



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي
Université Echahid Hamma Lakhdar El oued



Faculté de technologie
Département d'Hydraulique & de Génie Civil
Spécialité : Matériaux en Génie Civil

THEME

En vue d'obtention d'un diplôme du

MASTER

Présenté par : Mansouri toufik - Kholadi salah

Approche expérimentale de la résistance au feu de
mortiers écologiques à base de sable de dune et de
déchets de substitution

Soutenue le : 14 Juin 2026, En présence du jury

Dr.Farik Ali
Dr.Beddadi Laid
Dr.Choungara Toufik
Dr. Laid Gharbi
Dr.

Université Echahid Hamma Lakhdar
Université Echahid Hamma Lakhdar
Université Echahid Hamma Lakhdar
Incubateur
Représentant

Président
Examinateur
Encadreur
Expert de l'incubateur
Socio-économique

JUIN 2026



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement



Louange à Dieu  le clément, le miséricordieux et le tout puissant, qui m'a donné la possibilité, le courage et la patience afin de mener à bien ce travail.

Nous adressons nos vifs remerciements et notre profonde reconnaissance à notre directeur de thème, **Docteur Toufik Choungara**, qui a proposé ce thème, pour son encadrement, son aide, ses inestimables conseils et ses encouragements. et ses directives durant toute la période de préparation de ce mémoire.

Toutefois, nous remercions le président et membres du jury d'avoir accepté d'examiner le présent travail et à qui nous exprimons nos profondes gratitude.

Nous adressons également non sincères remerciements aux membres de la Faculté de Technologie Département d'hydraulique et de Génie Civil de l'université Echahid Hamma Lakhdar Eloued, enseignants et personnels administratifs avec qui nous avons eu le plaisir de faire ce mémoire. Nos remerciements vont aussi à tous les membres du laboratoire, techniciens, secrétaires qui ont participé indirectement ou directement au bon déroulement de ces travaux et à leur finalité.

Nous n'oublions pas de remercier sincèrement le directeur de **LBTP** (Bureau et laboratoire des travaux publics) et tous le personnel de bureau et en particulier **Docteur Toufik Choungara**.

A tous les étudiants du département de génie civil et surtout notre promotions en spécialité de matériaux en génie civil 2024-2026

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à tous ceux et celles qui de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Dédicace

En hommage de :

A celle que j'aimais tant et qui nous a quittés, à mon paradis sur terre et au ciel...Que الله ait pitié de toi , ma mère bien aimé, et qu'il illumine ta tombe de paix et de miséricorde

Et je dédie ce travail a :

Mon regrette père el Hadj Hacene

Mon épouse bien aimé ,Rabab

Mes enfants : Djihane , Djourri , Djiad , et Djassem

A Mes frères : Azzedine , Sofiane

A Ma sœur : Zakia et ses enfants ,Fatiha ,Hayat et Naima

A- tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin ,
a la réalisation de faire ce mémoire

Toufik Mansouri

ملخص

يركز هذا العمل على تثمين وإعادة استخدام المواد المحلية والنفايات الصناعية في مجال الهندسة المدنية بهدف تطوير ملاط جديد قائم على رمل الكثبان المجلوب من منطقة الوادي ونفايات السيراميك، وذلك لحماية البيئة، والحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وتعزيز التنمية المستدامة. وقد استند نهجنا إلى محورين: الأول يتمثل في إستعمال رمل الكثبان بديلا لرمل الوديان، مع تدعيم رمل الكثبان بنفايات السيراميك بنسب مختلفة، وهي: 0% للملاط الشاهد (M0)، و30% على شكل حبيبي (MCG30)، و15% حبيبي + 15% مسحوق (MCGP 15/15)، و30% على شكل مسحوق (MCP30)، وذلك من كتلة الرمل الكثباني. أما الدراسة الثانية، فقد استعملنا فيها كذلك رمل الكثبان، لكن ركزت على الاستبدال الجزئي للأسمنت بنفس النفايات على شكل مسحوق بنسب 10% (MCC10) و20% (MCC20) من كتلة الأسمنت. تم تقييم الأداء الفيزيائي والميكانيكي والحراري للملاط في حالته الطازجة وبعد تصلبه عند درجات حرارة 80 °C و 250 °C و 500 °C و 750 °C. وأظهرت النتائج تحسنا ملحوظا في الأداء، عند درجة حرارة التجفيف، أظهرت تركيبة MCGP 15/15 زيادة بنسبة 37.9% في مقاومة الانحناء وزيادة بنسبة 88.6% في مقاومة الضغط مقارنة بالملاط المرجعي M0. عند 500 °C، حقق ملاط MCP30 مقاومة ضغط جيدة بلغت 54.9 MPa مقارنة بـ 11.2 MPa للملاط M0، بينما وصل ملاط MCC20 إلى 32.2 MPa، مما يؤكد التأثير الإيجابي لاستبدال الرمل والأسمنت، لا سيما عند درجات الحرارة العالية. تمهد هذه النتائج الواعدة الطريق لتطوير أنواع مبتكرة من الملاط تعتمد على مواد محلية ومواد معاد تدويرها، قادرة على تلبية المتطلبات التقنية والاقتصادية والبيئية، مع توفير مقاومة جيدة للحرائق وقدرة على التكيف مع الظروف المناخية القاسية للمنطقة.

