cm^3)

V_0 =Volume de l'eau (cm^3)

V_1 =Volume de l'eau avec l'échantillon(cm^3)

Mf = Module de finesse

ESV = L'équivalent de sable vuesielle

ES = L'équivalent de sable réel

$h'2$ = L'hauteur vuesielle

$h1$ =L'hauteur total

$h2$ =L'hauteur réel

M_{mortier} = La masse apparante du mortier (g)

M_{total} =La masse du récipient avec l'échantillon (g)

M_{vide} = La masse du récipient vide (g)

Ab= Absorption d'eau par immersion totale

$M2$ = Masse d'éprouvette saturée d'eau (g)

$M1$ = Masse sèche de l'éprouvette (g)

R_f = Résistance à la flexion (MPa)

F_f = Force de rupture de l'échantillon en flexion (N)

L = Distance entre les appuis(mm)

b_1 = Arête de l'échantillon(mm)

R_C = Résistance à la compression (Mpa)

σ_c = Force de rupture de l'échantillon en compression (N)

b_2 = Partie de l'échantillon (qui vaut 40 mm)

T=Témoin

$m_{T(Cf)}$ = La masse apparente de mortier à l'état frais à base de céramque(faïence)(g)

$m_{T(Br)}$ = La masse apparente de mortier à l'état frais à base de brique réfractaire(g)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Plusieurs études ont été effectuées sur les mortiers afin de savoir leurs formulations de déterminer leurs caractéristiques et leurs comportements rhéologique ces études ont pu prouver que le mortier à base de sable de dune pourrait remplacer avantageusement le mortier ordinaire dans certains secteurs du bâtiment et des travaux publics. Le secteur de la construction utilise depuis plusieurs années des déchets et des sous-produits comme matière première secondaire pour l'élaboration de nouveaux types de matériaux qui présentent des propriétés particulières ou améliorées par rapport aux matériaux classiques. Cette alternative permet d'une part de répondre au souci d'économie des ressources naturelles en granulats, et d'autre part de pallier les contraintes économiques et environnementales par le réemploi et le recyclage des déchets. L'accumulation des déchets de céramique de faïence et de brique réfractaire, constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques. Face aux évolutions de la législation en vigueur concernant le stockage de ces déchets, plusieurs actions de valorisation ont été menées, notamment dans le domaine des matériaux de construction. L'objectif de ce travail est la valorisation de sable de dune par la correction de sa granulométrie afin de l'exploiter pour la fabrication de mortier. Pour atteindre cet objectif plusieurs essais ont été réalisés sur les mélanges de mortier pour examiner son aptitude de l'utiliser dans le secteur du bâtiment.

Dans notre étude la correction de la granulométrie de sable de dune, qui est d'une distribution granulométrique très serrés, a été faite par l'ajout des déchets de céramique de faïence et des déchets de brique réfractaire. La formulation des mélanges adoptée se base sur la substitution de sable de dune par différent pourcentage de DCF et DBR à 10%, 20% et 30%.

Le mémoire est composé de trois chapitres : Le premier chapitre est une analyse bibliographique sur le sable de dune, et les déchets DCF et DBR ainsi les mortiers (définitions, types, classifications et propriétés...etc..). Ainsi qu'à la valorisation du sable de dune et des déchets (DCF et DBR) dans le domaine de la construction.

Dans le deuxième chapitre, on a essayé de faire une étude comparative concernant la valorisation du sable de dune avec les deux types de déchets pour la fabrication des mortiers aux deux états frais et durci.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats des tests qui pourraient être réalisés et leurs interprétations, en les comparant aux règles normatives et aux résultats de la littérature. Avec une conclusion générale qui nous permet de résumer les principaux résultats.

CHAPITRE I

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Introduction

Les matériaux de construction tels que le sable, les granulats et le ciment sont des éléments fondamentaux dans le domaine du génie civil. Le sable, composant exigé dans le béton et dans le mortier, joue un rôle décisif, sa granulométrie influençant directement les propriétés finales du mélange. Le ciment, quant à lui, est un liant hydraulique essentiel qui réagit avec l'eau pour former après durcissement, une masse cohésive et résistante. Il en existe plusieurs types, adaptés à diverses conditions d'utilisation. Le mortier, résultant du mélange de ciment (ou de chaux), de sable et d'eau, est utilisé pour lier les éléments de construction. Les formulations modernes de mortier offrent une meilleure résistance à la chaleur et à l'humidité.

Dans ce contexte, ce premier chapitre sera consacré à la présentation des différents matériaux entrant dans la composition d'un mortier, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation des matériaux locaux, tels que le sable de dune, ainsi que sur la valorisation des déchets non biodégradables.

2. Sable de dune

2.1 Introduction

Le sable constitue un matériau fondamental dans le domaine de la construction et du génie civil, notamment en raison de son utilisation prépondérante dans la fabrication du béton et du mortier, éléments indispensables à la construction des structures. La demande en sable connaît une hausse significative, portée par l'urbanisation rapide et le développement de projets d'envergure au cours des dernières années. En Algérie, les deux grands Ergs – l'Erg Oriental et l'Erg Occidental – renferment d'importantes réserves de sable de dune. La région d'Oued Souf, située au sein de l'Erg Occidental, se distingue par l'abondance de ce matériau, dont les propriétés physiques et chimiques particulières en font une ressource stratégique pour le secteur du bâtiment. Toutefois, malgré cette disponibilité, l'emploi de ces sables dans les matériaux de construction requiert une analyse rigoureuse de leurs caractéristiques ainsi que de leur influence sur la qualité des produits finis. [1]

2.2 Historique

Le sable est l'un des éléments naturels les plus répandus dans l'univers. Formé à la suite de l'érosion des roches par les intempéries et l'érosion naturelle au cours de millions d'années, l'utilisation du sable remonte à la préhistoire. Des preuves archéologiques attestent qu'il était

utilisé 6000 ans avant notre ère, pour aiguiser et polir les pierres afin de rendre leurs bords tranchants et aptes à la coupe. Les premières perles recouvertes de verre, fabriquées à partir de sable fondu, sont apparues en Égypte entre 3000 et 3500 avant notre ère. Environ mille ans plus tôt, le sable a été utilisé pour la première fois pour fabriquer des briques de construction dans la vallée de l'Indus. Depuis cette époque jusqu'à aujourd'hui, le sable n'a jamais été absent de l'industrie du verre et de la construction. Toutefois, l'utilisation intensive du sable a pris un tournant décisif avec la révolution industrielle de la fin du XVIIIe siècle, l'expansion des villes et la construction de routes, et l'émergence du béton comme matériau de construction majeur. La demande de sable a augmenté au début du 20e siècle, pendant les deux guerres mondiales, qui ont nécessité la construction de nombreuses routes avant et pendant les guerres, et la reconstruction massive qui a suivi. [1]

2.3 Définition du sable

C'est un matériau que l'on obtient suite à la fragmentation des roches naturelles et à l'action du vent et de l'écoulement de l'eau et peut également être obtenu artificiellement par concassage des scories de hauts fourneaux et des déchets de carrières ; des recherches sont actuellement menées pour essayer d'exploiter le sable des dunes, ce sable doit être exempt de substances réactives telles que les sels, les substances alcalines ainsi que d'impuretés poussiéreuses de sorte que ce pourcentage ne dépasse pas 3% pour ce type de sable naturel, ce taux est défini par la norme (NFP18-101) [1]

2.4 Types des sables

Sur la base de sa composition, le sable est classé en deux catégories :

Le premier est le sable siliceux, qui est une roche sableuse blanche et pure contenant un pourcentage élevé de silice (SiO_2), supérieur à 99 % et constitué principalement de grains minéraux de quartz, et contenant une faible quantité d'impuretés et de métaux lourds (moins de 0.1 %).

Le second est le sable de verre, qui est un type de sable siliceux également caractérisé par des spécifications physiques et chimiques adaptées à l'industrie du verre, la taille des grains étant souvent comprise entre 100 et 500 microns et le pourcentage d'oxyde de fer (Fe_2O_3) étant inférieur à (0.05 %).

Le sable est également divisé en fonction d'autres critères selon leur origine :

- Sable naturel de vallée : Il se caractérise par sa pureté et sa faible granulométrie et est utilisé dans la fabrication du béton. Il est formé par le mouvement de l'eau sur les roches, ce qui le rend rond et dur, mais il est menacé d'épuisement en raison de la forte demande.
- Sable de carrière : Il résulte du concassage de grosses roches par dynamitage et broyage, où le sable est séparé du gravier, et est utilisé dans la fabrication du béton.
- Sable de dune : Largement répandu dans les zones désertiques, il se caractérise par une teneur élevée en silice (>99 %) et une granulométrie homogène (80-160 microns), mais il n'est pas adapté au béton en raison de sa taille limitée.
- Sable synthétique : Produit à partir du broyage de scories fondues dans l'industrie sidérurgique, des études ont montré que ses propriétés mécaniques sont similaires à celles du sable naturel lorsqu'il est utilisé dans le béton.
- Le sable marin : Il s'accumule dans les estuaires et sur les plages, mais il contient des sels qui affectent la durabilité de l'acier, et son extraction peut provoquer l'érosion des côtes et la dégradation de l'environnement marin. [2]

2.5 Définition de sable de dune

Une dune est une hauteur ou une barrière qui s'accumule à partir de sable meuble et déposé qui prend la forme d'une colline ou d'un monticule, formé par le vent et la présence d'une barrière qui interfère avec le vent, conduisant à la collecte des grains de sable transportés pour atteindre une hauteur entre quelques mètres à plusieurs mètres, certains types de dunes de sable se trouvent sur les rivages de la mer et la plupart d'entre eux dans les zones désertiques et en raison de leur nature dynamique changer leur emplacement, la longueur ou la hauteur en fonction du type de dunes. [3] [4]

2.6 Types de sable de dune

Dunes de sable du désert : Ce type de dunes trouve sa source principale dans les montagnes environnantes en raison de facteurs d'érosion et le facteur de transport est le vent. Elles se caractérisent par des grains de différentes tailles (bien triés – mal triés).

Dunes de sable de plage : Ce type de dune a sa source principale, loin de celle-ci, et le facteur de transport est l'eau, et la taille des grains est égale (mal classé - bien classé). [3] [4]

2.7 Répartition de sable de dune en Algérie

Le désert algérien couvre la plus grande partie du Sahara africain, occupant près de 80 % des 2,4 km² de la superficie de l'Algérie. Les dunes de sable couvrent plus de 60 % du désert algérien et s'étendent sous forme de longues et immenses chaînes allant de la grande race orientale à l'est à la grande race occidentale à l'ouest. [3] [4]

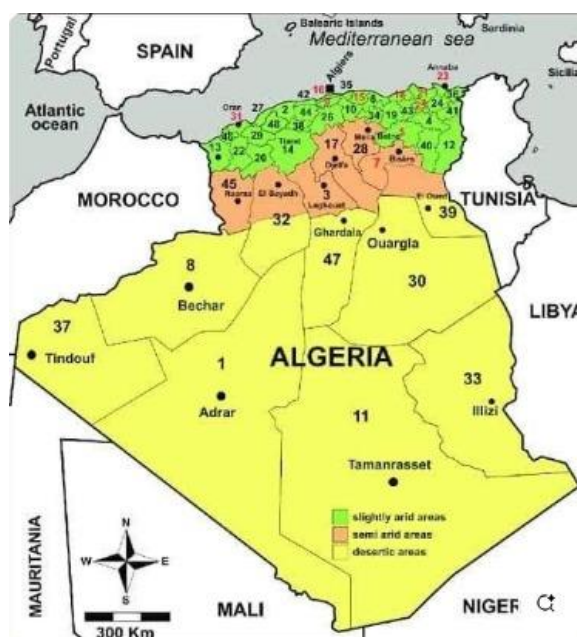


Figure 1. Répartition de sable de dune en Algérie [5]

2.8 Caractéristiques des grands Ergs

Tableau N°01 : Caractéristiques des grands Ergs [6] [7]

Caractéristiques	Grand Erg Oriental	Grand Erg Occidental
Emplacement	Est de l'Algérie, s'étendant vers la Tunisie et la Libye	Ouest de l'Algérie, s'étendant vers le Mali
Superficie	Environ 190 000 km ²	Environ 80 000 km ²
Nature du sable	Très fin et mobile	Plus solide et stable
Hauteur des dunes	Jusqu'à 300 mètres	Moins élevé que le Grand Erg Oriental
Topographie	Immenses dunes mobiles	Dunes moins hautes avec des zones rocheuses
Climat	Plus sec et chaud	Relativement plus doux

Oasis	Contient de nombreuses oasis telles que l'oasis de Oued Souf	Moins d'oasis
Impact environnemental	Déplacement rapide du sable en raison de vents forts	Stabilité relative des dunes de sable

2.8 Sable de dune de la région d'Oued Souf

Le sable d'Oued Souf est l'un des types de sable les plus purs et les plus fins d'Algérie. Il se trouve dans cette région, qui a été localisée dans le sud-est de l'Algérie, au sein du grand Erg occidental. Ce sable se caractérise par sa douce couleur dorée et sa légèreté, qui le rend facile à déplacer par des vents forts. Ce type de sable est peu utilisé jusqu'à maintenant. [8]

2.8.1 Avantages du sable de dune :

Les avantages de l'utilisation de ces agrégats sont doubles : Technique et économique.

a) Aspects économiques

Les aspects économiques sont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet de réaliser certaines économies d'échelle dans le transport des matériaux, puisqu'il est disponible partout en quantités inépuisables. De plus, son extraction ne génère pratiquement pas de coûts supplémentaires et il est facile à mélanger avec d'autres matériaux sur le site. [8]

b) Aspects techniques

Le sable peut contribuer à la densification des matériaux. En même temps, il améliore leurs propriétés géotechniques en augmentant le frottement interne et en améliorant la capacité portante. Il peut être utilisé pour réduire la plasticité des matériaux de base. [8]

2.8.2 Propriétés physiques

a) distribution granulaire

En termes de granulométrie, le sable est divisé en plusieurs types :

Sable bien gradué : un sable qui contient les proportions appropriées de différentes tailles.

Sable gradué : un sable qui contient la plupart des tailles, indépendamment de leurs proportions. [9]

b) Forme des grains :

Les grains de quartz ont différentes formes, déterminées par le degré de sphéricité des grains, où la sphéricité exprime le degré auquel le grain se rapproche de la forme sphérique selon le rapport entre les trois axes du grain principal, il y a des grains sphériques, en disque, en feuille, en lame et en tige, tandis que la sphéricité exprime le degré de courbure des coins du grain. Selon la mesure de la rondeur internationalement reconnue, les grains sont divisés en : très arrondis, arrondis, sous-arrondis, selon la figure suivante [9] :

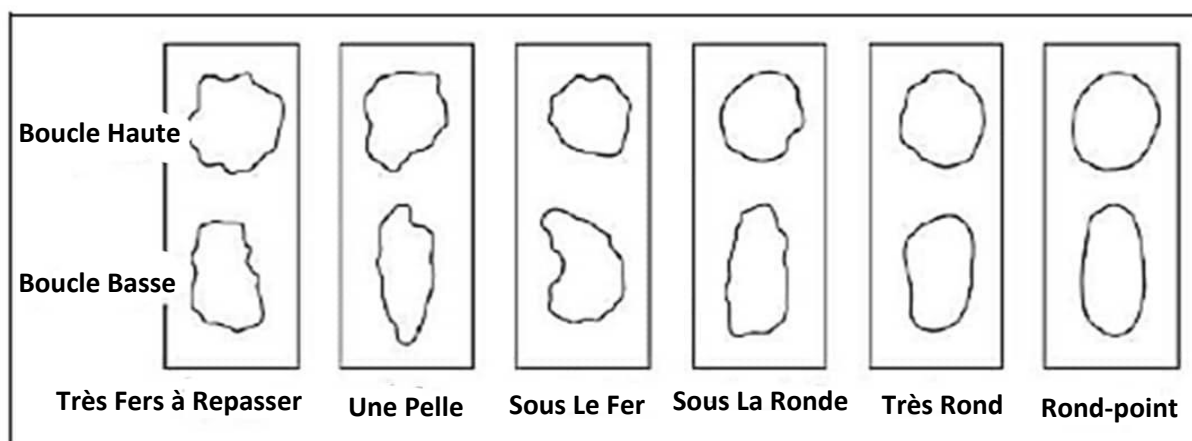


Figure 2. Différentes formes des dunes [9]

c) Couleurs des grains de sable

La couleur du sable dépend de la quantité et de la couleur des liants et de la couleur générale des grains minéraux qui le composent. Les couleurs les plus courantes du sable sont le brun, le rouge et le rose et résultent de la présence de calcaire et d'oxyde de fer. Les couleurs plus claires comme le blanc et le gris résultent de l'absence de liants ou sont associées à la calcite ou au quartz. Les couleurs jaune, jaune sable à or brillant et brun jaunâtre résultent d'un mélange de quartz clair et de feldspath ambré foncé présent dans le sable. L'ajout de manganèse est à l'origine de la couleur pourpre et le sable vert est dû à la présence de glauconite. [9]

d) La taille des grains de sable

Les diamètres vont de 0,065 mm à 2 mm, les grains dont le diamètre est compris entre 2 mm et 64 mm sont appelés cailloux, tandis que les grains plus petits que le sable sont appelés limon, avec des diamètres compris entre 0,064 mm et 0,004 mm. [9]



Figure 3. Classification des grains de sable et de leurs dimensions [9]

Les sables sont généralement divisés en cinq catégories en fonction de leurs dimensions :

- Sable très fin avec un rayon de grain compris entre (1/8 - 1/16 mm) .
- Sable fin avec un rayon de grain allant de (1/4 - 1/8 mm) .
- Sable moyen avec un rayon de grain compris entre (1/2 - 1/4 mm) .
- Sable grossier avec un rayon de grain de (1-1/2 mm) .
- Sable très grossier avec un rayon de grain de (2 - 1 mm) .
- La distribution de ces dimensions est basée sur l'échelle de (Krumbein) . [9]

e) *Masse volumique apparente*

C'est la masse de la matière sèche du sol (à 105°C) par rapport au volume du sol dans son état naturel et exprimée en unités de g/cm^3 ou kg/m^3 , la masse du sol sec (séché à 105°C) par rapport au volume du sol dans son état naturel (le volume apparent du sol), et si l'on adopte que la densité apparente dépend de la masse et du volume du matériau et est définie comme le rapport de la masse du matériau solide du sol après l'avoir atteint à son volume total y compris les vides et exprimée par la relation [9] :

$$p = m / v$$

Où : P_a = Masse volumique apparente g/cm^3

m = Masse des solide en g

V = Volume total cm^3

f) Perméabilité

Le critère de classification des sols en fonction de la perméabilité dépend de la taille des particules du sol, de la vitesse d'écoulement de l'eau et de la texture du sol et est résumé dans le tableau suivant [9] :

Tableau N°02 : Relation entre la perméabilité du sol, le type de sol et le taux d'infiltration de l'eau. [9]

Propriété	Vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol (mm/h)	Type de sol	Rapport de poids %
Degré de perméabilité			
Non perméable	0.36 <	Très argileux	1.2 <
Faiblement perméable	3.6 - 0.36	Argileux	1.5 - 1.3
Moyennement perméable	36 - 3.6	Limono-sableux	30 - 5
Très perméable	360 - 3.6	Sableux	120 - 60
	360 >	fin – moyen	250 - 120
		Sableux grossier	1000 - 250

2.8.3 Propriétés chimiques

a) Composition chimique

La composition du sable varie en fonction des sources de roches locales et des conditions, car le sable contient un grand nombre d'éléments chimiques, ainsi le tableau suivant montre les composants chimiques ainsi que les rapports de poids des différents éléments entrant dans la composition de certains déserts en Algérie [9]:

Tableau N°03 : Composition chimique de sable de dune de trois régions [9]

Oxyde	Rapport de poids%		
	Région de Biskra	Région de Oued Souf	Région de Ouargla
SiO ₂	74.61%	97.63%	86.04%
Al ₂ O ₃	1.35%	0.33%	6.63%
Fe ₂ O ₃	0.86%	0.04%	1.35%
CaO	17.30%	0.56%	-
Na ₂ O	-	0.54%	-
MgO	0.29%	0.61%	0.08%

2.8.3 Propriétés thermiques

Le sable de dune se caractérise par des points de fusion élevés, supérieurs à 600°C, en raison de la force des liaisons chimiques de ses composants. [9]

Tableau N°04 : Propriétés thermiques [9]

Nom du composé	Formule chimique	Température de fusion (°C)
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	2070
Silice	SiO ₂	1710
Oxyde de calcium	CaO	2600
Oxyde de titane	TiO ₂	1840
Chromite de calcium	CaO - CrO ₃	2160

3. Ciment

3.1 Origines du ciment :

Les anciens utilisaient un mélange de chaux, de limon, de sable et d'eau pour construire leurs bâtiments. Les Égyptiens l'utilisaient déjà il y a 2 600 ans, et les Romains l'ont perfectionné au cours du premier siècle de notre ère lorsqu'ils ont découvert qu'en ajoutant de la terre volcanique de la région de Bazuli , près de Naplouse, ils pouvaient obtenir un mélange qui pouvait être utilisé pour contrôler les eaux souterraines. [9]

pour contrôler les eaux souterraines. Nous savons aujourd'hui que la terre de Bazuli, dont le nom a été utilisé avec une certaine déformation (Bazulan) pour désigner cette roche volcanique silicifiée, contient 60 à 90 % de sable et 10 à 40 % de chaux, selon sa provenance. Des traces anciennes ont déjà été découvertes dans plusieurs villes romaines sous forme de restes de ciment sec datant de cette période historique de l'Empire romain. Ils utilisaient du gypse, là où les Grecs d'Italie ajoutaient des cendres volcaniques trouvées dans la région de Buzsa et les Romains l'ont généralisé jusqu'à la fin de l'ère actuelle. Le ciment est un mélange de chaux (comme les briques et les briques pilées, ajoutées à l'argile). La pouzzolane est une terre volcanique de la région de Pozzone, à Naples, en Italie), qui est utilisé comme mélange, le ciment n'a pas été reconnu comme il l'est aujourd'hui, jusqu'au 19ème siècle, lorsque le scientifique Louis Vicat a résolu

le mystère de l'humidité dans la chaux en 1817 et l'a relié au ciment, qu'ils ont appelé chaux hydratée. Et la chaux vive en 1840. [9]

3.2 Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une substance qui durcit dans l'eau. Il se présente sous la forme d'une poudre très fine qui, mélangée à l'eau, forme une pâte qui durcit progressivement dans le temps.

Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment les silicates et les aluminates de calcium ; la proportion de chaux et de silice réactives doit être d'au moins 50 % de la masse du ciment. [9]

3.3 Principaux ingrédients

Le ciment ordinaire est composé de clinker et de gypse, auxquels peuvent être ajoutés, selon le type, les éléments suivants :

- Calcaire.
- Laitier de haut fourneau.
- Cendres volantes.
- Calcaire fin.
- Pouzzolane naturelle.
- Schiste calciné.
- Vapeurs de silice.

L'objectif est de modifier certaines de leurs propriétés et d'offrir une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la construction de certains ouvrages, soit en raison des conditions environnementales, soit en raison des performances mécaniques particulières qui doivent être atteintes.

Le clinker, obtenu dans les fours après combustion de matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matériaux de correction, est un matériau hydraulique sous forme de nodules.

est un matériau hydraulique qui se présente sous la forme de petits nodules très durs, constitués principalement des quatre phases cristallines suivantes :

- Alite : Silicate tricalcique de calcium, également connu sous le nom de [C3S], avec la formule $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$.

- Bélite : Silicate bicalcique [C₂S], de formule 2CaO,SiO₂.
- Silite : aluminat tricalcique [C₃A], de formule 3CaO, Al₂O₃
- Alumino-ferrite tétra-calcique [C₄AF], de formule 4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃.

Les proportions moyennes de chacune de ces différentes phases sont :

- De 50 à 70% pour C₃S 5 à 25% pour C₂S
- De 2 à 12% pour C₃A et 0 à 15% pour C₄AF. [9]

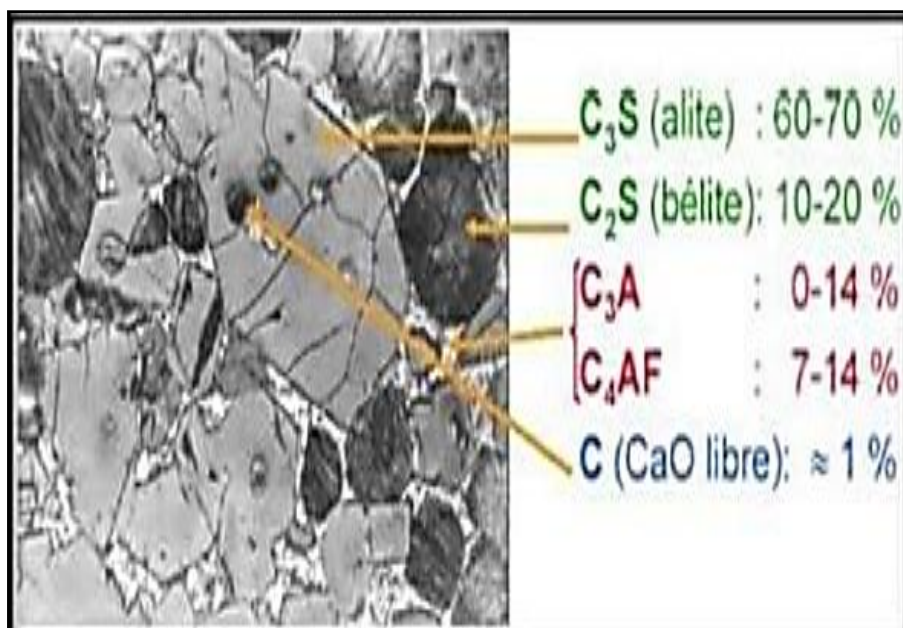


Figure 4. Composition du clinker [9]

Les propriétés du ciment varient en fonction des proportions des différents composants. Les C₃S dégagent une grande quantité de chaleur pendant l'hydratation, ce qui confère au ciment une résistance rapide et élevée, tandis que les C₂S permettent d'obtenir une résistance élevée à moyen et à long terme avec un dégagement de chaleur moindre. Le C₃A réagit rapidement, contribuant au durcissement initial du ciment mais peu à la résistance finale, et il est sensible aux attaques du soufre. Le C₄AF réagit plus lentement et joue un rôle secondaire dans le durcissement du ciment. Le clinker contient également de la chaux libre et de l'oxyde de magnésium, qui peuvent provoquer une expansion en présence d'eau. Les ciments à forte teneur en C₃S et C₃A sont idéaux par temps froid, tandis que les ciments à faible teneur en C₃S et C₃A sont privilégiés par temps chaud. [9]

3.4 Laitier granulé de haut fourneau

Sous-produit de l'industrie du fer, il est rapidement refroidi par pulvérisation d'eau et devient hydraulique lorsqu'il est activé. Il contient de l'oxyde de calcium (40 - 50%), de la silice (25 - 35%), de l'alumine (12 - 30%), de la magnésite et d'autres oxydes en petites quantités.

- Cendres volantes : Produit fin issu du dépoussiérage des gaz de chaudière dans les centrales thermiques. Elles peuvent être :
- Siliceuses (V) : Propriétés pouzzolaniques capables de stabiliser la chaux à température ambiante.
- Calcique (W) : Propriétés pouzzolaniques et hydrauliques.
- Pouzzolanes naturelles : Produits d'origine volcanique ou roches sédimentaires contenant de la silice réactive (plus de 25%), de l'alumine et de l'oxyde de fer.
- Schiste bitumineux calciné : Obtenu à des températures allant jusqu'à environ 800°C, il possède des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques lorsqu'il est finement broyé. [9]
- Calcaire : Doit contenir plus de 75 % de carbonate de calcium (CaCO_3) et avoir un faible pourcentage d'argile et de matière organique.
- Fumée de silice : Particules très fines (environ 1/10 micron) ayant des propriétés pouzzolaniques en raison de leur teneur élevée en silice amorphe. Elle améliore la compacité et la résistance mécanique du ciment. [10]

a) Ingrédients secondaires

Soit l'un des ingrédients spécifiés ci-dessus si la proportion est $\leq 5\%$, à l'exception du clinker; soit des fillers (F) dont la nature et la proportion exactes doivent être précisées par le fabricant dès lors que la proportion dépasse 3 %.

Lorsque l'ingrédient secondaire est une charge, il s'agit d'une poudre minérale très fine généralement inerte, mais qui peut parfois avoir des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques. Ces poudres peuvent améliorer l'ouvrabilité du ciment, ce qui se traduit par une meilleure ouvrabilité du béton. [10]

b) Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium régule la stabilisation du ciment. Le sulfate de calcium, qui peut être du gypse, de l'anhydrite ou de l'hydrate, doit être ajouté en petites quantités, de l'ordre de 3 à 5 % maximum. [10]

c) Additifs

Les additifs ne doivent pas avoir d'effet préjudiciable sur les propriétés du ciment, mais peuvent, le cas échéant, modifier certaines de ses propriétés. Les additifs peuvent inclure des agents de mouture fréquemment utilisés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à très petites doses. Ils agissent comme des défloculants, empêchant les granules de s'agréger à nouveau pendant le broyage. Il peut également s'agir de sels solubles, comme certains additifs pour mortier, béton ou plâtre, qui agissent dans ce cas sur une propriété spécifique, mais dont la présence dans le ciment doit être indiquée pour éviter toute incompatibilité éventuelle avec d'autres produits. La proportion d'additifs doit toujours être très faible et le pourcentage autorisé par l'étude bibliographique ne dépasse pas 0,5 % de la masse totale, y compris la proportion d'agents de mouture, pour tous les ciments sauf CHF-CEM III/A ou B et CLK-CEM III/C, où des sels chlorés (NaCl) jusqu'à 1 % sont autorisés. [10]

3.5 Classification et types de ciment

La norme européenne NF EN 197-1 énumère 27 ciments courants, qui sont regroupés et classés en fonction de leur composition [08]. Ils sont appelés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains (CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V) en notation européenne (notation française entre parenthèses) :

- **CEM I** : Ciment Portland Commun (CPO) ou CPA en Algérie : Constitué de 95% de clinker et de 5% de sous-produits. Utilisé pour la fabrication du béton armé ou précontraint.
- **CEM II** : Ciment Portland Composé (CPJ) : Composé de 65% de clinker et de 35% de sous-produits, il est utilisé dans les travaux normaux de béton armé.
- **CEM III** : Ciment de haut fourneau (BFC) : Constitué de 5 à 64 % de clinker et de 36 à 80 % de scories. Utilisé pour les fondations, les travaux souterrains et les environnements agressifs.
- **CEM IV** : Ciment pouzzolanique (CPZ) : Composé de 45 à 89 % de clinker, de 10 à 55 % de pouzzolane, de cendres volantes et de fumée de silice. Il est utilisé pour le béton armé dans les travaux maritimes.

- **CEM V** : Ciment avec laitier et cendres (CLC) : Composé de 20 à 64% de clinker, 18 à 50% de laitier et 18 à 50% de cendres volantes. Utilisé pour le béton en milieu agressif. [10]

3.6 Propriétés du ciment

3.6.1 Propriétés mécaniques

a) Résistance à la compression : La résistance à la compression du ciment est une propriété importante pour ses applications. La résistance du ciment pur est plus importante que lorsqu'il est mélangé à du sable, et la résistance augmente de manière significative au cours des premiers jours (environ 7 jours) et continue d'augmenter au fil du temps, bien qu'à un rythme plus lent.

b) Résistance à la traction : La résistance à la traction du ciment est mineure et non significative par rapport à la résistance à la compression.

c) Résistance à la corrosion : La résistance du ciment est affectée par les conditions environnementales telles que l'humidité excessive qui peut provoquer la corrosion des objets en béton armé.

d) Résistance au gel : La capacité du matériau à supporter des changements de température de bas en haut, certains composants pouvant être ajoutés pour augmenter cette résistance.

e) Demande en eau : Il s'agit de la quantité d'eau absorbée par le ciment, et la quantité d'eau doit être contrôlée pour garantir la qualité et la résistance du ciment.

f) Contrôle du temps : Il s'agit du temps nécessaire au durcissement du ciment. Une bonne solution durcit en 45 minutes et peut prendre jusqu'à 10 heures en fonction de la teneur en minéraux tels que le gypse. [11]

3.6.2 Propriétés chimiques

Des analyses et des tests chimiques sont généralement effectués pour contrôler les processus de fabrication du ciment afin de s'assurer que la composition chimique des matières premières correspond aux exigences de production et à la composition finale du clinker. Des analyses sont également effectuées sur le matériau manufacturé final, le ciment, afin de garantir la qualité de la production et la conformité aux spécifications. [11]

3.6.3 Propriétés physiques

a) Finesse : Plus le ciment est fin, plus la surface spécifique est importante. La finesse affecte les éléments suivants

b) Vitesse de réaction chimique : Plus le ciment est fin, plus il réagit rapidement avec l'eau de gâchage. Si les grains sont grossiers, le processus de réaction chimique ne se déroule pas suffisamment.

c) Développement de la résistance : Le processus de durcissement du ciment fin est plus rapide que celui du ciment grossier. Une plus grande finesse permet d'obtenir une plus grande résistance initiale.

d) La quantité de ciment nécessaire pour recouvrir les agrégats : Plus les granules de ciment sont fins, mieux ils peuvent recouvrir les agrégats de gravier et de sable. La finesse est déterminée dans les spécifications standard en déterminant la surface spécifique du ciment à l'aide d'un appareil de Blaine. Une finesse minimale du ciment de $(2250) \text{ cm}^2/\text{g}$ est requise. La finesse du ciment peut être divisée en trois types

- **Ciment grossier** : Indice de Blaine inférieur à $2800 \text{ cm}^2/\text{g}$.
- **Ciment fin** : Indice de Blaine supérieur à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$.
- **Ciment très fin** : Indice de Blaine de 5000 à $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$.
- **Masse volumique** : Le poids spécifique du ciment Portland est compris entre 3.0 et 3.2 g/cm^3 .

Il est déterminé à l'aide d'un pycnomètre. Le poids volumétrique du ciment Portland varie entre 0.9 et 1.3 g/cm^3 . Cette caractéristique est étroitement liée à la souplesse du ciment.

- Cohérence normale : Consistance normale : Il s'agit de déterminer le rapport eau/ciment idéal pour obtenir une pâte standard à l'aide d'une machine Vicat à tambour. Pour le ciment Portland ordinaire, le m/s est compris entre 0.25 et 0.3 .

- Réglage du temps : Lorsque le ciment est mélangé à l'eau, on obtient une pâte dont la plasticité diminue progressivement avec le temps. Au bout d'un certain temps, une sorte de première cohésion apparaît dans la pâte de ciment, cette période est appelée prise initiale et lorsque la pâte commence à durcir pour supporter un certain poids, elle a atteint la prise finale. Ce temps écoulé entre le début du mélange du ciment avec l'eau et le doute initial est appelé le temps de

doute, et il est très important pour le fonctionnement du béton (mélange, transport, coulage, secouage et finition).

Plusieurs facteurs influencent le temps de prise, notamment le type de ciment (composition chimique), sa souplesse, la quantité d'eau, la température et la proportion d'additifs (retardateurs ou accélérateurs). Il est déterminé sur une pâte standardisée à une température spécifique à l'aide d'un appareil Ficat chargé d'une aiguille. Selon les spécifications saoudiennes, l'incertitude initiale ne doit pas être inférieure à 45 minutes et l'incertitude finale ne doit pas dépasser 10 heures. [11]

3.7 Hydratation du ciment

Qu'est-ce que l'hydratation du ciment ?

Lorsque le ciment, l'eau, les agrégats et les additifs sont mélangés, une augmentation significative de la chaleur se produit. Cela est dû au processus exothermique de l'interaction entre le ciment et l'eau (appelé hydratation). [12]

La mesure de la température du béton au fil du temps permet de connaître l'état d'avancement du processus d'hydratation (maturité du béton) et donc d'estimer la résistance du béton. Le processus d'hydratation est divisé en cinq étapes :

Étape 1 : Réaction initiale du mélange

Après le mélange du ciment et de l'eau, une augmentation de la température se produit. L'aluminate (C3A) réagit avec H₂O (ions calcium et sulfate) pour former de l'ettringite (hydrate d'aluminate). La libération d'énergie de ces réactions est à l'origine de l'élévation initiale. [12]

Étape 2 : Inactivité

Le résultat de la réaction décrite à l'étape 1 est une couche à la surface des particules de ciment. Cette couche continue d'augmenter, mais elle ralentit également la réaction (hydratation) car l'accès à H₂O n'est pas aussi bon qu'au moment où le béton a été mélangé. La quantité de béton hydraté continue d'augmenter à un niveau constant tandis que la surface du béton reste liquide. [12]

C'est pourquoi cette étape est utilisée pour le transport et le coulage du béton, car le béton reste à l'état liquide. La durée de cette période dépend de chaque mélange de béton et peut donc être

optimisée en fonction de l'application (coulage en hiver, durée du transport, etc.). Cette étape se termine par une première prise de béton. [12]

Étape 3 : Accélération de la résistance

L'augmentation de la chaleur résulte de la réaction entre les silicates de calcium (C3S et C2S) conduisant à la formation de CSH (l'augmentation de la chaleur est également due à d'autres réactions secondaires). La formation de CSH a un impact significatif sur la résistance du béton à ce stade.

Dans le cas d'une application de béton à grande échelle par exemple, il peut être très important de surveiller les différences de température interne, car la température du béton pendant cette phase peut rapidement atteindre des températures internes telles que 70-80°C (et dans certains cas encore plus élevées). Il n'est généralement pas recommandé de dépasser des températures d'environ 70°C. [12]

Étape 4 : Réduire la vitesse

La température maximale ayant été atteinte, la disponibilité des radicaux libres est désormais faible et l'augmentation de la température ralentit.

Cette étape se termine souvent par l'obtention de la résistance souhaitée et les moules entourant le béton peuvent maintenant être retirés. Le suivi de la maturité et de la température du béton permet à l'utilisateur de connaître le moment exact où cela est possible. [12]

Étape 5 : Développement continu / Au-delà des moules Le processus d'hydratation s'est ralenti et se poursuivra lentement jusqu'à ce que les particules de ciment et d'eau restantes aient disparu. Les moules sont souvent enlevés maintenant et, avec le temps (cela peut prendre beaucoup de temps), le béton pourra terminer le processus d'hydratation et atteindre sa résistance finale (cela peut prendre des semaines ou des mois). [12]

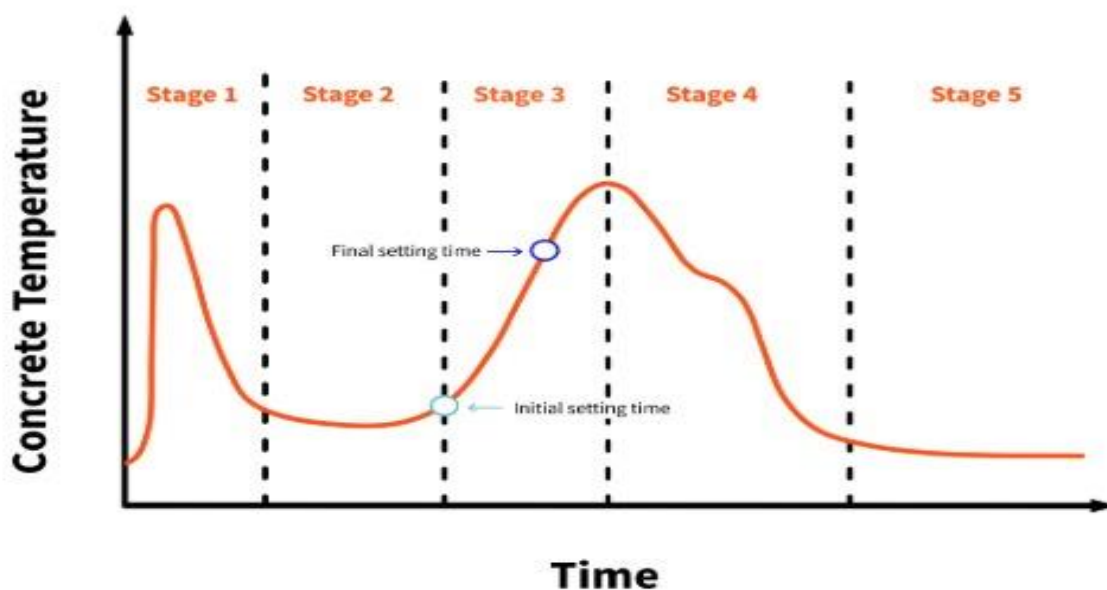


Figure 5. Etapes d'hydratation du ciment [12]

3.8 Utilisations du ciment

Le ciment est un liant très utile dans la construction. Les applications du ciment dans divers domaines de la construction en ont fait un matériau de génie civil très important. Voici quelques-unes des nombreuses fonctions du ciment.

- a) Il est utilisé dans le mortier pour les enduits, les travaux de maçonnerie, la signalisation, etc.
- b) Il est utilisé pour réaliser les joints des canalisations et des tuyaux.
- c) Il est utilisé pour assurer l'étanchéité de la structure.
- d) Il est utilisé dans le béton pour la pose des sols, des plafonds, la construction des linteaux, des poutres, des escaliers, des colonnes, etc.
- e) Il est utilisé lorsqu'une surface dure est nécessaire pour protéger les surfaces exposées des structures contre les facteurs destructeurs des intempéries et de certains produits chimiques organiques ou inorganiques.
- f) Il est utilisé pour fabriquer des tuyaux préfabriqués, des pieux, des poteaux de clôture, etc.
- g) Il est utilisé dans la construction d'importants ouvrages d'art tels que les ponts, les canaux, les barrages, les tunnels, les phares, etc.
- h) Il est utilisé dans la préparation des fondations, l'imperméabilisation des sols, les chemins piétonniers, etc.

- i) Il est utilisé dans la construction de puits, de réservoirs d'eau, de courts de tennis, de poteaux d'éclairage, de cabines téléphoniques, de routes, etc. [12]

4. Déchets

4.1 Introduction

Les déchets non biodégradables, tels que les briques réfractaires, les plastiques, les métaux et le verre, constituent l'un des plus grands défis environnementaux auxquels le monde est confronté aujourd'hui, car ils mettent des centaines d'années à se décomposer, ce qui entraîne une pollution du sol, de l'eau et de l'air. L'accumulation de ces déchets menace la faune et la flore, augmente les émissions de gaz à effet de serre et complique la gestion des déchets.

Il est donc devenu nécessaire d'élaborer des plans efficaces pour gérer ces déchets en minimisant leur production, en encourageant le recyclage et l'utilisation durable, et en sensibilisant les individus et les communautés à l'environnement. Ce plan vise à fournir des solutions pratiques et durables pour minimiser l'impact négatif des déchets non biodégradables et protéger l'environnement pour les générations futures. [13]

4.2 Déchets non biodégradables

4.2.1 Définition des déchets non biodégradables

Les déchets non dégradables sont des déchets qui ne sont pas dégradés naturellement par les facteurs environnementaux et les micro-organismes dans un court laps de temps, ce qui fait qu'ils restent dans l'environnement pendant de longues périodes pouvant aller jusqu'à des dizaines ou des centaines d'années. Ces déchets comprennent les plastiques, les métaux, le verre, certains types de caoutchouc et l'électronique. En raison de leur difficulté à se décomposer, ils polluent l'environnement et ont un impact négatif sur la santé de l'homme et de la faune, ce qui nécessite des stratégies de gestion efficaces, telles que le recyclage et la réduction de leur utilisation [13]

4.2.2 Origine des déchets non biodégradables

a) Les ménages : les ménages sont à l'origine de plusieurs déchets non biodégradables. Il s'agit notamment de produits en métal et en acier tels que les ustensiles. Les ménages sont les principaux contributeurs aux déchets plastiques et polymères. Les ménages indiens n'ont pas encore adopté de techniques adéquates de gestion des déchets.