الكلمات المفتاحية: ملاط البيني، رمل الكثبان، مخلفات السيراميك، خواص حرارية، حرارة عالية.

Résumé

Ce travail se concentre sur la valorisation et la réutilisation de matériaux locaux et de déchets industriels dans le domaine du génie civil afin de développer un nouveau mortier à base de sable de dunes de la région d'El-Oued et de déchets de céramique, dans une perspective de protection de l'environnement, de réduction des émissions de CO₂ et de promouvoir le développement durable. Notre approche s'est articulée autour de deux axes : le premier consiste à remplacer totalement le sable d'oued par du sable de dunes renforcé par des déchets de céramique selon différentes teneurs, à savoir 0 % pour le mortier témoin (M0), 30 % sous forme grenue (MCG30), 15 % sous forme grenue + 15 % sous forme poudre (MCGP 15/15) et 30 % sous forme poudre (MCP30), par rapport à la masse du sable. La seconde étude utilise également du sable dunaire, mais se concentre sur la substitution partielle du ciment par ces mêmes déchets sous forme de poudre, à raison de 10 % (MCC10) et 20 % (MCC20) de la masse de ciment. Les performances physico-mécaniques et thermiques des mortiers ont été évaluées à l'état frais et durci après exposition à des températures de 80 °C, 250 °C, 500 °C et 750 °C. Les résultats ont montré une amélioration très significative des performances : à la température de séchage, la formulation MCGP 15/15 a enregistré un gain de 37.9 % en résistance à la flexion et de 88.6 % en résistance à la compression par rapport au mortier témoin M0. À 500 °C, le mortier MCP30 a développé une résistance à la compression remarquable de 54.9 MPa contre 11.2 MPa pour le M0, tandis que le mortier MCC20 a atteint 32.2 MPa, confirmant l'effet positif de la substitution du sable et du ciment, particulièrement aux températures élevées. Ces résultats prometteurs ouvrent la voie au développement de mortiers innovants à base de matériaux locaux et recyclés, capables de répondre aux exigences techniques, économiques et environnementales tout en offrant une bonne résistance au feu et une adaptation aux conditions climatiques extrêmes de la région.

Mots-clés : mortier écologique, sable des dunes, déchets de céramique, propriétés thermiques, haute température.

Abstract

This work focuses on the valorization and reuse of local materials and industrial waste in the field of civil engineering in order to develop a new mortar based on dune sand from the El-Oued region and ceramic waste, with a view to environmental protection, CO₂ emission reduction and the promotion of sustainable development. Our approach was based on two axes: the first method involves completely replacing the river sand with dune sand reinforced with ceramic waste in different proportions, namely 0% for the control mortar (M0), 30% in granular form (MCG30), 15% in granular form + 15% in powder form (MCGP 15/15) and 30% in powder form (MCP30), relative to the mass of the sand; The second study focused on the partial substitution of cement with the same waste in powder form at rates of 10% (MCC10) and 20% (MCC20) of the cement mass. The physico-mechanical and thermal performance of the mortars was evaluated in their fresh state and after hardening at temperatures of 80°C, 250°C, 500°C, and 750°C. The results showed a highly significant improvement in performance: at the drying temperature, the MCGP 15/15 formulation exhibited a 37.9% increase in flexural strength and an 88.6% increase in compressive strength compared to the control mortar M0. At 500°C, the MCP30 mortar developed a remarkable compressive strength of 54.9 MPa compared to 11.2 MPa for M0, while the MCC20 mortar reached 32.2 MPa, confirming the positive effect of substituting sand and cement, particularly at high temperatures. These promising results pave the way for the development of innovative mortars based on local and recycled materials, capable of meeting technical, economic, and environmental requirements while offering good fire resistance and adaptability to the region's extreme climatic conditions.