- b) Agriculture : Les activités agricoles produisent divers résidus. Le principal résidu est l'engrais artificiel. Les engrais tels que le DDT ne sont pas biodégradables et ont donc un impact sur les sols.
- c) Construction : Les activités de construction produisent plusieurs déchets non biodégradables, notamment du ciment, des cendres volantes, etc.
- d) Déchets médicaux : les déchets médicaux sont souvent non biodégradables. Les déchets hospitaliers tels que les flacons de médicaments, les seringues, les équipements, les déchets de nettoyage et autres outils et articles des laboratoires de recherche ne sont pas biodégradables. Certains hôpitaux disposent d'un système d'élimination des déchets. D'autres hôpitaux dépendent des autorités municipales pour l'élimination appropriée des déchets.
- e) Centrale nucléaire : L'énergie nucléaire est utilisée pour produire de l'énergie. À la fin du processus de production d'énergie, des déchets nucléaires non biodégradables sont produits. Ces déchets continueront de fuir s'ils ne sont pas éliminés correctement. De nombreuses formes de vie peuvent mourir immédiatement au contact de ces déchets.
- f) Pollution plastique : Le plastique est utilisé dans les ménages et dans les emballages industriels. C'est l'un des pires types de déchets non biodégradables. Son faible coût en fait un véritable changement de donne dans le domaine de la fabrication. En raison de cette caractéristique, nous trouvons du plastique partout. On le trouve dans l'océan, le cercle arctique, les forêts et même au sommet des plus hautes montagnes. Si le plastique recouvre le sol, les formes de vie qui se trouvent en dessous ne reçoivent pas l'apport d'oxygène approprié et, par conséquent, l'ensemble de l'écosystème est perturbé. La terre peut également devenir stérile en raison d'une mauvaise élimination du plastique. Étant donné que seulement moins de 50 % du plastique est recyclé, l'impact négatif sur notre environnement ne diminue pas. Nous assistons également à la mort lente de la vie aquatique à cause de la pollution plastique. Les animaux terrestres tels que les vaches, les chèvres, les chevaux, etc. consomment également du plastique, ce qui entraîne des conséquences désastreuses. [13]

4.2.3 Types de déchets non biodégradables

a) Les déchets électroniques

Il s'agit des vieux téléphones portables, téléviseurs, ordinateurs et autres appareils électriques. Ces déchets contiennent des substances toxiques telles que le plomb et le mercure, et doivent être manipulés avec précaution pour éviter toute contamination .[13]

b) Plastiques

Il s'agit des récipients, sacs et bouteilles en plastique, ainsi que des couverts en plastique. Ces matériaux ne se dégradent pas facilement et continuent de s'accumuler, entraînant une pollution des sols et des océans .[13]

c) Déchets nucléaires:

Produits par les centrales nucléaires, ils contiennent des matières radioactives qui peuvent rester dangereuses pendant des milliers d'années si elles ne sont pas manipulées de manière sûre .[13]

d) Polymères synthétiques:

Tels que le nylon, le polyester et le polyuréthane. Ces matériaux ne se dégradent pas naturellement et mettent très longtemps à se décomposer, ce qui constitue un risque pour l'environnement .[13]

e) Caoutchouc synthétique:

On le trouve dans les pneus usagés et d'autres produits fabriqués à partir de caoutchouc synthétique. Ces matériaux mettent très longtemps à se décomposer et contribuent à la pollution de l'environnement .[13]

f) Briques réfractaires : Déchets de l'industrie des fours ou des incinérateurs, les briques réfractaires sont utilisées pour résister à des températures élevées. Bien qu'elles soient résistantes à la chaleur, elles ne sont pas facilement biodégradables et posent un problème d'élimination en toute sécurité .[13]

g) Déchets industriels : Les déchets générés par les processus industriels comprennent les huiles usées, les engrais chimiques et les solvants. Beaucoup de ces matériaux ne se décomposent pas facilement et peuvent contenir des substances toxiques [13]

h) Déchets de verre : Le verre, tel que les vieilles bouteilles, les fenêtres cassées et les assiettes en verre, ne se décompose pas facilement dans l'environnement. Bien que le verre soit recyclable, son accumulation dans l'environnement pose problème .[13]

i) Déchets médicaux Aiguilles et seringues usagées, pansements et médicaments périmés. Ces déchets contiennent des substances qui peuvent être nocives pour l'homme et l'environnement si elles ne sont pas éliminées correctement .[13]

j) Déchets agricoles : Ils comprennent les engrais et les pesticides qui contiennent des produits chimiques non biodégradables, susceptibles de contaminer l'eau et le sol. [13]

4.2.4 Les déchets de briques réfractaires

4.2.4.1 Définition des briques réfractaires

Communément appelées briques réfractaires, ce sont des briques spécialisées conçues pour résister aux températures élevées et aux environnements difficiles. Ils sont utilisés dans diverses applications industrielles qui nécessitent une résistance extrême à la chaleur, à la corrosion et à la corrosion. Elle joue un rôle crucial dans des industries telles que la fabrication de l'acier, la production de verre, les cimenteries, les raffineries pétrochimiques et plus encore. Ils sont constitués de matériaux réfractaires tels que l'alumine, la silice, la magnésie et d'autres composés. Ces matériaux sont choisis pour leur capacité à résister à des températures élevées sans se déformer, fondre ou s'effriter. Ils se présentent sous différentes formes et tailles, pour répondre à des besoins industriels spécifiques. Réfléchissons. [14]

4.2.4.2 Types de briques réfractaires

a) Briques coupe-feu

Parmi les briques réfractaires les plus couramment utilisées. Il est fabriqué à partir d'un matériau naturel riche en alumine et en silice appelé argile réfractaire. La résistance aux chocs thermiques est excellente, tandis que la résistance aux températures élevées est une autre caractéristique des briques en argile. On les trouve dans les fours, les fours et même les cheminées. [14]

b) Briques à haute teneur en alumine

Les briques à haute teneur en alumine contiennent plus d'alumine (Al_2O_3) que les briques réfractaires, elles sont donc connues sous ce nom en raison de ce fait. En conséquence, il présente une meilleure résistance aux températures élevées et à la corrosion des scories. Ils sont

choisis lors du travail dans des hauts fourneaux, des poches en acier ou des fours à ciment puisque ces constructions résistent à des climats extrêmement chauds couplés à des conditions ambiantes corrosives [14]

c) **Briques de silice :**

Les briques de silice sont principalement composées de silice (SiO_2). Ces produits ont la propriété unique de conserver leur forme à des températures allant jusqu'à 1650 degrés (3002 degrés Fahrenheit). Les briques de silice sont largement utilisées dans les fours de fusion du verre et les fours à coke en raison de leur très bonne stabilité thermique et de leur résistance aux scories acides. [14]

d) **Briques de magnésie :**

Les briques de magnésie sont constituées de magnétite (MgCO_3), avec un pourcentage élevé d'oxyde de magnésium (MgO). Il est connu pour sa capacité à résister aux scories alcalines et est capable de résister à des températures élevées. Ils sont couramment utilisés dans les fours sidérurgiques, notamment dans les transformateurs et les fours à arc électrique. [14]

e) **Briques chromite :**

Les briques de magnésie sont constituées de magnétite (MgCO_3), qui a une forte concentration d'oxyde de magnésium (MgO). Cette brique présente une excellente résistance aux scories primaires et la capacité de résister à des températures élevées. De plus, ils sont souvent utilisés comme doublures dans les transformateurs et les fours à arc électrique utilisés par les sidérurgistes. [14]

f) **Briques de zircon :**

Les briques de zircon sont en dioxyde de zirconium (ZrO_2). Il se caractérise par son point de fusion élevé et sa résistance exceptionnelle aux chocs thermiques, ainsi qu'à l'attaque chimique. Dans des conditions de température extrêmes telles que des réacteurs nucléaires ou une cuve de fusion de verre, les briques de zircon sont généralement préférées. [14]

4.2.4.3 Principales propriétés des briques réfractaires

a) **Réfractaires :** La principale mesure des performances des briques réfractaires est leur résistance à la chaleur, qui est définie comme la température maximale à laquelle elles peuvent résister sans fondre ni perdre leur intégrité structurelle. Les briques réfractaires sont

classées en différentes qualités en fonction de leur résistance à la chaleur, allant du service à basse température au super-service, répondant à des exigences de température spécifiques. [14]

- b) **Conductivité thermique :** La conductivité thermique fait référence à la capacité d'un matériau à transférer de la chaleur. Dans les briques réfractaires, une faible conductivité thermique est souhaitable, car elle réduit les pertes de chaleur et améliore l'efficacité énergétique. Cette propriété est particulièrement cruciale dans les applications impliquant des fours et des fours à haute température. [14]
- c) **Résistance aux chocs thermiques :** La résistance aux chocs thermiques est la capacité des briques réfractaires à résister à des fluctuations rapides de température sans fissuration ni éclatement. Cette propriété est essentielle dans les applications où les briques sont soumises à des processus périodiques de chauffage et de refroidissement. [14]
- d) **Résistance chimique :** Les briques réfractaires doivent présenter une résistance aux attaques chimiques des métaux en fusion, des scories et des gaz courants dans les environnements industriels. Le choix d'une composition de briques réfractaires est crucial pour garantir la compatibilité avec l'environnement chimique spécifique. [14]
- e) **Résistance mécanique :** La résistance mécanique comprend la capacité des briques réfractaires à résister aux contraintes physiques, telles que les forces d'abrasion, de pression et de cisaillement. Cette propriété est particulièrement importante dans les applications impliquant la corrosion, telles que les réacteurs de revêtement et les fours . [14]

4.2.4.4 Avantages des briques réfractaires

- a) **Relativement peu coûteux :** Les blocs sont relativement bon marché car les matières premières nécessaires à la fabrication sont facilement disponibles. [14]
- b) **Résistant au feu :** La brique réfractaire en tant que matériau de construction possède une très forte propriété de résistance aux températures élevées et au feu. Ils rendent la structure résistante aux flammes et réduisent le risque de dommages structurels dus à la chaleur. [14]
- c) **Le processus de fabrication est facile :** Le processus de fabrication des blocs coupe-feu est quelque peu similaire au processus de production des briques traditionnelles utilisées dans la construction en pierre. [14]

- d) **Il n'y a pas d'exigence de main-d'œuvre qualifiée** : La méthode de pose de blocs coupe-feu est simple et similaire au processus traditionnel de pose de briques. Par conséquent, il ne nécessite aucune formation spéciale ni main-d'œuvre formée pour établir les procédures. [14]
- e) **Résistant à l'humidité** : La brique peut absorber l'eau, ce qui en fait un matériau de construction imperméable. [14]
- f) **Tailles personnalisées** : Bien que les blocs coupe-feu soient disponibles dans une taille spécifique, ils sont également disponibles dans certaines tailles personnalisées, à la demande des fabricants, pour répondre aux exigences de votre projet. [14]

4.2.4.5 Application de briques réfractaires

- a) **Sidérurgie et sidérurgie** : Les briques réfractaires sont indispensables dans l'industrie sidérurgique et sidérurgique car elles sont utilisées dans la fabrication de hauts fourneaux, de transformateurs ainsi que d'écofes. Ces structures fonctionnent à des températures très élevées et entrent ainsi en contact avec des scories corrosives et des métaux en fusion. Ils ont une résistance thermique et une stabilité structurelle suffisantes. [14]
- b) **Industrie du ciment** : L'industrie du ciment dépend fortement des briques réfractaires pour recouvrir les fours rotatifs et les refroidisseurs. Les fours fonctionnent à très haute température pour convertir les matières premières en clinker. Les briques réfractaires les protègent ainsi des dommages thermiques et des effets chimiques. Assurant ainsi la longue durée de vie et l'efficacité de ces fours. [14]
- c) **Industrie verrière** : Les briques réfractaires sont importantes dans l'industrie du verre car elles sont utilisées dans la fabrication de fours de fusion du verre. Les températures élevées nécessitent des matériaux capables de résister aux chocs thermiques et à la corrosion chimique provoqués par la nécessité de faire fondre le verre. [14]
- d) **Céramique et poterie** : Les fours utilisés pour brûler des céramiques et des poteries dans l'industrie de la céramique et de la poterie utilisent des briques réfractaires. Pour que ces fours produisent de la céramique de haute qualité, ils doivent être à une température constante élevée. En raison de leur stabilité thermique et de leur résistance aux chocs thermiques, des briques réfractaires et des briques à haute teneur en alumine sont souvent utilisées dans ces applications.

- e) Industrie des métaux non ferreux : Dans les fours de l'industrie des métaux non ferreux fondant des métaux tels que l'aluminium, le cuivre, le plomb, etc., les briques réfractaires deviennent utiles. Ces fours fonctionnent à haute température avec des scories corrosives. En raison de la nature de base résistante aux scories, les briques de magnésie et les briques de chromite sont couramment utilisées ici et peuvent résister aux effets de la chaleur. [14]
- f) Production d'énergie : Les chaudières et les incinérateurs sont particulièrement utilisés dans les centrales électriques à briques réfractaires. De telles structures fonctionnent dans des conditions de température élevée et nécessitent donc des matériaux capables de résister à la fois aux attaques chimiques et aux contraintes thermiques. C'est pourquoi dans ces cas, il est généralement préférable d'utiliser des briques réfractaires ou des briques à haute teneur en alumine. [14]
- g) Industrie pétrochimique : L'industrie pétrochimique utilise des briques réfractaires dans les réacteurs, les réparations et autres unités dotées d'un chemin de traitement à haute température. Pour cette raison, des matériaux capables de résister au cycle thermique et à la corrosion chimique sont nécessaires dans ces zones environnantes. [14]

4.2.5 Déchets de céramique

4.2.5.1 Définition de la céramique

Le terme “céramique” provient du mot grec “keramos”, signifiant argile. Il désigne une variété de produits fabriqués à partir d'argile cuite, ce qui comprend une vaste gamme d'objets, de la poterie de base aux composants électroniques sophistiqués. La céramique est reconnue pour ses propriétés telles que la résistance à la chaleur, la durabilité et l'isolation électrique. [15]

4.2.5.2 Historique de la céramique

L'histoire de la céramique remonte à des millénaires avant notre ère, où les premières poteries ont été créées pour stocker, cuisiner ou transporter des aliments et des liquides. Au fil du temps, la céramique a évolué pour devenir un élément essentiel dans l'art et l'architecture, et elle continue d'être utilisée dans des applications techniques avancées. [15]

4.2.5.3 Processus de fabrication général

La fabrication de la céramique suit généralement plusieurs étapes clés. Tout d'abord, l'argile est préparée et modelée, avant d'être séchée pour éliminer l'humidité excédentaire. Ensuite,

elle est cuite dans un four à des températures qui varient en fonction du type de céramique désiré. Ce processus transforme l'argile molle en un matériau dur et durable.

La cuisson peut être effectuée à différentes températures et peut inclure plusieurs cycles. Après la première cuisson, appelée "biscuit", un émail peut être appliqué, et l'objet est alors cuit une seconde fois pour fixer l'émail et obtenir la finition voulue .[15]

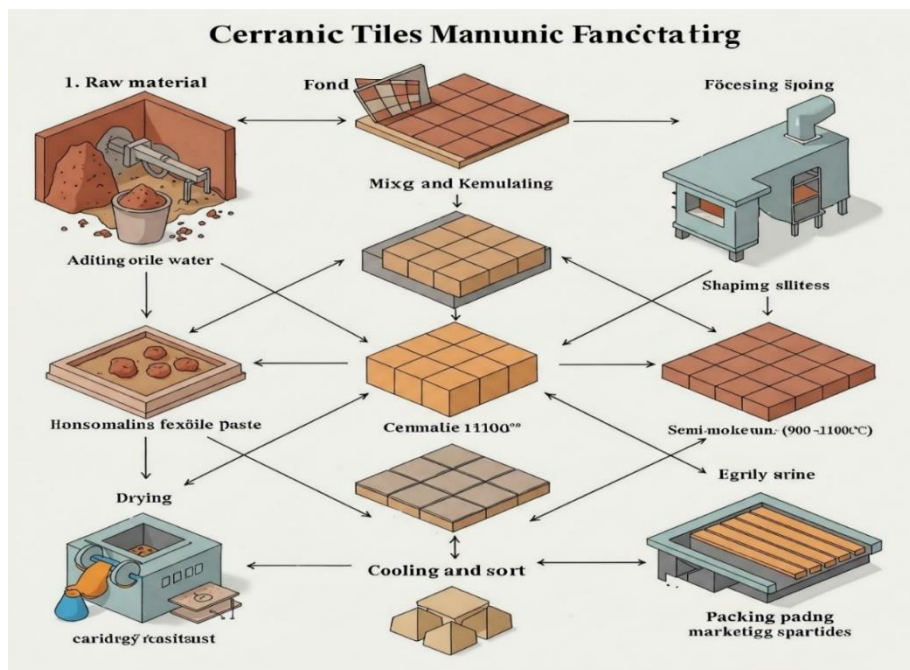


Figure 6. Processus général de fabrication [15]

4.2.5.4 Types de céramique

a) La faïence

Qu'est-ce que la faïence ?

La faïence est un type de poterie recouvert d'une glaçure colorée qui lui donne une surface lisse et souvent brillante. Elle est généralement utilisée pour fabriquer des objets décoratifs ou des carreaux muraux, mais on la retrouve également dans la vaisselle et d'autres articles ménagers . [15]

b) Caractéristiques de la faïence

La faïence est appréciée pour ses couleurs vives et sa capacité à être peinte avec des motifs détaillés. Bien que moins résistante que le grès ou la porcelaine, la faïence possède un charme esthétique qui la rend très appréciée à des fins décoratives. Sa surface émaillée lui permet également de résister à l'eau, ce qui la rend facile à nettoyer .[15]

Tableau N°05 : Caractéristiques de la faïence [15]

Type de céramique	Résistance	Porosité	Utilisations courantes
Faïence	Moyenne	Élevée (mais réduite par l'émail)	Objets décoratifs, carrelage mural
Grès	Élevée	Faible	Carrelage de sol, ustensiles de cuisine
Porcelaine	Élevée	Très faible	Vaisselle fine, éléments décoratifs

c) Utilisations et applications

En raison de sa beauté, la faïence est couramment utilisée dans la décoration et l'architecture, notamment dans les revêtements muraux des cuisines et des salles de bains. Elle est également couramment utilisée dans la fabrication de vaisselle, de figurines et d'autres objets décoratifs . [15]

4.2.5.6 Inconvénients et effets des déchets non biodégradables

Les déchets non biodégradables constituent une menace importante pour l'environnement et la santé et peuvent avoir plusieurs conséquences négatives s'ils ne sont pas traités de manière appropriée. Voici quelques-uns des principaux inconvénients et impacts de ces déchets[13] :

a) Pollution de l'environnement

Contamination des sols : Lorsque les déchets non biodégradables sont éliminés de manière inappropriée dans l'environnement (par exemple, enfouis dans des décharges), ils s'accumulent dans le sol et affectent sa fertilité. Certains matériaux peuvent libérer des substances toxiques dans le sol et affecter les plantes et les micro-organismes qui dépendent du sol pour leur survie.

Pollution de l'eau : Les déchets non biodégradables, tels que les plastiques et les déchets chimiques, peuvent s'infiltrer dans les sources d'eau telles que les rivières, les lacs et les océans. Ces substances peuvent entraîner une pollution de l'eau, nuire à la vie marine et rendre l'eau impropre à la consommation humaine.

Pollution de l'air : Si les déchets non biodégradables tels que les plastiques ou les produits chimiques sont brûlés, ils peuvent produire des gaz toxiques tels que les dioxines, qui polluent l'air et entraînent de graves problèmes de santé. [13]

b) Effets sur la santé humaine

Substances toxiques : De nombreux déchets non biodégradables, tels que les déchets électroniques, contiennent des substances toxiques telles que le plomb, le mercure et le cadmium. Lorsque ces substances entrent en contact ou sont inhalées, vous pouvez souffrir de problèmes de santé tels que l'empoisonnement, les maladies respiratoires et les troubles neurologiques. [13]

c) Menaces pour la faune : Les créatures marines et les animaux terrestres peuvent ingérer des déchets non biodégradables tels que les plastiques, ce qui peut entraîner des blocages dans leur système digestif ou un empoisonnement pouvant causer leur mort.

- Les déchets tels que les pneus ou les bouteilles usagés peuvent s'accumuler dans les habitats naturels des animaux, menaçant ainsi la diversité de la faune et perturbant leurs comportements naturels tels que l'alimentation et la reproduction. [13]

d) Impacts économiques

Augmentation des coûts de gestion des déchets : Le traitement des déchets non biodégradables nécessite des technologies avancées telles que l'incinération ou le recyclage, ce qui augmente les coûts de traitement et d'élimination. Ces coûts peuvent peser sur les gouvernements et les entreprises.

Perte de valeur économique : L'accumulation de déchets dans les environnements naturels peut entraîner la perte de la valeur touristique et économique des zones touchées. La contamination de l'eau ou du sol peut avoir un impact négatif sur l'agriculture et d'autres industries. [13]

i) Consommation de ressources naturelles

Déchets de matières premières : Les déchets tels que les déchets électroniques ou les plastiques peuvent contenir des minéraux et des ressources qui peuvent être réutilisés. Lorsque ces déchets ne sont pas recyclés, nous gaspillons des ressources précieuses qui auraient pu être utilisées pour créer de nouveaux produits. [13]

f) Accumulation de déchets dans les décharges

Les déchets non biodégradables s'accumulent dans les décharges et prennent de la place, ce qui entraîne des problèmes de gestion des déchets et une pression accrue sur les sites de décharge. Il en résulte un besoin accru de nouvelles décharges, ce qui accroît les défis environnementaux. [13]

5. Mortier**5.1 Introduction**

Le mortier est l'un des plus anciens matériaux utilisés dans la construction, jouant un rôle essentiel dans le collage des éléments de construction tels que les briques et les pierres depuis l'Antiquité. Le mortier se compose généralement de liants tels que la chaux ou le ciment, mélangés à du sable et de l'eau, ce qui lui confère des propriétés adhésives qui aident à maintenir les éléments structurels ensemble. L'utilisation du mortier a évolué au cours de l'histoire, en commençant par des ingrédients naturels simples tels que l'argile et la chaux, puis en subissant des améliorations significatives avec le développement des techniques de construction, jusqu'aux types modernes qui ont des propriétés avancées en termes de solidité, de durabilité et de résistance aux facteurs environnementaux. Grâce à ces développements, le mortier est devenu un élément essentiel dans la construction de bâtiments et d'infrastructures, ce qui en fait un matériau indispensable dans l'architecture et la construction.

5.2 Définition du mortier:

Il s'agit d'un matériau de construction utilisé pour lier des briques ou des pierres afin de combler les espaces entre elles. Il se présente généralement sous la forme d'une pâte qui devient solide lorsqu'elle sèche et peut être classé en fonction du type d'application dans lequel il sera utilisé. [16]

En général, on distingue trois types de mortiers :

- Les mortiers pour utilisation générale
- Les mortiers pour fines couches.
- Les mortiers allégés.

5.3 Composition d'un mortier

Les mortiers sont en fait des micros - bétons et leurs principes de compositions sont les mêmes. Ils sont composés de ciment, de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants. On peut l'illustrer par la figure 6 :

- a) Le ciment est un liant hydraulique, est capable de prendre forme dans l'eau. Il est constitué d'une poudre très fine qui, mélangée à de l'eau, forme une pâte qui durcit progressivement au fil du temps.
- b) Le sable est un matériau granulaire qui est composé de particules issues de la dégradation de roches, telles que le quartz, les micas et les feldspaths. Les grains de sable ont une dimension comprise entre 1/16e de millimètre et 2 millimètres.
- c) L'eau est un élément clé du béton et intervient à toutes les étapes de son cycle de vie grâce à ses propriétés physico-chimiques et mécaniques, en tant que l'un des composants fondamentaux des matériaux. [17]

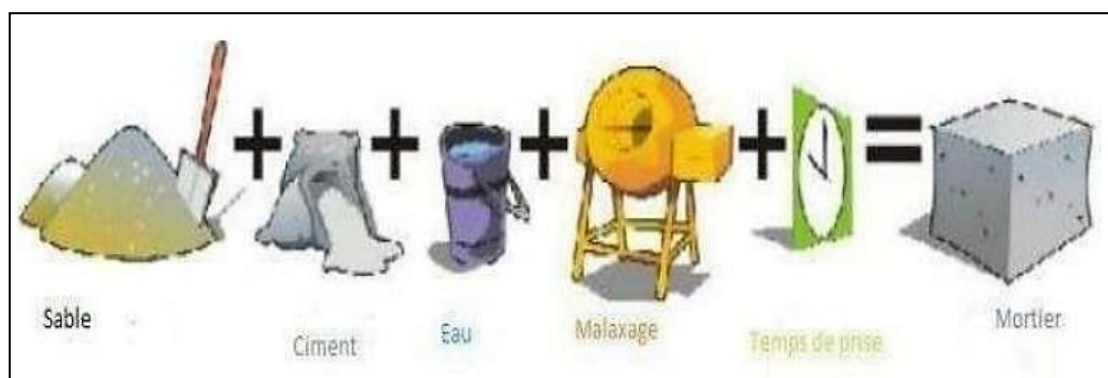


Figure 7. Fabrication du mortier [16]

5.4 Propriétés des mortiers

Les propriétés principales d'un mortier sont :

- a) La fluidité : Selon les ingrédients, la pâte de mortier peut avoir différentes consistances, de sèche à liquide. Les mortiers utilisés pour la maçonnerie, la finition des bâtiments, etc. ont une fluidité suffisante. La fluidité du coulis de mortier est indiquée par la profondeur à laquelle un cône métallique pesant 300 g et avec un angle au sommet de 30° est inséré dans le coulis.
- b) La maniabilité : Elle est déterminée par la fluidité, c'est-à-dire : la capacité à atterrir sur la surface, à adhérer fermement à la surface de base sous la forme d'une couche de densité uniforme, avec un minimum de consommation d'énergie. Par exemple les compositions

préparées avec une petite quantité de coulis sont sèches et volumineuses. Dans ce cas, on utilise des plastifiants minéraux ou organiques tensioactifs.

c) Le pouvoir de rétention d'eau : Cette propriété se caractérise par le fait que la pâte ne se décolle pas pendant le transport et conserve suffisamment d'humidité. Les pâtes de mortier à faible hydrophilie se délaminent pendant le transport et lorsqu'elles sont placées sur des surfaces Poreuses (briques d'argile, béton, bois), elles libèrent rapidement de l'humidité. Le séchage du mortier est si important qu'il n'y a pas assez d'eau pour durcir le mortier afin d'atteindre la résistance requise. La rétention d'eau peut être améliorée par l'introduction de plastifiants minéraux et organiques. [17]

5.5 Différents types de mortier

5.5.1 Mortiers de ciment

Les mortiers de ciment, connus pour leur grande résistance, ont la particularité de prendre et de durcir rapidement. De plus, un dosage adéquat en ciment les rend pratiquement imperméables. Pour obtenir des résultats satisfaisants, les dosages usuels se situent entre 300 et 400 kg de ciment par mètre cube de sable. [17]

5.5.2 Mortiers de chaux

Les mortiers de chaux se caractérisent par leur texture grasse et onctueuse. Leur durcissement est généralement plus lent que celui des mortiers de ciment, en particulier lorsque la chaux utilisée est de type calcique. Cette caractéristique en fait un choix privilégié pour la restauration de bâtiments anciens, où une liaison plus flexible est souvent nécessaire. [17]

5.5.3 Mortiers bâtards

Le mélange de ciment et de chaux permet de bénéficier des avantages de ces deux types de liants. En règle générale, on utilise des quantités égales de chaux et de ciment, mais selon les besoins et la qualité souhaitée, il est possible de modifier cette proportion en privilégiant l'un ou l'autre des composants. Mortier de ciment : Le mortier de ciment est composé de ciment, de sable et d'eau. Il est largement utilisé pour la construction de maçonnerie et de béton.

Les mortiers bâtards résultent du mélange de ciment et de chaux, offrant ainsi une combinaison des avantages de ces deux types de liants. En règle générale, on utilise des quantités égales de chaux et de ciment, mais selon les besoins et la qualité souhaitée, il est possible de modifier

cette proportion en privilégiant l'un ou l'autre des composants, cette flexibilité en fait un choix polyvalent pour une variété d'applications de construction. [17]

5.5.4 Mortiers de ciment réfractaire

Les mortiers de ciment réfractaire sont des matériaux conçus pour résister à des températures élevées, ce qui les rend indispensables dans la construction de cheminées, de poêles, de fours et d'autres équipements soumis à des chaleurs intenses. Ils sont formulés avec des ciments spéciaux et des agrégats capables de conserver leur intégrité structurelle dans des environnements thermiquement hostiles. L'utilisation de ces mortiers garantit l'étanchéité et la durabilité de ces structures exposées à des températures élevées. [17]

5.5.5 Mortier de plâtre

Le mortier de plâtre est un matériau de construction essentiel, composé de plâtre, de sable et d'eau, et utilisé pour le revêtement de murs et de plafonds intérieurs. Il offre la possibilité de créer des surfaces lisses et uniformes, tout en étant polyvalent pour diverses finitions. Ce matériau est largement employé dans le secteur de la construction pour obtenir des surfaces intérieures esthétiques et fonctionnelles, que ce soit pour des applications résidentielles ou commerciales. [16]

5.5.6 Mortier de réparation

Le mortier de réparation est un matériau spécialement conçu pour restaurer des éléments en béton endommagés ou détériorés. Composé de ciment, de sable, d'eau et d'additifs spéciaux, il vise à rétablir l'intégrité structurelle de structures en béton, prolongeant ainsi leur durée de vie. Ce type de mortier est utilisé pour la réparation de fissures, la reconstruction de zones endommagées, le renforcement de zones structurelles affaiblies, et la réparation de béton exposé à des environnements agressifs. Il joue un rôle crucial dans la préservation et la sécurité des infrastructures en béton. [17]

5.5.7 Mortier d'isolation thermique

Les mortiers d'isolation thermique sont des matériaux clés pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Composés de ciment, de particules isolantes légères et d'additifs, ils sont appliqués sur les murs extérieurs des bâtiments pour créer une barrière thermique. Cette couche d'isolation réduit les pertes de chaleur ou de fraîcheur, favorisant ainsi une température intérieure confortable tout en réduisant la consommation d'énergie pour le chauffage ou la

climatisation. Ces mortiers sont largement utilisés dans la construction résidentielle, commerciale et industrielle, contribuant ainsi à des économies d'énergie significatives et à une construction plus durable. Mortier époxy : Le mortier époxy est composé de résine époxy et de charges minérales. Il est utilisé pour les réparations structurelles et les collages. [17]

5.5.8 Mortier de pierre

Le mortier de pierre est un matériau spécifiquement conçu pour la construction de murs de pierre et de maçonnerie en pierre. Composé de ciment, de sable, d'eau et éventuellement d'additifs, il remplit les espaces entre les pierres naturelles pour créer des structures solides et durables. Ce type de mortier est essentiel dans la restauration de bâtiments historiques et dans la construction de nouvelles structures en pierre, grâce à sa capacité à résister aux contraintes environnementales. [17]

5.6 Utilisation des mortiers

Les mortiers sont présents dans tous les secteurs du BTP et peuvent être classés selon 4 applications principales :

- a) Façades : Enduits de construction neuve, enduits de rénovation, enduits d'isolation extérieure.
- b) Carrelages : Colles à carrelage, mortiers de joints, étanchéité, isolation phonique sous carrelage.
- c) Sols : mortier de nivellement, peinture de lissage, produit de nivellement.
- d) Mortiers spéciaux : Ingénierie des structures, Maçonnerie, Réparation, Étanchéité, Voirie, Assainissement, Étanchéité. [17]

6. Conclusion

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des matériaux de construction de base tels que le sable de dune, le ciment Portland et le mortier, en mettant l'accent sur leurs propriétés physiques et chimiques et sur leur utilisation pour améliorer la qualité des matériaux de construction. Il met également l'accent sur les déchets non biodégradables (briques réfractaires et céramiques) et montre comment ils peuvent être recyclés en tant que matériaux de construction afin de minimiser leur impact sur l'environnement. Le chapitre souligne l'importance de ces matériaux dans la promotion de la durabilité et de l'efficacité dans le secteur de la construction.

CHAPITRE II

MATÉRIAUX ET MÉTHODES

1. Introduction

Ce chapitre présente une série d'essais réalisés sur le sable de dune, visant à évaluer principalement ses propriétés physiques, ainsi qu'à vérifier sa conformité aux normes en vigueur.

Dans le but d'améliorer les caractéristiques de ce sable, des déchets de céramique et de briques réfractaires ont été intégrés dans le cadre d'une correction granulaire. Cette démarche vise à renforcer les performances globales du matériau, notamment en améliorant sa distribution granulaire et par conséquent en optimisant ses propriétés physiques. Cette approche contribue non seulement à une valorisation des déchets industriels, mais également à l'amélioration de la qualité finale du produit fabriqué.

2. Matériaux utilisés

2.1 Sable de dune utilisé :

Dans cette étude, le sable de dune utilisé provient du sud-est de l'Algérie, plus précisément de la région d'El-Oued. Ce sable constitue une ressource locale, souvent caractérisée par sa distribution fine, mais pouvant nécessiter un traitement ou un mélange avec d'autres matériaux granulaires pour améliorer ses propriétés physiques. Les échantillons utilisés ont été prélevés : près du complexe de la Gazelle d'Or [16]



Figure 8. Sable de dune utilisé

2.2 Ciment utilisé

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment portland au calcaire de haute qualité, produit par " MATINE LAFARGE", conçu pour des bétons à haute performance. Ses spécifications sont les suivantes:

- CEM II/B-L 42.5 NA442
- Conforme aux normes algériennes (NA442-2013) et européennes (EN 197-1).

Les caractéristiques distinctives du ciment Portland au calcaire CEM II/B-L 42.5 NA442 "MATINE LAFARGE" sont:

- Une résistance initiale élevée permettant la réalisation de structures lourdes préfabriquées.
- Une meilleure conservation de la fluidité du béton.
- Une qualité véritable offrant des performances élevées pour le béton.
- Une durabilité accrue pour les ouvrages en béton. [16]



Figure 9. Ciment Portland au calcaire (MATINE LAFARGE).

2.2.1 Caractéristiques techniques du ciment utilisé

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques du ciment Portland au calcaire CEM II/B-L 42.5 NA442 (MATINE LAFARGE) [16] :

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5%
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	< 0,1

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	8±2

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

Figure 10 : Fiche technique du ciment utilisé (MATINE LAFARGE)

2.3 L'eau de gâchage

L'eau utilisée dans le mélange du mortier est l'eau du robinet. Elle est choisie pour sa disponibilité et son accessibilité pratique. En général, l'eau du robinet convient à l'utilisation, tant qu'elle respecte les normes chimiques et physiques requises. Cette eau se caractérise par un minimum d'impuretés chimiques nuisibles pouvant altérer la qualité du mortier, ce qui en fait une option idéale pour maintenir l'équilibre des mélanges de ciment et garantir des performances constantes.

2.4 Déchets utilisés

Ce projet vise à développer un matériau de construction durable en optimisant la correction granulométrique du sable de dune grâce à l'utilisation de déchets industriels à forte valeur ajoutée. Dans ce contexte, deux types de déchets sont exploités :

2.4.1 Déchets de briques réfractaires

La brique réfractaire utilisée dans cette étude est un déchet industriel issu de la cimenterie « Biskria », située à Biskra. Ce matériau, initialement destiné à résister à de très hautes températures à l'intérieur des fours de production du clinker, est récupéré après usure ou

remplacement. Son recyclage dans le domaine de la construction s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets et de réduction de l'impact environnement.



Figure 11 : Déchets de briques réfractaires

2.4.2 Déchets de céramique (faïence)

Les déchets utilisés dans cette étude proviennent de plusieurs chantiers de construction situés dans la région d'El-Oued. Ils se présentent principalement sous forme de fragments et de débris cassés, résultant de la découpe ou de la casse de matériaux céramiques lors des travaux de construction. Avant d'être broyés pour être incorporés dans le mortier, ces déchets présentent des formes irrégulières et des dimensions variables. La figure 4 illustre l'aspect de ces déchets avant le processus de broyage.



Figure 12. Déchets de céramique (faïence)

2.5 Broyage

La combinaison de chaque type de déchets avec le sable permet d'optimiser la répartition granulométrique, conduisant ainsi à l'amélioration des performances structurelles et à la protection de l'environnement par le recyclage efficace des déchets industriels.

Le principe fondamental de l'appareil « Los Angeles » repose sur la simulation des conditions réelles auxquelles les agrégats sont soumis lors de leur utilisation dans la construction de fondations et de chaussées. Dans l'essai traditionnel, un échantillon d'agrégats est placé, avec un nombre déterminé de boulets en acier, dans un cylindre rotatif. La rotation du cylindre, effectuée pour un nombre précis de tours, induit des impacts répétés ainsi que des fragmentation frottements mutuels entre les billes et les agrégats, et entre ces derniers et la paroi du cylindre. Ce mécanisme entraîne deux effets majeurs : d'une part, la fragmentation des éléments due aux chocs directs, et d'autre part, l'érosion résultant des frottements induits par le mouvement de rotation. À l'issue de l'essai, la perte de masse de l'échantillon est mesurée afin d'évaluer la résistance et la durabilité des agrégats face à l'usure.

Ce principe a été exploité dans un procédé de broyage des déchets de céramique et de briques réfractaires, destiné à être utilisé pour la correction granulométrique du sable de dune. Dans ce procédé, les déchets de céramique et les briques réfractaires sont traités comme des matières premières broyées par un mécanisme analogue à celui de l'appareil « Los Angeles », où la rotation et les impacts entraînent leur fragmentation en particules fines. Le produit obtenu présente une distribution granulométrique optimisée, ce qui permet d'améliorer les propriétés du sable de dune et de développer ainsi des matériaux de construction plus performants et durables.



Figure 13. Appareil « Los Angeles » utilisé pour le broyage



a) Déchets de céramique (faïence)

b) Déchets de brique réfractaire

Figure 14 : Déchets au moment de broyages

3. Caractéristiques des matériaux

3.1 Essais physiques

3.1.1 Masse volumique (NF P18-301)

L'objectif de la masse volumique est de déterminer la masse volumique absolue et apparente des matériaux granulaires qui n'interagissent ni avec l'eau ni avec les roches. [16]

a. Masse volumique apparente (NF P94-064)

- **Définition :**

C'est le poids de la masse volumique d'un matériau, qui inclut les vides entre les particules ainsi que ceux à l'intérieur de celles-ci. Elle est calculée en divisant le poids de l'agrégat par le volume qu'il occupe. Le but de cette expérience est de déterminer la masse volumique apparente du sable, permettant d'évaluer ses propriétés physiques essentielles pour diverses applications dans le domaine de construction. [16]

- **Outils utilisés :**

- Balance électronique.
- récipient

**Figure 15** : Balance de précision et récipient.

▪ Méthodologie de réalisation de l'expérience :

- Placez le récipient sous l'entonnoir après avoir fermé son ouverture.
- Placez le tamis au-dessus de l'entonnoir.
- Ajoutez des quantités successives de sable sur le tamis conçu pour mesurer la masse volumique apparente.
- Ouvrez la vanne inférieure de l'entonnoir pour permettre au sable de s'écouler progressivement. Répétez l'opération jusqu'à ce que le sable forme un cône au sommet du récipient.
- À l'aide d'une règle spéciale, enlevez l'excès de sable sans comprimer le contenu du récipient, afin d'éviter tout compactage. Cela doit se faire au niveau du bord supérieur du récipient.
- Répétez l'expérience plusieurs fois pour obtenir une valeur moyenne (dans le but de trouver une estimation précise). [16]

b. Masse Volumique Absolue :**▪ Définition :**

Est définie comme la masse par unité de volume d'un matériau constituant l'agrégat, sans prendre en compte les espaces qui pourraient exister dans ou entre les grains. [16]

▪ Outils utilisés :

- Balance électronique.
- Éprouvette graduée



Figure 16 : Balance de précision et éprouvette graduée

- **Méthodologie de réalisation de l'expérience :**
- Remplir l'éprouvette graduée avec un volume d'eau V1 (comme illustré dans la figure).
- Peser la masse de l'agrégat M, puis l'introduire dans un tube à essai tout en éliminant les bulles d'air en tapotant doucement le tube à essai contre la paume de la main.
- Lire le nouveau volume obtenu dans le tube à essai, V2, et s'assurer que la lecture du volume est effectuée au niveau inférieur du ménisque de l'eau. [16]

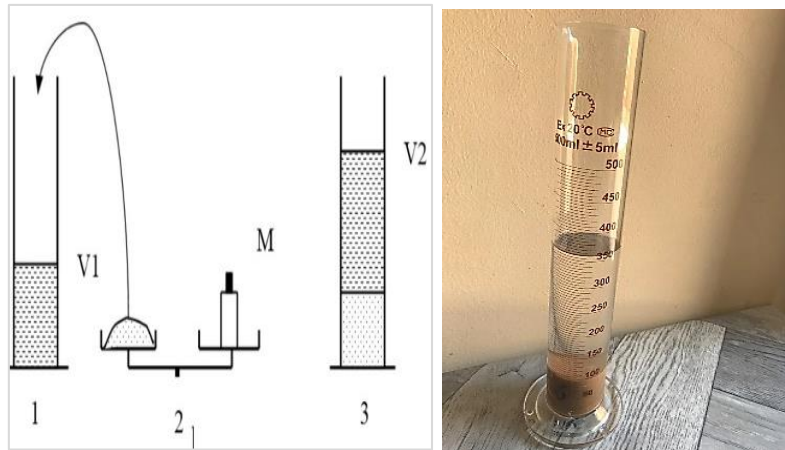


Figure 17 : Mesure de la masse volumique absolue

Résultats des expériences :

1. Masse Volumique apparente :

C'est le rapport entre la masse totale de l'échantillon sur le volume apparent et est donné par la relation :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{g/cm}^3$$

Données : $V = 1000\text{cm}^3$ $m_S = 1528.4 \text{ g}$
 $m_{CF} = 1099.2\text{g}$ $m_{BR} = 1353.8\text{g}$ $m_C = 1003 \text{ g}$

2. Masse Volumique Absolue :

C'est le rapport entre le poids des grains solides sur la taille des grains solides et est donné par la relation :

$$d = \frac{\text{Masse de l'échantillon solide}}{\text{Volume absolu de l'échantillon}}$$

Données :

$m_S = 150\text{g}$ $V_0 = 300 \text{ ml}$ $V_1 = 359 \text{ ml}$ $V_1 - V_0 = 59 \text{ ml}$
 $m_{CF} = 100\text{g}$ $V_0 = 200 \text{ ml}$ $V_1 = 244 \text{ ml}$ $V_1 - V_0 = 44 \text{ ml}$

$$\begin{array}{llll}
 m_{BR} = 100 \text{ g} & V_0 = 200 \text{ ml} & V_1 = 243 \text{ ml} & V_1 - V_0 = 43 \text{ ml} \\
 m_C = 150 \text{ g} & V_0 = 300 \text{ ml} & V_1 = 349 \text{ ml} & V_1 - V_0 = 49 \text{ ml}
 \end{array}$$

Résultats :

Le tableau suivant présente les résultats de la masse volumique obtenus pour tous les échantillons :

Tableau 6 : Résultats de la masse volumique

Masse Volumique (g/cm ³)		
	Absolue	Apparente
Sable	2.54	1.528
Céramique (faïence)	2.27	1.099
Brique réfractaire	2.32	1.353
Ciment	3.06	1.003

Commentaire :

Le tableau montre que la masse volumique apparente du sable est de 1.528 g/cm³ donc elle est la plus élevée de tous les matériaux (granulats) testés, la même chose pour la masse volumique absolue qui est de 2.54 g/cm³, ce qui indique qu'il possède de bonnes propriétés de liaison et des vides entre les particules, ce qui le rend approprié en tant qu'agrégat dans les mélanges. Les masses volumiques absolues de la céramique et des briques réfractaires sont très proches et qui sont successivement de 2.27 g/cm³ et 2.32 g/cm³, cependant la masse volumique apparente des briques réfractaires est plus élevée que celle de la céramique, ce qui indique l'influence de l'état de broyage. Enfin, le ciment a une masse volumique absolue de 3.06 g/cm³, un résultat très raisonnable pour un ciment, la même chose pour la masse apparente qui est de 1,003 g/cm³, qui est aussi dans la fourchette d'un ciment similaire.

3.1.2 Analyse granulométrique (NF P18-560)▪ **Définition :**

Le test d'analyse granulométrique consiste à séparer les différentes tailles des grains d'agrégats, autrement dit à effectuer une distribution des dimensions des particules des agrégats. Cela se fait par tamisage à l'aide d'une série de tamis disposés en ordre décroissant selon la taille de leurs ouvertures, avec le tamis de plus grande dimension placé en haut.