Keywords: ecological mortar, dune sand, ceramic waste, thermal properties, high temperature.

Nomenclature et Abreviations

- M0** _____ : mortier témoin formulé avec 100% de sable;
- MCG 30** _____ : mortier formulé avec 30% de déchet de céramique (Grossier) et 70% de sable
- MCP 30** _____ : mortier formulé avec 30% de déchet de céramique (Poudre) et 70% de sable
- MCGP15/15** _____ : mortier formulé avec 30% de déchet céramique (15%G + 15%P) et 70% de sable
- MCC 10** _____ : mortier formulé avec 10% de déchet de céramique(poudre) et 90% de ciment.
- MCC 20** _____ : mortier formulé avec 20% de déchet de céramique(poudre) et 80% de ciment.
- SD** _____ : Sable de dune.
- UPV** _____ : Ultrasonic Pulse Velocity (la vitesse d'impulsion ultrasonique).
- Ab** _____ : Absorption d'eau.
- RSM** _____ : Réponse Surface Méthodologie.
- Rc** _____ : Résistance de compression.
- Rf** _____ : Résistance de flexion.
- EN** _____ : Norme Européenne.
- NF P** _____ : Norme Françaises applicable au bâtiment et génie civil .
- AFNOR** _____ : Association Française de Normalisation .
- DI** _____ : Déchets Inertes
- DIB** _____ : Déchets Industriels Banals
- DIS** _____ : Déchets Industriels Spéciaux
- DD** _____ : Déchets Dangereux
- MEB** _____ : Microscopie Electronique à Balayage
- DRX** _____ : Diffraction par Rayons X
- ASTM** _____ : American Society for Testing and Materials.
- ATD** _____ : Analyse Thermique Différentielle
- ATG** _____ : Analyse Thermo Gravimétrique
- C/S** _____ : rapport massique CaO sur SiO₂
- C₂S** _____ : silicate bicalcique
- C₃A** _____ : aluminat tricalcique
- C₃S** _____ : silicate tricalcique
- Ca(OH)₂ , CH** _ : portlandite , hydroxyde de calcium.
- CaCO₃** _____ : calcaire
- CaO** _____ : chaux libre
- CO₂** _____ : dioxyde de carbone
- C-S-H** _____ : silicate de calcium hydraté

H.R _____ : humidité relative

E/C _____ : rapport massique Eau sur Ciment

BA _____ : béton armé

RAG _____ : Réaction Alkali-Granulat

RILEM _____ : Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions

TABLE DE MATIERES

* Remerciement	II
*Dédicaces.....	III
* ملخص.....	IV
* Résumé.....	V
* Abstract	VI
* Nomenclatures et abréviations.....	VIII
* Table des matières.....	XII
* Liste des figures.....	XIII
* Liste des tableaux.....	XIV

Introduction Genrale

Introduction
Problématique

Chapitre I : Revue Bibliographique

I.1 GENERALITES SUR LES CEMENTS	1
I.1.1 Introduction.....	1
I.1.2 Définition.....	1
I.1.3 Fabrication du ciment	1
I.1.4 Principales catégories des ciments Algériens	2
I.1.4.1 Classification des ciments en fonction de leur composition	2
I.1.4.2 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale	4
I.1.5 Caractéristiques chimiques du ciment:	4
I.2 HYDRATATION DU CIMENT.....	5
I.2.1 Mécanisme et réactions d'hydratation:	5
I.2.2 L'hydratation des composants du ciment.....	6
I.2.2.1 Hydratation des silicates C3S et C2S	6
I.2.2.2 Hydratation des silicates C3A	8
I.2.3 Chaleur d'hydratation.....	10
I.2.4 Finesse de mouture du ciment	10
I.2.4.1 Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine :	10
I.3 LES SABLES DE DUNES: I.3.1 Introduction:	12
I.3.2 Définition de sable de dunes.....	12
I.3.3 Qu'est-ce qu'une dune ?	13
I.3.4 L'emplacement géographique des dunes de sable	13
I.3.5 Analyse chimique par rayons X dispersifs en longueur d'onde fluorescence de sable des dunes: ..13	
I.3.5.1 Répartition granulométrique du sable d'El-Oued [21].....	14
I.3.5.2 Morphologie et analyse EDX [8]	15
I.3.5.3 Minéralogie du sable d'El-Oued [8]	16