On trace ensuite une courbe granulométrique, qui représente les proportions cumulées en poids des particules passant à travers les tamis successifs. L'objectif de l'expérience est de déterminer la gradation des grains de sable. [16]



Figure 18 : Série des tamis des analyses granulométriques

▪ **Procédé de travail :**

On prépare un échantillon de sable pesant 1000 g, puis on le fait passer à travers une série successive de tamis, allant du plus grossier au plus fin. Après l'avoir secoué manuellement, on détermine la masse du sable restante sur chaque tamis et on calcule le pourcentage de chaque fraction en divisant cette masse sur masse totale de l'échantillon. Ensuite, on calcule la proportion cumulative du sable restante sur les tamis et on enregistre les résultats obtenus. [16]

3.1.3 Analyse sédimentométrique : NFP 94-056

Cet essai est réalisé sur les particules fines de taille inférieure à 80 micromètres, l'analyse de ces particules est faite par le principe de sédimentation selon la norme NF P 94-056.[18]

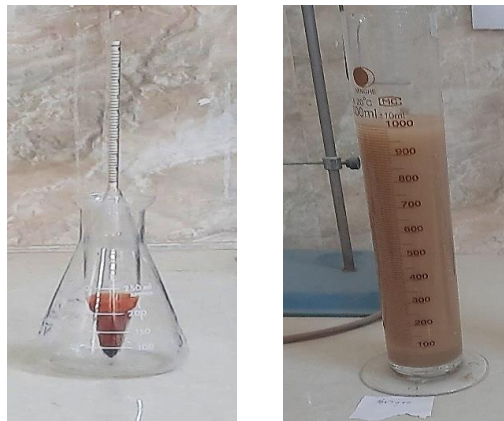


Figure 19 : Analyse sédimentométrique des particules fines des déchets

Tableau 7 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune

Tamis (mm)	Masse du matériau partielle en (g)	Masse du matériau cumulée en (g)	Refus cumulés en (%)	Passant cumulé en (%)
5	0	0	0	100.00
2.5	0	0	0	100.00
1.25	12	12	1.2	98.80
0.63	45.8	73.3	7.33	92.67
0.315	88.3	161.6	16.16	83.84
0.16	710.8	872.4	87.24	12.76
0.08	118.3	990.7	99.07	0.93

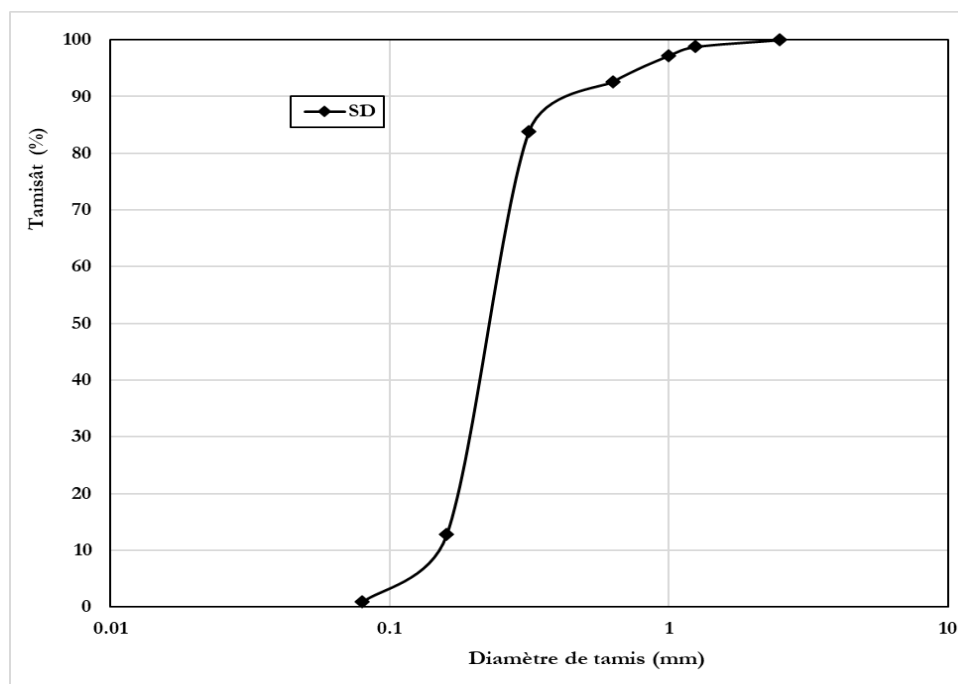


Figure 20 : Courbe des résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune

Tableau 8 : Analyse granulométrique des déchets de brique réfractaire

Tamis (mm)	Masse du matériau partielle en (g)	Masse du matériau cumulée en (g)	Refus cumulés en (%)	Passant cumulé en (%)
5	0	0	0	100
2.5	0	0	0	100
1.25	0	0	0	100
1.00	12	12	2.4	97.6
0.63	58	70	14	86
0.315	123	193	38.6	61.4
0.16	148	341	68.2	31.8
0.08	35	376	75.2	24.8

Tableau 9 : Analyse granulométrique des déchets de céramiques faïence

Tamis (mm)	Masse du matériau partielle en (g)	Masse du matériau cumulée en (g)	Refus cumulés en (%)	Passant cumulé en (%)
5	0	0	0	100
2.5	0	0	0	100
1.25	0	0	0	100
1.00	46	46	9.2	90.8
0.63	75	121	24.2	75.8
0.315	68	189	37.8	62.2
0.16	51	240	48	52
0.08	22	262	52.4	47.6

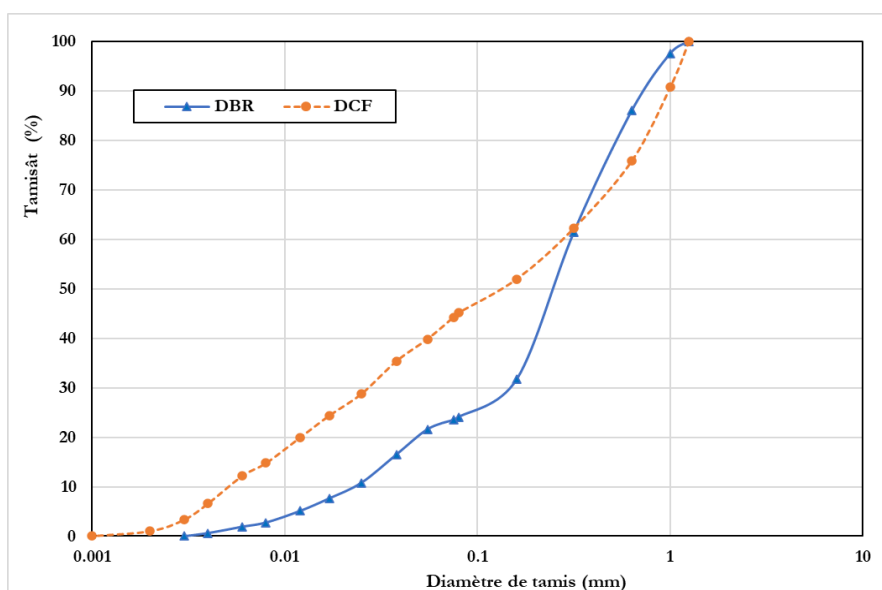


Figure 21 : Courbes granulométriques de déchets de brique réfractaire (DBR) et déchets de céramique faïence (DCF)

- **Commentaire sur les résultats :**

Les résultats montrent une nette différence dans la distribution de la taille des particules entre les déchets de céramique de faïence et les déchets de brique réfractaire. On constate que la céramique de faïence contient une plus grande proportion de particules fines qui est d'un taux de 47.2% en comparaison avec la brique réfractaire qui conserve un taux de fines légèrement modéré de 24.8%. Cette différence de distribution peut être attribuée au degré de dureté de chaque type de déchets.

- **Analyse des courbes :**

La courbe des briques réfractaires est initialement plus raide, ce qui indique une proportion élevée de petites particules passant rapidement à travers les tamis. En revanche, la courbe de la céramique se caractérise par une augmentation progressive, ce qui indique une distribution plus uniforme des grosses particules, ces différences peuvent influencer sur l'utilisation des matériaux dans le recyclage.

- **Module de finesse :**

On entend par le coefficient qui donne une description générale de la taille moyenne de granulat. C'est donc le pourcentage de la somme de refus pour les tamis [0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5], il est donné par la relation suivante [16] :

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \%}$$

- **Résultats :**

Le tableau suivant présente les résultats du module de finesse :

Tableau 10 : Résultats du module de finesse

Module de finesse	
Sable	1.12
Brique réfractaire	1.21
Céramique (faïence)	1.10

- **Commentaire :**

Ce module reflète le degré de finesse des particules des différents matériaux ainsi que l'effet qu'il a sur leur utilisation. Le sable de dune présente une finesse propre, avec une valeur de 1.12, ce qui indique un sable très fin. Les valeurs obtenues pour les deux déchets ne sont pas très significatives, car elles dépendent directement du processus de broyage. Elles sont donc variables en fonction du degré de broyage des déchets.

3.1.4 Équivalent de Sable (NF P18 598)

- **Définition :**

L'essai de mesure de l'équivalent de sable a été mis en œuvre aux États-Unis en 1950 par le scientifique "Hveem" afin d'étudier les propriétés des sols. Cette méthode, largement utilisée dans les laboratoires routiers, vise à déterminer le pourcentage d'impuretés, notamment les matériaux argileux, limoneux ou les éléments très fins présents dans le sable et le gravier utilisés dans le béton.

Les éléments argileux et très fins se séparent des grains de sable et flottent à la surface du liquide utilisé pour laver le sable. Pour calculer la valeur de l'équivalent de sable, nous utilisons la relation suivante [16]:

$$\text{Visuel} \quad \text{ESv} = \frac{h'2}{h1} \times 100$$

$$\text{Au piston} \quad \text{ES} = \frac{h2}{h1} \times 100$$

- **Outils utilisés :**

- Entonnoir
- Chronomètre
- Vibreur mécanique
- Règle
- Tige mécanique



Figure 22 : Outils utilisés dans l'essai de l'équivalent de sable.

▪ **Méthodologie de réalisation de l'essai :**

- Nous passons un échantillon de sable à travers le tamis de 5 mm et le divisons en trois quantités. Dans chaque boîte métallique, une quantité de g120 est placée, que nous séchons dans l'étuve à une température de 105°C jusqu'à obtenir un poids constant.
- Remplir les trois éprouvettes graduées, ayant un diamètre intérieur de 3.2 cm et une hauteur de 43 cm, avec une solution lavante jusqu'à une hauteur de 10 cm, puis procéder à l'ajout de sable.
- On laisse le tube fermé avec un bouchon pendant 10 minutes, puis on le place sur le vibreur mécanique et on effectue 90 cycles en 30 secondes. Après cette étape, un tube en cuivre est introduit, permettant au liquide de passer dans le tube dédié, tout en lavant les parois du tube jusqu'au fond. En inclinant et en tournant le tube, on le soulève lorsque le niveau du contenu atteint 38 cm, puis on laisse le mélange reposer pendant 20 minutes comme illustré dans l'image.
- Après le temps de décantation, on lit et on enregistre le niveau supérieur du mélange argileux, ce qui représente la lecture de l'argile ou de la boue. Quant à la lecture du sable, on insère la tige métallique dont l'extrémité inférieure est un cône d'appui reposant sur la couche de sable, et dont l'extrémité supérieure est un cylindre de poids

standard. Entre les deux, il y a un anneau de mesure. On enregistre les résultats en prenant la valeur moyenne. [16]

Résultats :

Le tableau suivant présente les résultats de l'équivalent de sable :

Tableau 11 : Résultats de L'équivalent de sable

Equivalent de sable (%)		
	ES _v	ES
Sable de dune	98.9	95.3
Brique réfractaire	80.2	70.9
Céramique (faïence)	40.0	35.8

▪ **Commentaire :**

- Le sable de dune : Les deux valeurs enregistrées, que ce soit par observation visuelle ou par le test au piston, sont respectivement de 98.9 % et 95.3 %. Elles indiquent que le sable analysé est très propre.
- La brique réfractaire : Elle a également donné des résultats très proches de ceux du sable de dune, ce qui montre que les fines issues de ces déchets sont très propres.
- La céramique (faïence) : Elle présente des valeurs modérées, ce qui s'explique par la nature même de ce matériau ainsi que par l'influence d'un taux de fines relativement élevé qu'il contient.

4. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

▪ **Définition**

La diffraction des rayons X (DRX) constitue une méthode d'analyse importante pour la caractérisation des matériaux. Reconnue pour sa capacité à explorer les phases cristallines, la DRX se déploie largement dans l'étude de structures cristallines, qu'elles soient microscopiques ou sur une échelle macroscopique. Sa précision permet non seulement de détecter les différentes phases présentes mais aussi de déterminer les structures avec une exactitude remarquable [19]

▪ **Principe de la diffraction des rayons X**

Le principe de la diffraction des rayons X repose sur l'interaction des rayons X avec la matière. Lorsque les rayons X traversent un matériau, ils rencontrent les plans atomiques et sont diffractés de manière spécifique. Ce phénomène est décrit par la loi de Bragg, qui permet de

relier l'angle de diffraction aux distances interatomiques. Grâce à cette relation, il est possible de déduire des informations précieuses sur la structure cristalline des matériaux. [19]

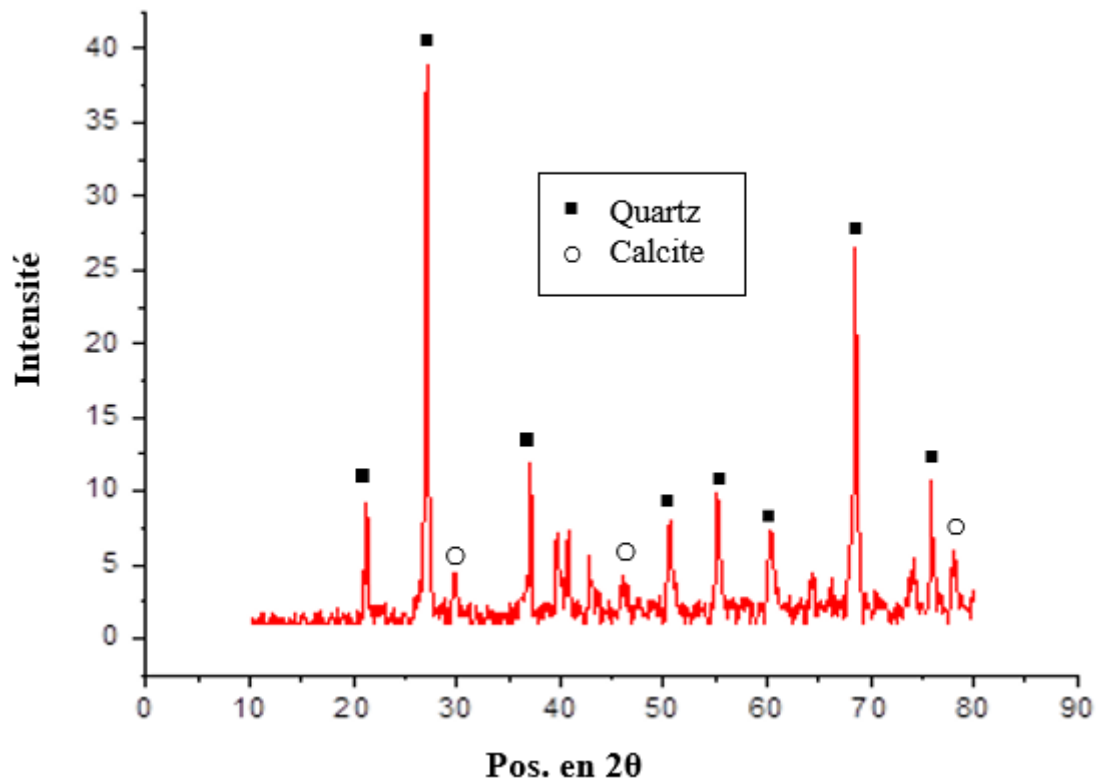


Figure 23 : Diffractogramme de sable de dune utilisé

▪ Commentaire

Le diffractogramme de rayons X du sable analysé révèle une forte dominance du quartz, comme en témoignent les pics d'intensité élevée situés aux angles caractéristiques (notamment autour de $26.6^\circ/2\theta$). Cette forte intensité confirme que le quartz est le constituant minéralogique principal du sable de dune analysé.

En parallèle, on observe également la présence de faibles pics correspondant à la calcite, situés notamment vers $29.4^\circ/2\theta$, ce qui suggère une teneur modérée en carbonate de calcium. L'intensité relativement faible de ces pics indique que la calcite est présente en quantité mineure par rapport au quartz.

5. Formulation des mortiers à élaborer : Selon la norme (NF EN 196-1)

Le rapport E/C : Ce rapport a été fixé après plusieurs essais expérimentaux, qui sont réalisés dans le but de choisir le meilleur rapport, dans ce cadre on essayer trois fourchettes pour le rapport E/C qui sont : 0.6 , 0.65 et 0.7, avec des taux d'incorporation de 10 à 30%, les meilleures maniabilités encristées sont au profit du rapport E/C= 0.65, particulièrement pour un taux d'incorporation de 20% qui concerne les déchets de céramique qui donne une valeur de 14.5 cm, signifiant une maniabilité idéale pour le mortier

Dans cette étude, nous allons incorporer ces déchets dans le sable de dune à des proportions de 10 %, 20 % et 30 % en poids du sable.

Chaque déchet a été incorporer indépendamment, donc on a un mortier témoin (MT), et trois types de mortier pour chaque déchet :

- Mortier avec déchet de céramique faïence : MT – MCF10 – MCF20 – MCF30
- Mortier avec déchet de brique réfractaire : MT – MBR10 – MBR20 – MBR30

1. Procédé de mélange :**Phase de mélange et de coulage :**

- Les ingrédients (sable, ciment, eau et additifs) sont pesés selon le dosage défini.

Le mélange est effectué à l'aide d'un malaxeur [20]

Ordre d'incorporation :

1. Mélanger le sable avec l'un des déchets jusqu'à obtenir une homogénéité complète.
2. Mélanger le ciment avec l'eau.
3. Ajouter progressivement le sable préalablement mélangé aux déchets dans le mélange eau-ciment.

Pendant le mélange, la vitesse du malaxeur est réglée à un niveau moyen afin de garantir un mélange efficace du ciment et de l'eau. Les particules fines sont incorporées progressivement tout en maintenant une agitation constante jusqu'à atteindre l'homogénéité du mortier. Cette opération est suivie d'une pause de 1,5 minute, puis le malaxeur est réactivé à une vitesse plus élevée pendant 4 minutes. [20]



Figure 24 : Appareil de malaxage

6. Essais sur mortier à l'état frais

6.1 La masse volumique apparente du mortier

- **Objectif :**

L'expérience vise à mesurer la masse volumique apparente du mortier frais, laquelle reflète la masse du matériau en intégrant les vides d'air. Cette propriété physique constitue un paramètre fondamental pour caractériser les propriétés du mortier frais et son influence sur le béton durci. La masse volumique apparente dépend des composants du mortier ainsi que du degré de compactage, le compactage contribuant à réduire les vides d'air et à améliorer l'homogénéité et la densité.[16]

- **Matériel et équipements requis :**

- Un récipient de volume connu avec une haute précision (litres ou en cm^3).
- Un échantillon de mortier frais.
- Une balance numérique de haute précision (pour mesurer la masse en grammes ou en kilogrammes).
- Une règle métallique à bord droit pour lisser la surface du mortier.

- **Procédure expérimentale :**

- Vérifier que le récipient de volume connu est propre et sec.
- Remplir le récipient avec une quantité de mortier frais équivalente à environ la moitié de son volume.

- Compactez manuellement le mortier en frappant légèrement l'ensemble du récipient contre une surface plane, pour 10 coups consécutifs, afin de réduire les vides d'air présents dans la partie inférieure de l'échantillon.
- Ajouter progressivement davantage de mortier jusqu'à ce que le récipient soit entièrement rempli avec un léger surplus dépassant le bord.
- Procéder à un deuxième compactage en répétant 10 coups supplémentaires de la même manière pour éliminer le maximum de bulles d'air et assurer une homogénéité maximale tout en réduisant les grands vides.
- À l'aide de la règle métallique, niveler soigneusement la surface du mortier afin qu'elle soit parfaitement alignée avec le rebord du récipient. Veiller à retirer délicatement l'excédent de mortier pour que le volume contenu corresponde exactement au volume connu.
- Placer le récipient rempli de mortier sur la balance de précision et enregistrer la masse totale.

- **Calcul :**

- La masse du mortier (M_{mortier}) est déterminée par la formule :

$$M_{\text{mortier}} = M_{\text{total}} - V_{\text{vide}}$$

6.2 Temps de prise : (NF P15-431)

Les essais de prise peuvent être effectués sur mortier. Lorsque l'essai a lieu sur mortier normal, il est gouverné par la norme NF P15-431. L'appareil utilisé est toujours l'Appareil de Vicat (figure 17). La procédure d'essai est la même que celle décrite pour la pâte de ciment. Le début de prise est défini comme le moment où l'aiguille cesse de s'enfoncer sous l'effet de ce chargement et s'arrête à une distance d du fond du moule de 4 mm.

Note : L'essai de détermination du temps de prise du mortier, avec ou sans adjuvants, est dirigé par la norme (EN 480-2). [21]



Figure 25. Appareil de vicat

▪ Définition de l'essai :

L'essai du temps de prise du mortier permet de mesurer la durée nécessaire avant que le processus de durcissement ne commence. Ce paramètre est essentiel pour comprendre les propriétés rhéologiques du mortier et les conditions optimales de mise en œuvre. Il est influencé par des facteurs tels que le rapport eau/ciment (E/C), la température ambiante, ainsi que les caractéristiques des additifs ou des matériaux utilisés. [22]

▪ Objectif de l'essai :

L'objectif principal de cet essai est de déterminer le moment où le mortier entame sa phase de durcissement. Cette propriété est essentielle pour garantir une mise en œuvre adéquate, prévenir d'éventuels défauts structurels et optimiser les temps d'application sur chantier. [22]

▪ Matériel et outils nécessaires :

- Appareil de Vicat : Instrument standard utilisé pour mesurer les temps de prise.
- Aiguilles de Vicat : Aiguilles graduées pour vérifier la consistance initiale et finale.
- Mélangeur
- Échantillon de mortier frais avec un rapport E/C défini.
- Chronomètre
- Thermomètre
- Récipient propre et sec pour contenir l'échantillon. [22]

▪ Étapes de l'essai :

- Peser et mélanger les composants (ciment, eau, et tout additif éventuel) selon le rapport défini.
- Homogénéiser le mélange à l'aide d'un mélangeur.
 - Verser le mortier frais dans le récipient adapté.
 - Placer l'appareil de Vicat et positionner l'aiguille de mesure à la surface du mortier.
 - Mesure du temps de prise initiale : Commencer l'essai immédiatement après le remplissage.
 - Régulièrement, abaisser doucement l'aiguille de Vicat sur la surface du mortier.
 - Noter le moment où l'aiguille ne pénètre plus complètement dans le mortier. Ce temps marque le début du durcissement.
 - Mesure du temps de prise finale : Continuer les essais à intervalles réguliers.
 - Enregistrer le moment où l'aiguille ne laisse plus d'impression visible à la surface du mortier.
 - Compiler les données obtenues.

- Comparer les temps mesurés avec les exigences des normes en vigueur (par exemple, EN 196- [22])

N.B. : Cet essai a été réalisé selon la norme applicable à la pâte de ciment. Cependant, dans notre cas, l'essai a été effectué sur un mortier à base de sable de dune corrigé par des déchets contenant des taux importants de fines. Nous nous intéressons donc à l'effet de ces fines sur le temps de prise.

6.3 Maniabilité

- **Table de secousse**

Objectif de l'expérience :

Cet essai vise à déterminer la consistance ou fluidité du mortier frais et à évaluer son aptitude à la mise en place ainsi que son étalement sous l'effet de la vibration. Autrement dit, il s'agit d'évaluer la facilité d'écoulement et d'expansion du mortier lorsqu'il est soumis à un compactage mécanique. Cette propriété est essentielle pour assurer un remplissage optimal des interstices autour des armatures et dans les coffrages, permettant ainsi d'obtenir un béton homogène et résistant. [23]

▪ **Matériel et équipements requis :**

- Table de secousse
- Cône tronqué : Moule métallique de forme conique tronquée aux dimensions standard (habituellement, une base inférieure de 20 cm de diamètre, une base supérieure de 10 cm de diamètre et une hauteur de 7 cm).
- Règle ou ruban pour mesurer le diamètre d'étalement du mortier.
- Pelle ou spatule pour remplir le moule de mortier.
- Tige métallique droite munie d'un embout arrondi, utilisée pour compacter le mortier à l'intérieur du moule.
- Échantillon du mortier fraîchement préparé. [23]

▪ **Procédure de l'essai :**

- S'assurer que la surface de la table d'affaissement est propre, sèche et plane.
- Placer le moule conique tronqué au centre de la table, la base inférieure devant être en contact complet avec la surface.
- Remplir le moule avec le mortier en deux couches à peu près égales.

- Après le dépôt de chaque couche, la compacter 15 fois à l'aide de la tige de compactage de manière régulière pour diffuser le mortier et éliminer les vides d'air. La vibration doit être uniformément répartie sur toute la surface de la couche.
- Une fois la dernière couche compactée, lisser la surface du mortier avec la pelle ou la spatule afin qu'elle soit au même niveau que le bord supérieur du moule.
- Après le remplissage, le compactage et le lissage du mortier, retirer le moule verticalement et de manière régulière, sans induire de vibrations ou de mouvements latéraux.
- le moule est levée et relâchée (généralement 15 fois) pendant une durée déterminée, provoquant ainsi l'étalement du mortier sur la surface de la table.
- Lorsque le nombre de relâchements est terminé, mesurer le diamètre d'étalement du mortier dans deux directions perpendiculaires à l'aide d'une règle ou d'un ruban métrique. La moyenne des deux mesures est considérée comme la valeur finale de l'étalement. [23]



Figure 26. Table à secousse

▪ **Remplissage dans les coffrages :**

- Le mortier est coulé en deux couches, chaque couche étant vibrée 60 fois afin de réduire les vides.
- Les coffrages utilisés présentent des dimensions précises : $40 \times 40 \times 160$ mm.



Figure 27 : Moule prismatique de mortier (40 × 40 × 160 mm)

▪ **Cure et traitement :**

Les échantillons sont laissés à l'air libre pendant 24 heures afin de durcir dans leurs coffrages, puis immergés dans l'eau à la température ambiante.

Les échantillons sont conservés pendant 28 jours.



Figure 28. Échantillons conservés dans l'eau

7. Essais sur mortier à l'état durci :

Après la conservation des moules dans l'eau pendant vingt-huit jours pour assurer un durcissement complet, on a placé les échantillons à température ambiante à 25°C pendant une période déterminée, puis on l'exposé à des températures variables dans le four. On a commencé à 200 °C, puis on a progressivement augmenté la température à 400 °C, et 600 °C et enfin à 800°C, chaque étape durant deux heures. Ce processus vise à étudier l'effet de la chaleur sur les propriétés du matériau et à déterminer sa capacité aux différents changements thermiques.

- **Outils utilisés :**
- Etuve et four de haute température



Figure 29. Moyens utilisés en haute température

7. 1 Propriétés thermophysiques

7.1.1 La masse volumique

La masse volumique du mortier à l'état durci est mesurée à partir de la masse de l'éprouvette rapportée à son volume après 28 jours de durcissement selon la norme NF EN 12390-7 [NF EN 12390-7, 2011], Les essais de la masse volumique ont été effectués sur des éprouvettes (4×4×16) cm. [24]

Outils utilisés :

- Balance électronique.
- Pied à coulisse



Figure 30 . Balance électronique et pied à coulisse

7.1.2 Absorption d'eau par immersion totale

L'absorption par immersion a été effectuée, en séchant les éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm du mortier à l'étuve jusqu'à masse constante, ensuite en les immergeant totalement dans l'eau pendant 24h à 20C, elle est définie par la formule suivante [24]:

$$A_B = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \cdot 100\%$$

M2: masse d'éprouvette saturée d'eau (g)

M1 : masse sèche de l'éprouvette (g)

7.1.3 Contrôle par ultrasons

C'est un essai non destructif très important qui permet d'évaluer plusieurs caractéristiques du béton durci telles que : le degré de compacité, de fissuration, l'uniformité de coulage Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton. Les résultats obtenus et donc leur interprétation dépendent du type de procédé de mesure appliqué et notamment la position des transducteurs de l'appareil à ultrasons. [25]



Figure 31 . Appareil ultrasons.

7.2 Caractéristiques mécaniques

7.2.1 Essai de flexion

▪ **Définition :**

La détermination de la résistance à la flexion consiste à évaluer une mesure la résistance à la flexion. Ce paramètre, appelé critères de rupture en flexion. [16]

▪ **Les instruments et équipements utilisés dans l'essai :**

- Appareil de flexion.

- Moules rectangulaires parallèles de dimensions (160 mm × 40 mm × 40 mm).

Cette expérience est stipulée selon la norme (EN 196-1), et la figure 23 représente la machine de rupture par flexion, et la figure 24 explique le mécanisme de rupture des échantillons par flexion.



Figure 32. Appareil d'essai de flexion

▪ **Méthodologie de travail :**

L'essai de flexion est effectué sur des échantillons ayant une section rectangulaire (4 × 4 × 16 cm). Ce test est réalisé à l'aide d'une machine de flexion à trois points. La machine est équipée de deux supports cylindriques fixes en bas sur lesquels repose l'échantillon, ainsi que d'un support cylindrique supérieur mobile, actionné par le moteur de la machine pour appliquer la force sur l'échantillon. [16]

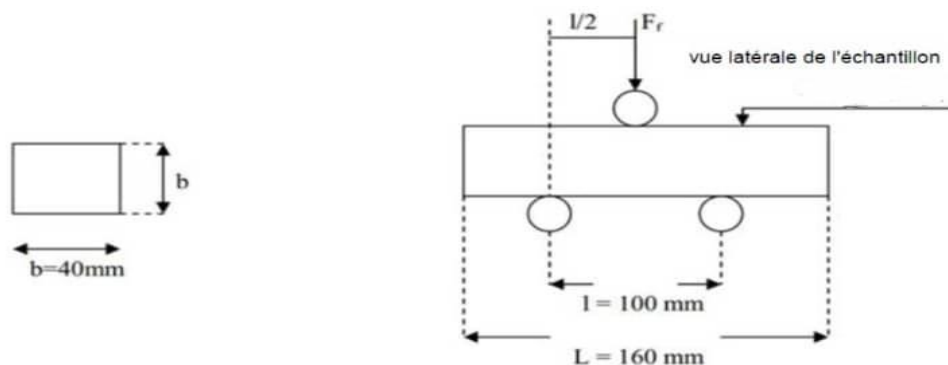


Figure 33. Schéma d'essai de rupture par flexion [16]

La résistance à la flexion est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$R_f = \frac{1.5 F_f L}{b^3}$$

Où : R_f : Résistance à la flexion (MPa)

F_f : Force de rupture de l'échantillon en flexion (N)

L : distance entre les appuis (mm)

b : arête de l'échantillon (mm)

7.2.2 Essai de compression

▪ Définition :

Le test de résistance à la compression est l'un des essais effectués sur le mortier, ayant pour objectif de déterminer la résistance. Il est généralement réalisé après 7, 28 ou 90 jours, et la résistance à la compression exprime la qualité du mortier.

Cet essai est prescrit selon la norme EN 196-1 et se réalise à l'aide d'une machine de compression des matériaux solides. Il est effectué sur la moitié de l'échantillon, cette moitié provenant de l'essai de rupture de l'échantillon par flexion d'une section aux dimensions (160 mm × 40 mm × 40 mm).



Figure 34. Appareil d'écrasement par compression

- **Méthodologie :**

L'échantillon est placé entre deux plaques métalliques rigides, ces dernières étant positionnées à 1 cm des bords latéraux, comme illustré dans la figure 26. [16]

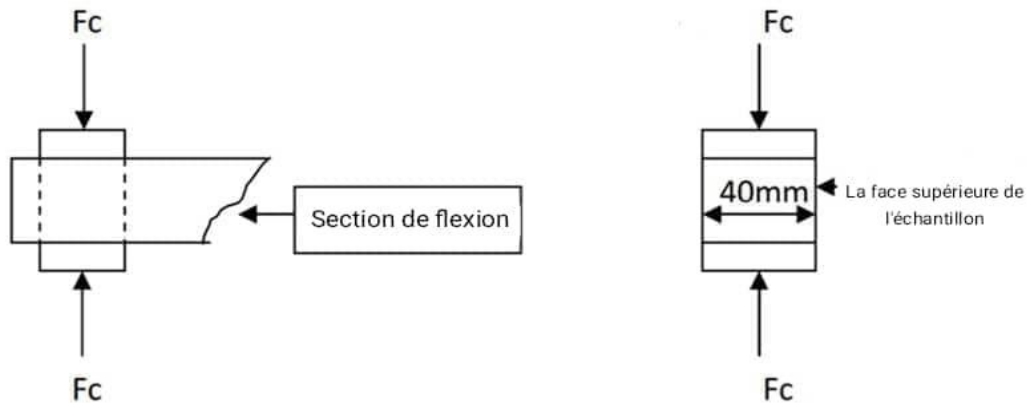


Figure 35 . Mécanisme de rupture par compression [16]

La résistance est calculée par la relation suivante :

$$R_C = \frac{\sigma_c}{b_2}$$

Où : **R_c**: Résistance à la compression Mpa

σ_c: Force de rupture de l'échantillon en compression (N)

b: Partie de l'échantillon (40 mm)

8. Conclusion

Cette partie expérimentale a porté sur les propriétés du sable de dune ainsi que sur des déchets tels que la céramique faïence et le brique réfractaire. Les résultats obtenus ont fourni des indications attirantes quant à leur intégration dans le mortier. L'analyse de ces matériaux a mis leur potentiel à améliorer plusieurs propriétés mécaniques et thermiques du mortier, faisant de ces ajouts une solution efficace pour le développement de matériaux de construction.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

I. Introduction

Ce chapitre présente, analyse et discute les résultats expérimentaux obtenus à partir d'essais physiques, mécaniques et thermiques réalisés sur des échantillons de mortier. Deux types de formulations ont été étudiés : des échantillons témoins élaborés avec du sable de dune, et des échantillons remplacés dans lesquels une partie du sable a été remplacée par des déchets, à savoir la céramique (faïence) et la brique réfractaire, à différents taux de remplacement. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de ces matériaux recyclés sur les propriétés du mortier. Les résultats présentés permettent d'apprécier les effets de la nature et de la proportion des ajouts sur le comportement global du matériau.

Les résultats présentés dans ce chapitre concernent les mortiers suivants :

- Mortier avec déchet de céramique faïence : M 0% – MCF 10% – MCF 20% – MCF 30%
- Mortier avec déchet de brique réfractaire : M 0% – MBR 10% – MBR 20% – MBR 30%

2. Résultats expérimentaux des mortiers à l'état frais

2.1 Maniabilité

Le tableau suivant présente les résultats de la maniabilité :

Tableau 12 : Maniabilité des mortiers à l'état frais

Maniabilité des mortiers à l'état frais (cm)			
M 0%	M 10%	MCF 20%	MCF 30%
14.45	14.13	13.50	13.20
M 0%	MBR 10%	MBR 20%	MBR 30%
14.45	15.15	14.25	13.80

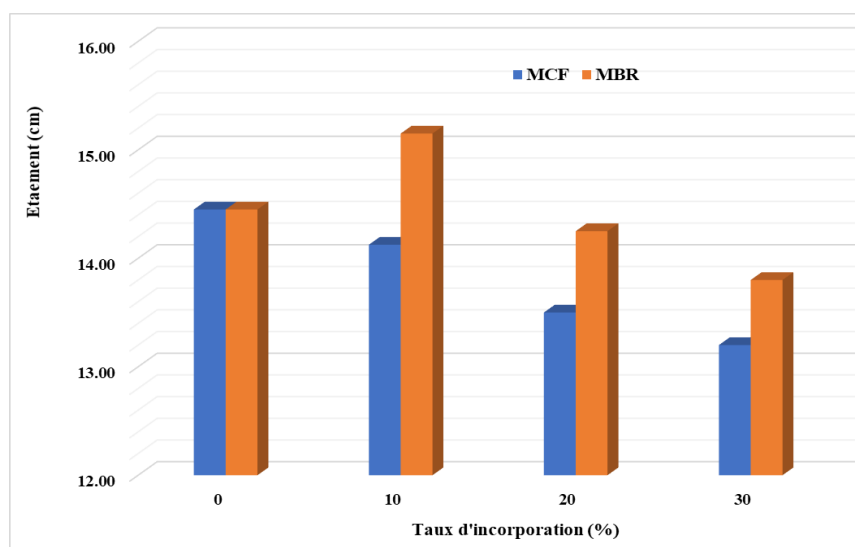


Figure 36 : Evolution de maniabilité des mortiers à l'état frais

Commentaire : Ces résultats peuvent être interprétés en fonction de la nature des déchets utilisés. La céramique de faïence, qui contient un pourcentage élevé de particules fines, a influencé directement la consistance du mortier. On a constaté que plus le taux de remplacement augmentait, plus la maniabilité diminuait. Ce phénomène s'est manifesté différemment avec les déchets de brique réfractaire, à un taux de 10 %, la maniabilité s'est améliorée, ce qui peut être attribué à la forme particulière des particules de ces déchets. Tandis que, aux taux de 20 % et 30 %, une diminution de la maniabilité a été observée, principalement en raison de l'augmentation de la quantité de fines, qui entraîne une consommation d'eau plus importante.

2.2 La masse volumique apparente

Les résultats de cette caractéristique physique sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 13. Résultats de la masse volumique apparente des mortiers frais

Masse volumique apparente (g/cm ³)			
M 0%	MCF10%	MCF 20%	MCF 30%
2.014	2.045	2.069	2.076
M 0%	MBR 10%	MBR 20%	MBR 30%
2.014	2.051	2.023	2.006

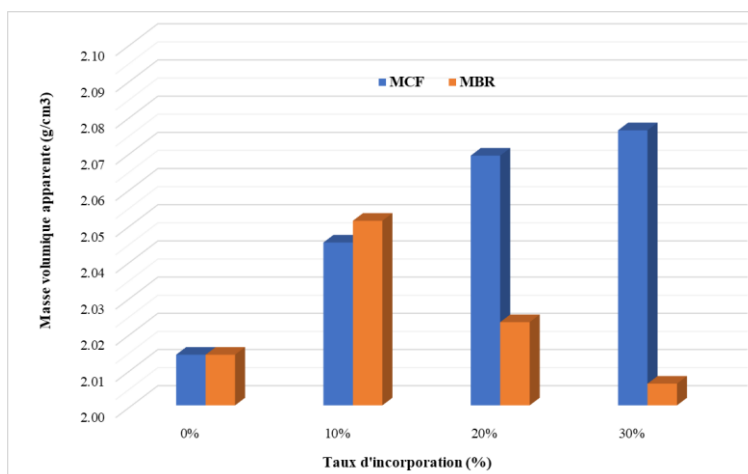


Figure 37 : Evolution de la masse volumique apparente des mortiers à l'état frais

Commentaire : Pour les mortiers de déchets de céramique de faïence : La masse volumique apparente augmente progressivement avec le taux de remplacement, ce qui peut traduire une meilleure compacité du mortier. Cette évolution suggère une amélioration de l'adhérence entre les constituants ou une réduction des vides.

Pour les mortiers de déchets de Brique réfractaire : La masse volumique apparente présente des variations légères et irrégulières selon le taux exploité. Une augmentation est observée à 10 %, suivie d'une légère diminution à un taux de 20 % puis une chute à 30 %. Ces fluctuations peuvent être attribuées à la composition granulaire des déchets de brique réfractaire, qui influence la compacité du mélange de manière non linéaire.

2.3 Temps de prise

Dans un premier temps, nous allons présenter le temps de début de prise, tel qu'illustré par la figure 3. Pour le mortier témoin M 0% et les mortiers remplacés par 20% des deux types de déchets, céramique et brique réfractaire.

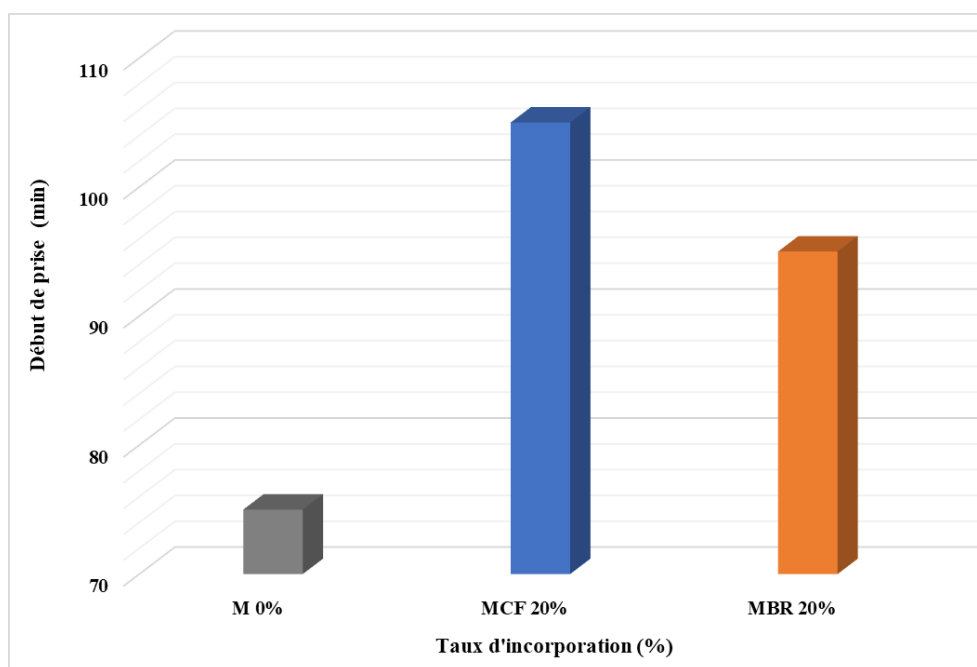


Figure 38 : Evolution du temps de début de prise selon le type de déchets

Dans la figure 4, nous présentons l'évolution du temps de fin de prise pour les mêmes types de mortiers. Cette figure permet d'analyser l'influence des différents types de déchets conçus sur le comportement de durcissement des mortiers, en particulier les variations du temps nécessaire pour atteindre la fin de la prise.

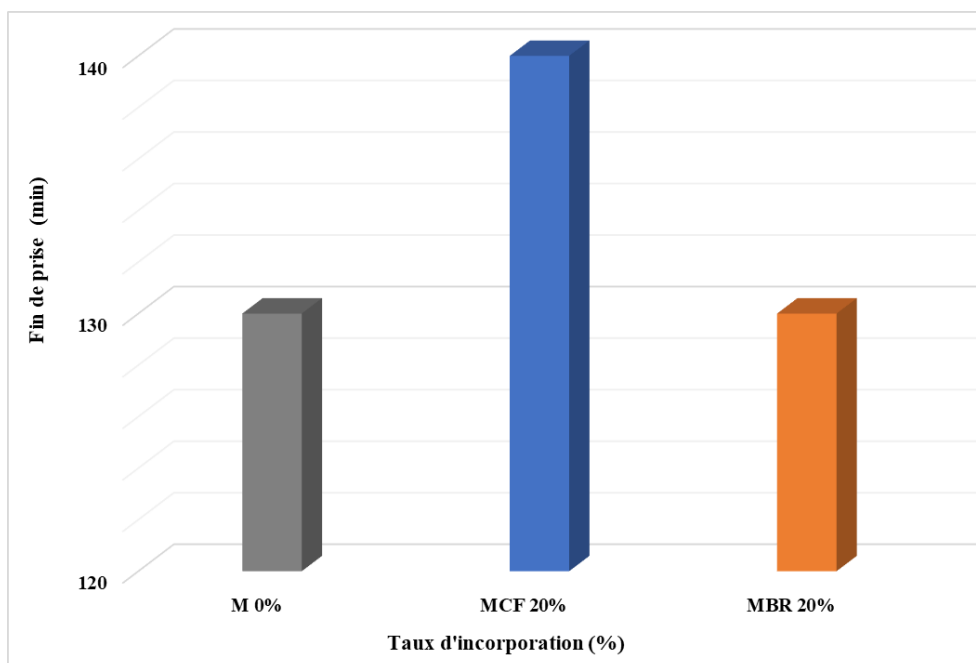


Figure 39 : Evolution du temps de fin de prise selon le type de déchets

Commentaire : Malgré que cet essai soit normalement réalisé sur une pâte de ciment pure, nous avons tenté d'estimer l'effet des déchets incorporés, qui présentent des teneurs relativement élevées en fines, en particulier la céramique de faïence. Les résultats présentés dans les figures 3 et 4 suivent une aptitude globalement homogène ; on observe que le mortier MCF 20% affiche le temps de début de prise le plus long. Cela pourrait s'expliquer par la composition du matériau, qui entraîne une absorption d'eau plus importante, ralentissant ainsi le processus de durcissement. Par contre, le mortier MBR 20% présente un comportement très proche de celui de l'échantillon témoin, notamment en ce qui concerne la fin de la prise, ce qui met en évidence la nature granulaire de ces déchets et leur influence modérée sur le comportement du mélange.

3. Résultats expérimentaux à l'état durci à la température ambiante (25 °C)

3.1 Résultats d'absorption d'eau

Les résultats relatifs à l'absorption d'eau sont présentés dans la figure 5. Cette figure va permettre de montrer l'effet des différents types de remplacement sur la porosité des mortiers, à travers la variation de leur capacité à absorber l'eau. Elle permet ainsi d'évaluer l'impact des déchets incorporés sur la compacité et la structure interne des mortiers.

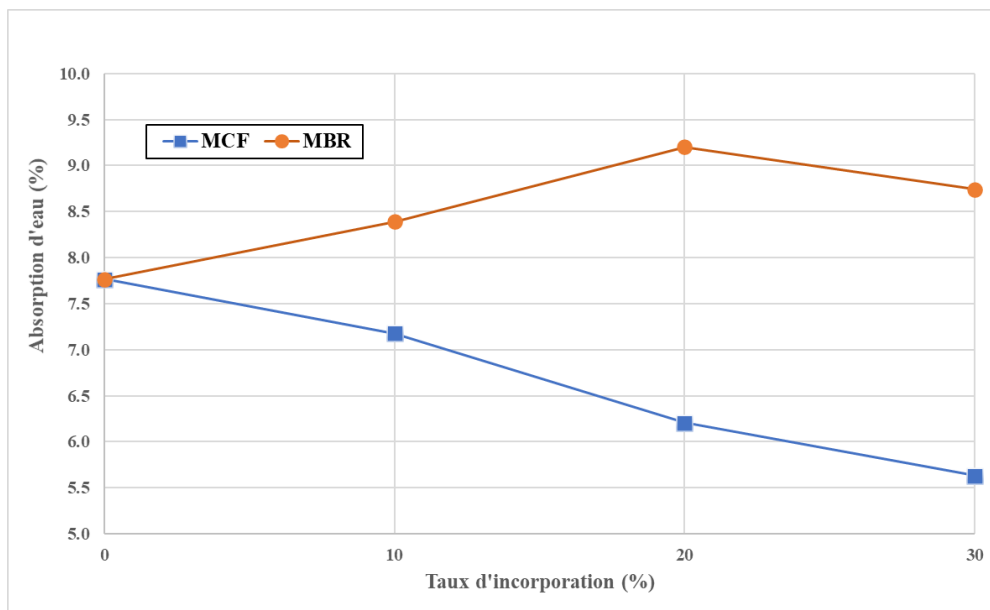


Figure 40 : Evolution de l’absorption d’eau des mortiers à l’état durci

Commentaire : D’après la figure 5, on observe que pour le MCF, l’absorption diminue à mesure que le taux de remplacement par des déchets de céramique augmente. Cette diminution est attribuée à une meilleure compaction de la structure des mortiers, les déchets de céramique contribuant à la fermeture des vides. Pour les mortiers contenant des déchets de brique réfractaire, dont le degré de broyabilité est plus faible, l’absorption augmente pour le MBR 10% et le MBR 20% et, ce qui traduit une augmentation du volume de vides dans ces mortiers.

3.2 Résultats de la masse volumique apparente des mortiers durcis :

La masse volumique apparente constitue un indicateur essentiel pour évaluer la compacité et la densité des mortiers après durcissement, dans ce cadre la figure 6, présente les évolutions des différents mortiers à l’état durci.



Figure 41 : Eprouvette soumises à la mesure de la masse volumique apparente

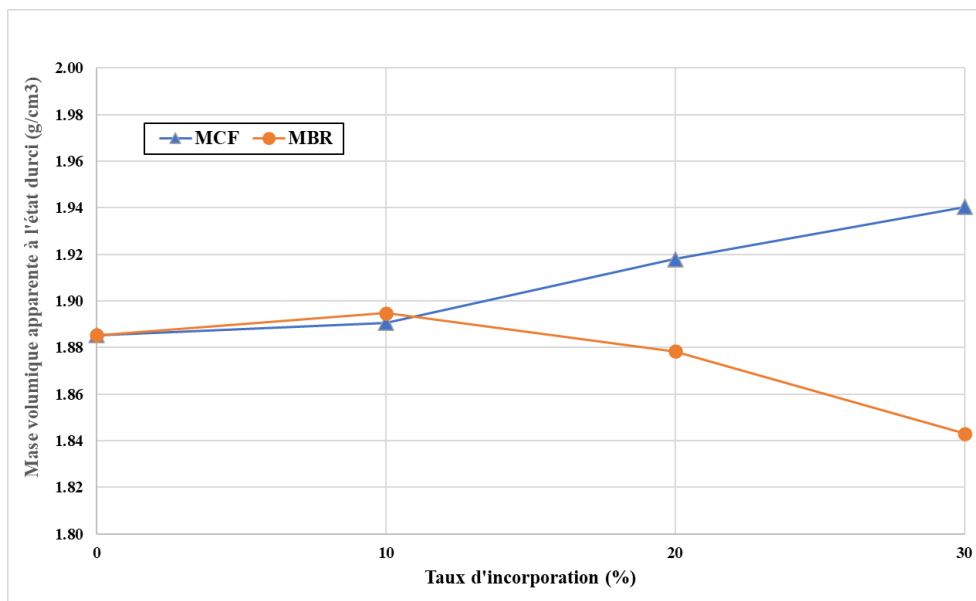


Figure 42 : Evolution de la masse volumique apparente des mortiers à l'état durci

Commentaire : D'après la figure 7, on constate que pour les mortiers élaborés avec les déchets de céramiques (MCF), la masse volumique apparente augmente progressivement avec le taux de substitution, atteignant presque le seuil de 1.94 g/cm^3 pour un taux de 30 % de déchets, ce qui représente une augmentation d'environ 3.2 % par rapport au mortier témoin. Cette hausse peut être attribuée à la densification des particules de céramique fine ainsi qu'à leur meilleure compacité dans la matrice du mortier.

Tandis que pour les mortiers formulés avec des déchets de briques réfractaires (MBR), un effet inverse est observé. La masse volumique apparente diminue au fur et à mesure que le taux de substitution augmente, comme le montre également la figure 7. Cette tendance se traduit par une baisse significative atteignant une masse volumique de 1.84 g/cm^3 pour le mortier MBR 30%. Cette diminution peut être liée à la distribution granulaire de la partie fine des déchets de brique réfractaire, qui réduit la densité globale du mortier.

3.3 Résultats de l'UPV sur mortiers durcis

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes ayant subi une conservation de 28 jours dans l'eau, conformément aux normes en vigueur. Toutes les formulations de mortier préparées ont été soumises à cet essai afin d'évaluer leur comportement dans des conditions normalisées. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 8, qui permet de comparer les performances des différentes compositions.

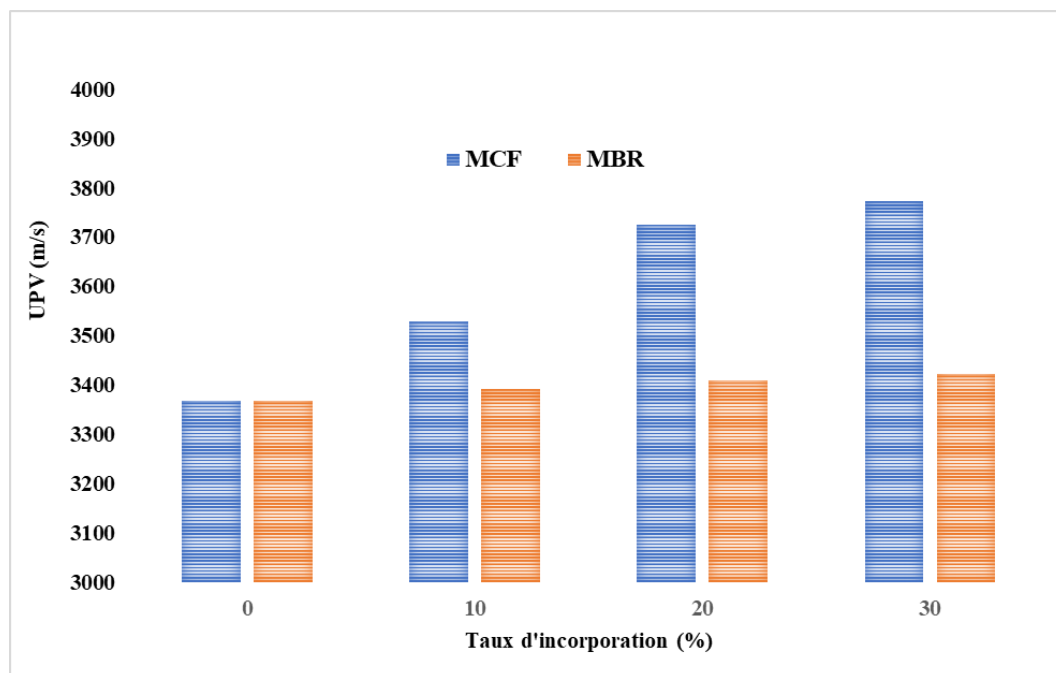


Figure 43 : Evolution l'UPV des mortiers à l'état durci

Commentaire : Selon les résultats obtenus, il a été constaté que les mortiers élaborés à partir de déchets de céramique faïence présentent des performances remarquablement encourageantes. En comparaison avec le mortier témoin, ces formulations ont enregistré des vitesses d'ultrasons comprises entre 3500 m/s et 3800 m/s, traduisant, selon les classifications normatives, une matrice de bonne qualité. En revanche, les mortiers contenant des déchets de briques réfractaires ont montré une légère amélioration, avec des résultats situés dans la fourchette d'un matériau de moyen qualité.

3.4 Résultats de la résistance à la flexion

Réalisé sur des éprouvettes conservées pendant 28 jours dans l'eau, conformément aux exigences des normes en vigueur. L'ensemble des formulations de mortier préparées a été soumis à cet essai dans le but d'évaluer leur résistance mécanique en conditions normalisées. Les résultats obtenus, présentés dans la figure 9, permettent de comparer les résistances de flexion des différentes compositions.



Figure 44. Ecrasement des éprouvettes à la flexion

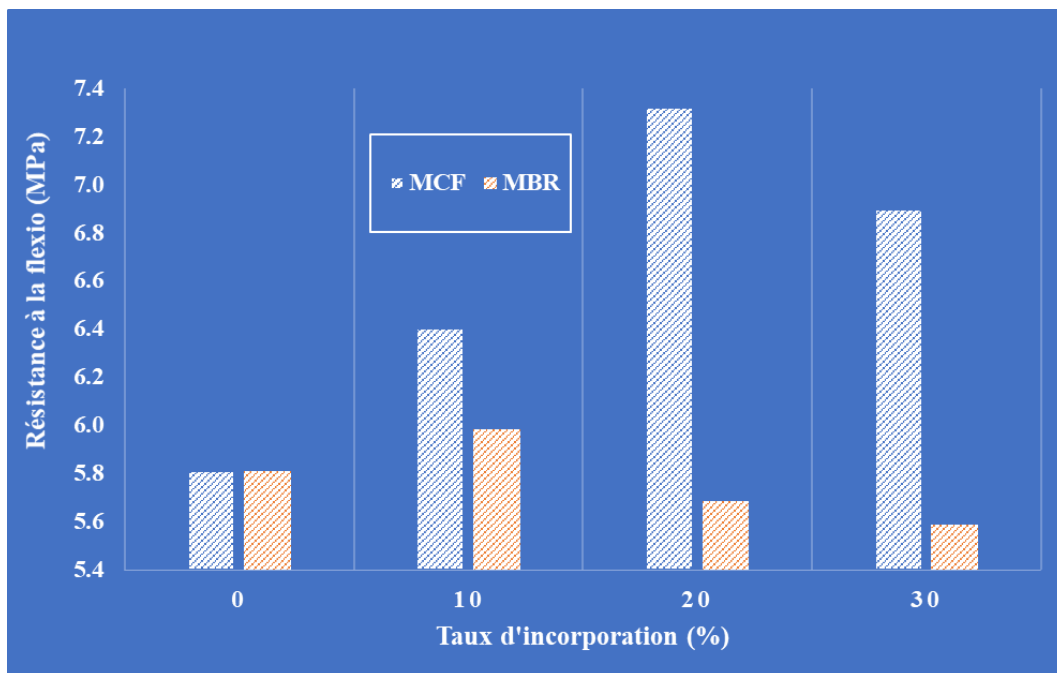


Figure 45. Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à l'état durci

Commentaire : Les mortiers élaborés avec des déchets de céramique faïence (MFC) continuent de présenter des résultats prometteurs, atteignant un seuil de 7 MPa pour la formulation MFC à 20 %. De leur côté, les mortiers à base de briques réfractaires (MBR) affichent également des performances intéressantes, avec une résistance en flexion de 6 MPa pour la formulation MBR à 10 %.

3.5 Résultats de la résistance à la compression

L'essai de compression a été effectué sur des éprouvettes ayant été conservées pendant 28 jours dans l'eau. Toutes les formulations de mortier préparées ont été soumises à cet essai afin d'évaluer leur résistance mécanique en compression dans des conditions standardisées.

Les résultats obtenus, sont présentés dans la figure 11, selon la représentation suivante :

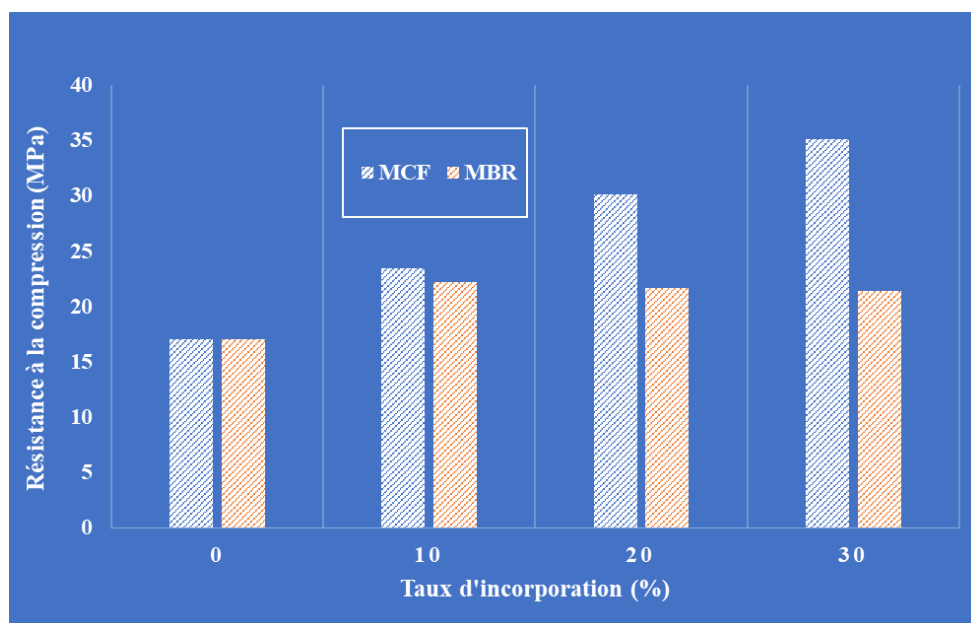


Figure 46 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers à l'état durci

Commentaire : En ce qui concerne cette caractéristique essentielle, les mortiers élaborés avec des déchets de céramique faïence (MFC), en particulier la formulation MFC 30 %, ont enregistré un résultat très encourageant, atteignant une résistance à la compression de 35.13 MPa. Cela représente une amélioration de 106 % par rapport au mortier témoin. Les mortiers à base de briques réfractaires (MBR) ont également montré de meilleures performances que le mortier de référence, bien que moins impressionnantes que celles des MFC. La formulation MBR 10 % a atteint une résistance de 22.3 MPa.

4. Caractéristiques thermophysiques

4.1 Perte de masse

Dans le cadre de la détermination des caractéristiques thermophysiques des mortiers, une série d'essais a été réalisée. Parmi ces essais, celui portant sur la perte de masse a permis d'évaluer le comportement des différentes formulations face aux variations de température.

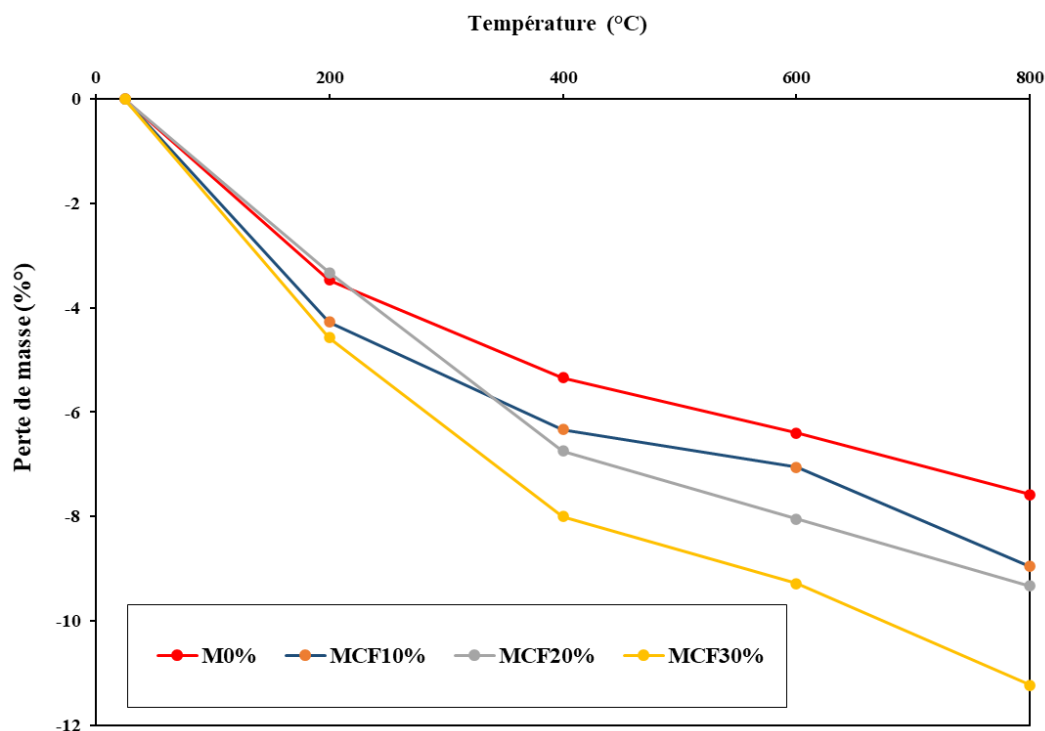


Figure 47 : Perte de masse des échantillons en fonction de la température (MCF)

Commentaire : Selon la figure 11, une relation claire peut être observée entre le taux de remplacement par les déchets de céramique et le taux de perte de masse. En effet, plus le pourcentage de substitution augmente, plus la perte de masse devient importante. Cette tendance, qui suit une évolution quasi linéaire, suggère que les fines contenues dans les déchets de céramique sont particulièrement sensibles aux effets de la haute température.

Dans la figure suivante (Figure 12) Perte de masse des échantillons en fonction de la température on va présenter la perte de masse des mortiers MBR, en comparaison, par rapport au mortier témoin

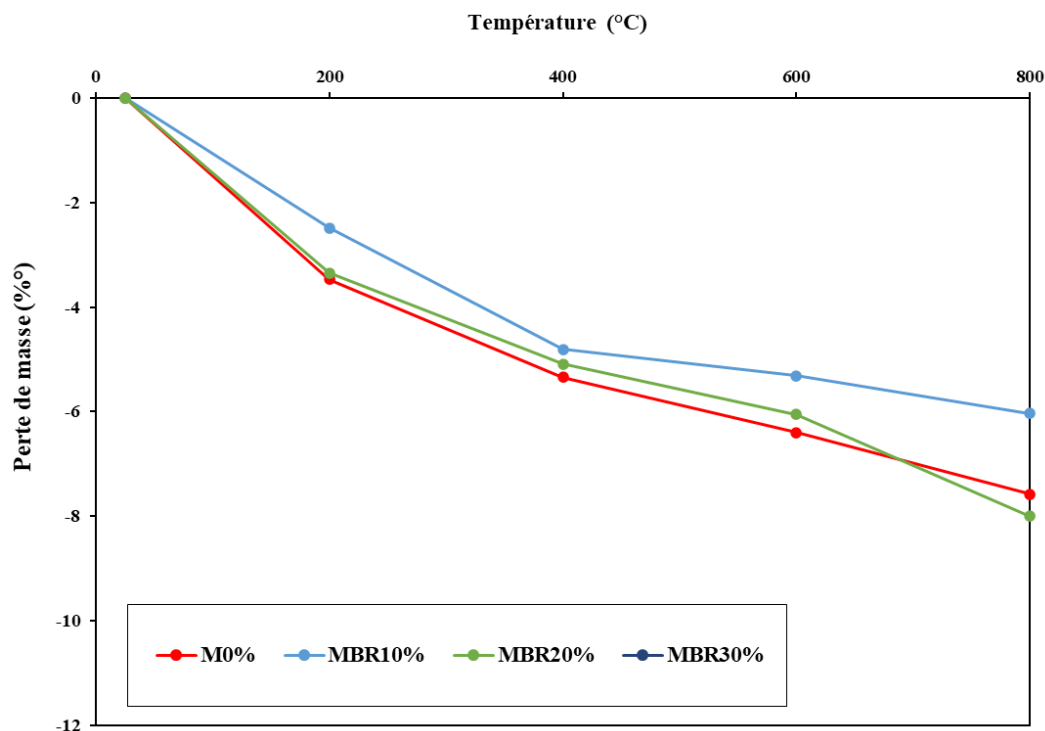


Figure 48. Perte de masse des échantillons en fonction de la température (MBR)

Commentaire : Dans ce cas, l'évolution des pertes présente un comportement légèrement différent, avec un avantage notable en faveur du mortier MBR 10 %, qui affiche un gain de performance. De plus, le mortier MBR 20 % maintient également des gains jusqu'à une température de 600 °C, témoignant d'une meilleure stabilité thermique par rapport aux autres formulations.

5. Caractéristiques thermomécaniques

5.1 Résistance à la flexion

Dans le but d'évaluer le comportement thermomécanique des différentes formulations de mortier, une série d'essais a été menée après exposition à des températures élevées. Parmi ces essais, la résistance à la flexion a été particulièrement étudiée afin de mesurer la capacité des mortiers à conserver leurs propriétés mécaniques sous l'effet de la chaleur. Cet essai permet d'analyser l'influence des matériaux de substitution (comme les déchets de céramique ou de brique réfractaire) sur la tenue mécanique des mortiers après chauffage, et ainsi de déterminer leur aptitude à être utilisés dans des environnements soumis à des variations thermiques importantes.

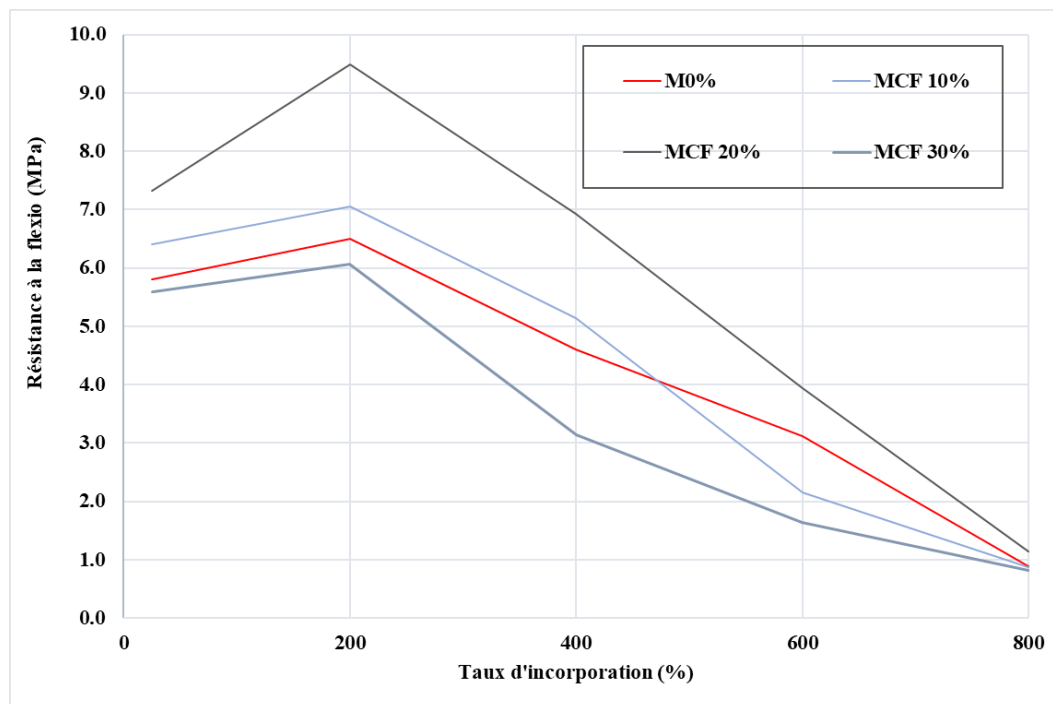


Figure 49. Evolution de la résistance à la flexion sous haute température (MCF)

Commentaire : Selon la figure 14, le mortier contenant 20 % de déchets de céramique faïence (MCF 20 %) a présenté la meilleure performance en termes de résistance à la flexion après exposition à une température de 200 °C. Cette formulation a atteint une valeur remarquable d'environ 10 MPa, représentant un gain de résistance d'environ 46 % par rapport au mortier témoin. Ce résultat suggère que l'incorporation de céramique faïence, à ce taux de substitution, améliore significativement le comportement mécanique du mortier sous l'effet de la chaleur modérée, probablement en raison d'une meilleure cohésion interne et d'une microstructure plus stable thermiquement.

Une autre comparaison a été établie avec la seconde famille de mortiers, à savoir ceux élaborés à partir de déchets de briques réfractaires (MBR). Cette analyse comparative vise à évaluer le comportement thermomécanique de ces mortiers en parallèle avec ceux contenant des déchets de céramique faïence (MCF), afin de mieux comprendre l'influence des différents types de déchets sur les performances mécaniques après exposition à des températures élevées. Les résultats obtenus (Figure 14), permettent ainsi de dégager les tendances propres à chaque famille de formulation et de mettre en évidence les éventuels avantages ou limitations liés à l'utilisation des briques réfractaires comme substitut partiel du sable.

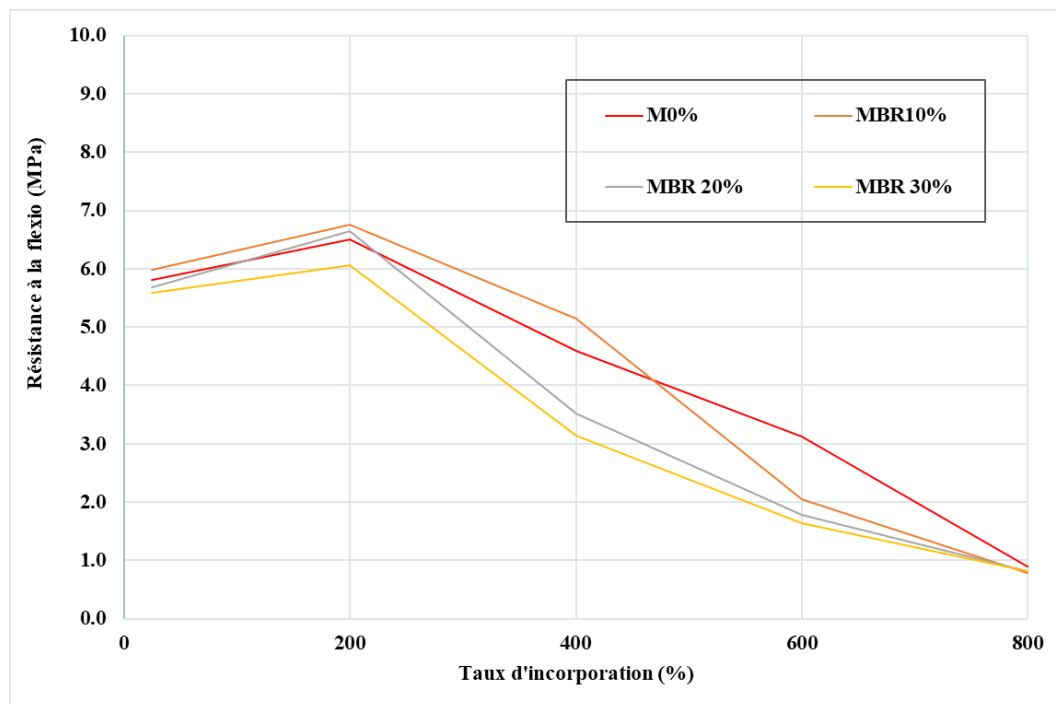


Figure 50. Evolution de la résistance à la flexion sous haute température (MBR)

Commentaire : D'après la figure 14, le mortier contenant 10 % de déchets de brique réfractaire (MBR 10 %) a affiché la meilleure performance en résistance à la flexion après exposition à une température de 200 °C. Cette formulation conserve également un bon niveau de résistance jusqu'à 400 °C, démontrant une stabilité mécanique appréciable à moyenne température. Toutefois, à partir de 600 °C, une baisse significative de la résistance à la flexion est observée pour l'ensemble des compositions testées, y compris le MBR 10 %. Cette chute généralisée peut être attribuée à la dégradation progressive de la microstructure du mortier sous l'effet des hautes températures, provoquant la fissuration, la perte d'adhérence entre les constituants et la décomposition de certains composés hydratés.

5.2 Résistance à la compression

Afin de caractériser le comportement thermomécanique des différentes formulations de mortier, des essais de résistance à la compression ont été réalisés après exposition à des températures élevées. Cet essai, essentiel pour évaluer la performance structurelle des matériaux cimentaires, permet de mesurer la capacité des mortiers à supporter des charges mécaniques après avoir subi un choc thermique. L'objectif principal est d'identifier dans quelle mesure l'incorporation de matériaux de substitution, tels que les déchets de céramique faïence ou de brique réfractaire, influence la stabilité mécanique du mortier en conditions thermiques sévères. Les résultats obtenus fournissent des indications précieuses sur l'aptitude de ces formulations à maintenir

leur intégrité et leur portance, notamment dans des contextes d'exposition prolongée ou ponctuelle à la chaleur, comme en construction industrielle ou en situation d'incendie.

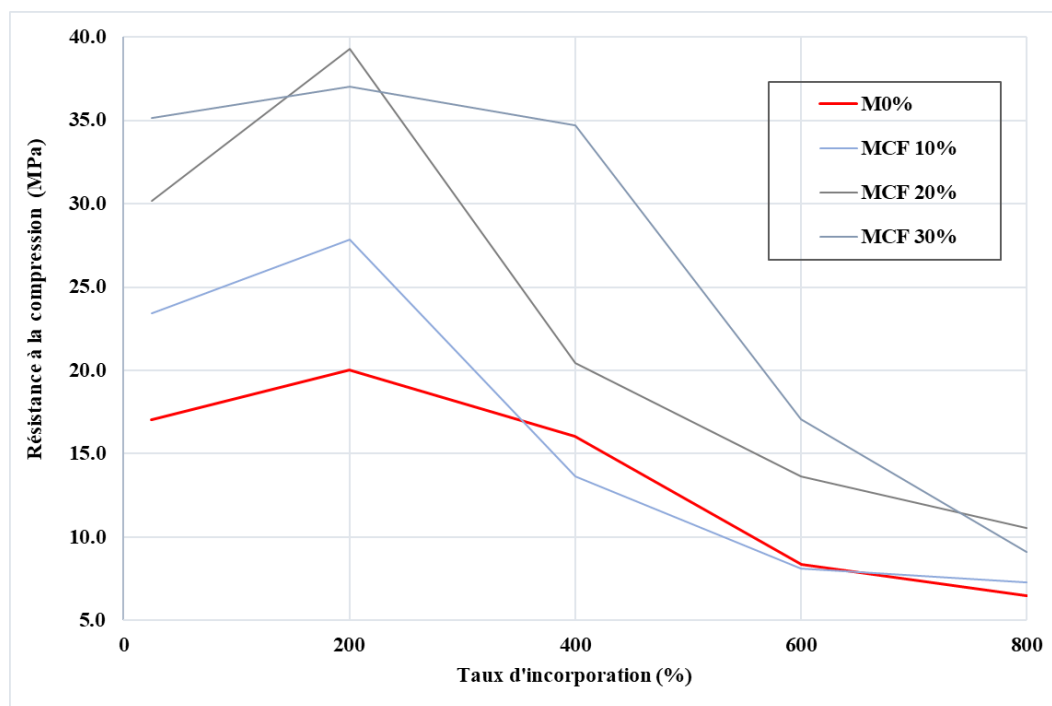


Figure 51 : Evolution de la résistance à la compression sous haute température (MCF)

Commentaire : Les résultats obtenus montrent clairement que toutes les formulations contenant des déchets de céramique faïence présentent de meilleures performances en compression que le mortier témoin, en particulier dans l'intervalle de température compris entre 200 °C et 400 °C. Cette plage thermique semble favoriser le développement ou la préservation des propriétés mécaniques de ces mortiers, probablement en raison d'une microstructure plus stable et d'une densification partielle induite par la chaleur modérée. Les formulations MCF 20 % et MCF 30 % se distinguent nettement avec des résistances à la compression dépassant 37 MPa, ce qui représente une amélioration significative par rapport au témoin. Ces performances remarquables suggèrent que les déchets de céramique, utilisés comme substituts partiels du sable, contribuent non seulement à la valorisation des déchets mais aussi à l'optimisation des propriétés thermomécaniques du mortier, rendant ces formulations particulièrement intéressantes pour des applications en milieux exposés à des températures élevées.

Les résistances à la compression des mortiers à base de briques réfractaires (MBR) après exposition à haute température sont présentées dans la figure 16.

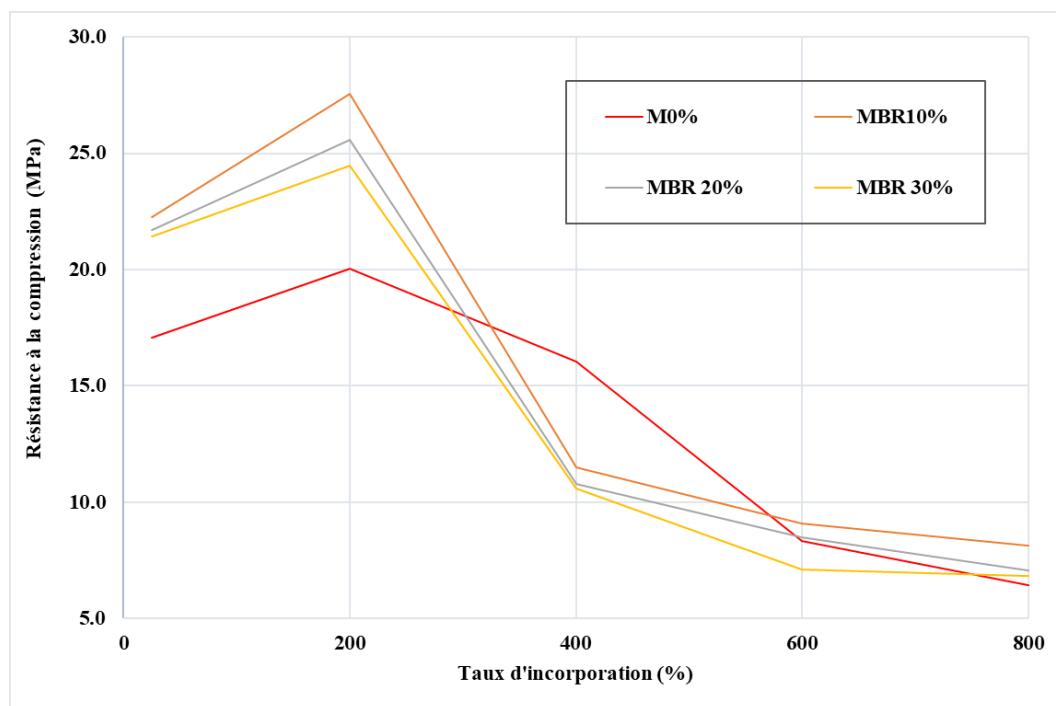


Figure 52. Evolution de la résistance à la compression sous haute température (MBR)

Commentaire : Pourtant que les résultats obtenus ne parviennent pas à égaler les performances des mortiers MCF, on observe néanmoins un effet très positif lié à l'incorporation des déchets spécifiques dans les mortiers MBR, notamment pour les formulations à 10 % et 20 %. Entre 25 °C et 200 °C, ces mortiers présentent une amélioration notable de leur résistance à la compression, atteignant jusqu'à 37 % de bénéfice pour le MBR 10 % par rapport au mortier témoin (M 0 %).

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et analysé les résultats obtenus. Nous avons constaté des gains nets significatifs, tant sur le plan des résistances mécaniques que sur celui des propriétés thermomécaniques. Ces résultats sont particulièrement encourageants pour les mortiers modifiés, notamment ceux corrigés par l'ajout de déchets de céramique de faïence, qui se sont révélés très encourageants en comparaison avec le mortier témoin.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Cette étude a mis en certitude le potentiel significatif de valorisation du sable de dune, ressource largement disponible dans le sud algérien, par l'incorporation de déchets inertes non-biodégradables tels que le déchet de la céramique de faïence (DCF) et le déchet la brique réfractaire (DBR). Ce travail s'inscrit pleinement dans une démarche de développement assuré, en conciliant performance technique et réduction de l'impact environnemental lié à l'exploitation des ressources naturelles. Les résultats obtenus ont démontré que l'ajout de ces déchets permet d'améliorer de manière significative les propriétés physico-mécaniques et thermomécaniques des mortiers à base de sable de dune. L'effet est particulièrement marqué avec les déchets de céramique de faïence à 30 % de substitution, les mortiers ont affiché une augmentation remarquable de la résistance à la compression, atteignant jusqu'à 116 % à une température de 400 °C. Ces performances témoignent non seulement d'une bonne compatibilité entre le sable de dune et les DCF, mais aussi d'un comportement thermique très favorable. D'autre part, les mortiers incorporant des déchets de brique réfractaire ont également montré des résultats encourageants, notamment aux taux de substitution de 10 % et 20 %. Dans la plage de température allant de 25 °C à 200 °C, ces formulations ont enregistré des améliorations significatives en résistance à la compression, avec un gain allant jusqu'à 37 % pour le mortier contenant 10 % de DBR par rapport au mortier témoin. Ainsi, la substitution partielle du sable de dune par ces déchets constitue une solution novatrice pour la gestion des déchets non-biodégradables et pour la mise au point de matériaux de construction performants. En conclusion, cette approche de valorisation représente une alternative viable qui pourrait contribuer à la transition vers une économie circulaire dans le secteur du bâtiment, tout en répondant aux exigences croissantes en matière de performance des matériaux.

Des investigations complémentaires pourraient porter sur la durabilité à long terme de ces matériaux, leur comportement en milieu agressif, ainsi que leur mise en œuvre à l'échelle industrielle.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Normes Afnor « Essais physico-mécaniques sur les bétons et mortiers », 1997.
- [2] Mreika, Rahmani. « Contribution à l'amélioration des propriétés du béton de sable de carrière par correction granulaire » pour le Master à l'Université Hamm Lakhdar - El Oued - 2019.
- [3] Michel Kamel Atallah, Fundamentals of Geology GEOLOGY Dar Al-Masirah for Publishing and Distribution, 2009. Jordanie.
- [4] La géologie des dunes de sable , HabesA . Ghrefat, Université de Kingsaud, Département de géologie et de géophysique Riyad, Arabie Saoudite, janvier 2011.
- [5] Abbas bin Aifan Al-Harhi. Cours sur l'ingénierie et les risques environnementaux, Département de géologie de l'ingénierie et de l'environnement, Collège des sciences de la terre, Université du roi Abdulaziz).
- [6] Institut national des études géographiques, Rapport sur les déserts algériens, 2018.
- [7] Ministère algérien de l'environnement, Rapport sur la biodiversité dans le désert algérien, 2020.
- [8] Raghavan, D., Huynh, H., Ferraris, C."Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite". Journal of Materials Science. 1998, 33(7): 1745-1752.
- [9] KEDDAM LYDIA " Caractérisation expérimentale des mortiers à base de poudre de marbre" mémoire master, Tizi-ouzou, université Mouloud Mammeri, 2016/2017.
- [10] GEORGES DREUX, JEAN FESTA « Nouveau guide du béton et de ses constituants» huitième édition ,2002.
- [11] Benmoussa Mustafa, Chefah Al-Saïd et Rizik Al-Saïd, Etude expérimentale de différents types de sable de construction pour la région de l'Oued à l'aide de mortier. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil, Génie Civil Matériaux, Université du Martyr Hamma Lakhdar El Oued (2020_2019).
- [12] Souchu, P. (2013) Hydratation du ciment Portland, Site documentaire du Lerm. Available at: <https://doc.lerm.fr/lhydratation-du-ciment-portland/>

- [13] Khatabook (2020) What is non-biodegradable waste?, Khatabook. Available at: <https://khatabook.com/blog/what-is-non-biodegradable-waste/>
- [14] الصين رخيصة الطوب الحراري المصنعين الموردين - سعر جيد الطوب الحراري تشنغتشو كبروي (المجموعة) شركة الحرارية المحدودة. الرابط : <https://www.krefractories.com/refractory-bricks/>
- [15] Artisan, T.O. (2024) Les Métiers de la fabrication, Oui Artisan. Available at: <https://oui-artisan.fr/fabrication/ceramiste/types-ceramique/>
- [16] لعريبي فاطمة الزهرة و لشلح جهينة، المساهمة في تحضير رمل قياسي خاص بالتجارب المخبرية ، مذكرة تخرج لنيل شهادة الماستر في الهندسة المدنية، تخصص مواد الهندسة المدنية، جامعة الشهيد حمه لخضر-الوادي، 2022/2023
- [17] M. RABHI MOHAMED AMINE. Influence du sable de dune sur le comportement des mortiers soumis aux attaques de l'acide sulfurique H₂SO₄.
- [18] Hamel, D.E. and Ben Hammadi, I. (1970) Étude physico-Mécanique d'un mortier à base de Sable de dune et déchets industrielles (Déchet de brique et Déchet de Plastique Pet), Apache Tomcat. Available at: <https://dspace.univ-ghardaia.edu.dz/jspui/handle/123456789/582>
- [19] L'art de caractériser les matériaux par diffraction des rayons X (2024) BPLC. Available at: <https://bplc.fr/drx-diffraction-par-rayon-x-une-technique-danalyse-pour-caracteriser-les-materiaux/>
- [20] بن موسى مصطفى و شفاح السعيد، الدراسة التجريبية لمختلف انواع رمال البناء لمنطقة الوادي باستعمال الملاط ، مذكرة تخرج لنيل شهادة الماستر في الهندسة المدنية، تخصص مواد الهندسة المدنية، جامعة الشهيد حمه لخضر-الوادي، 2019/2020
- [21] University Abou Bekr Blkaid. Available at: https://elearn.univ-lemcen.dz/pluginfile.php/270482/mod_resource/content/1/TPMDC2_chapitre2_contenu.pdf
- [22] Vasilieva, A. (2024a) Temps de Prise du Mortier de Ciment: Température et conditions, StroyComfort1.com. Available at: <https://stroycomfort1.com/fr/what-is-the-setting-time-of-concrete-and-what-does/>
- [23] Products, C.M.T. (2024) Flow test of concrete: Unlocking workability wonders, Certified MTP Blog. Available at: <https://blog.certifiedmtp.com/flow-test-of-concrete-unlocking-workability-wonders/>
- [24] BENBIDA-MEMOIRE-FINAL-AA.pdf. Available at: <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2024/09/BENBIDA-MEMOIRE-FINAL-AA.pdf>

[25] Etude comparative de l'utilisation du sable de dune en substitution du sable de rivière :
Cas des mortiers normalisés. Available at:
<https://www.ummo.dz/dspace/handle/ummo/10285>