I.3.6 Rôle de sable dans le mortier :	16
I.3.7 Exigences sur le sable d'usage général :	17
I.4 CERAMIQUE :	18
I.4.1 Définition :	18
I.4.2 Propriétés Générales Des Céramiques :	18
I.4.2.1 Liaison et Structure.....	18
I.4.2.2 Microstructure et propriétés	18
I.4.2.3 Propriété chimiques	18
I.4.3 Élaboration des céramiques :	18
I.4.4 Classification des produits céramiques:	19
I.4.4.1 Selon leur application :	19
I.4.4.2 Selon leur mode d'élaboration et la forme finale :	19
I.4.4.3 Selon leur composition chimique :	20
I.4.5 Les compositions céramiques I.4.5.1 La poudre	20
I.4.5.2 Le liquide.....	20
I.4.6 Les grandes caractéristiques des céramiques :	21
I.5 LES DECHETS.....	22
I.5.1 Introduction.....	22
I.5.2 Définition d'un déchet:	22
I.5.3 Types de déchets Il existe de plusieurs types de déchets fabriqués par une variété de processus...	22
I.5.3.1 Selon la réglementation algérienne:	22
I.5.3.2 Selon la nature:	23
I.5.3.3 Selon l'origine:	24
I.5.4 Cycle de vie d'un matériau dans le génie civil :	25
I.5.5 Avantages de la connaissance du cycle de vie d'un produit :	25
I.5.6 Evaluation des impacts environnementaux / Analyse de l'impact	26
I.5.7 Développement durable	26
I.5.8 valorisations dans le Génie Civil	27
I.5.8.1 Sous-produits industriels	27
I.5.8.2 Besoins du Génie Civil.....	28
I.5.9 Déchets en Algérie :	29
I.5.10 Recyclage des déchets	29
I.5.10.1 Définition.....	29
I.5.10.2 Historique du recyclage en génie civil :	30
I.5.10.3 Recyclage de déchets dans le domaine du génie civil en Algérie :	30
I.6 DECHET DE CERAMIQUE:	31
I.6.1 Introduction :	31
I.6.2 Influence des déchets céramiques sur les propriétés des matériau Cimentaires :	32

I. 6.3 À l'États frais :	32
I. 6.4 À l'États durci :	33
I.7 IDENTIFICATION DES MORTIERS	36
I.7.1 Introduction.....	36
I.7.2 Définition.....	36
I.7.3 Le rôle d'utilisation du mortier.....	36
I.7.4 Les différents types de mortiers:.....	37
I.8 EAU DE GACHAGE.....	38
I.8.1 Introduction:	38
I.8.2 Actions de l'eau :	39
I.8.3 Exigences requises pour les eaux de gâchage.....	39
I.9 MORTIER SOUMIS A HAUTE TEMPERATURE	41
I.9.1 Introduction.....	41
I.9.2 Comportement mécanique du béton a température ambiante.....	41
I.9.2.1 Comportement en compression	41
I.9.2.2 Comportement en traction	42
I.9.3 Comportement au feu des structures en béton lors d'incendie	43
I.9.4 Comportement du béton à la haute température	45
I.9.4.1 Transformations de la matrice cimentaire	45
I.9.4.2 Transformations des granulats.....	46
I.9.4.3 Déformation thermique libre	47
I.9.5 Evolution des Propriétés mécaniques	48
I.9.6 Module d'élasticité	50
I.9.7 Evolution des propriétés physiques	51
I.9.7.1 Perte de masse	51
I.9.7.2 Porosité	52
I.9.7.3 Formes d'endommagement thermique	53
I.10 Conclusion.....	54

Chapitre II : Méthodologie et choix des matériaux

II.1 Introduction :	56
II.2 Objectif du travail :	56
II.3 Méthodologie du travail pratique :	56
II.4 Ciment.....	56
II.4.1 Caractéristique techniques :	57
II.5 Sable de dune	57
II.5.1 Les caractéristiques physiques :	58
II.5.1.1 La masse volumique apparente	58
II.5.1.2 La masse volumique absolue	59
II.5.1.3 Analyse granulométrique d'un sol.....	61

II.5.1.4 Essai de l'équivalent de sable	64
II.6 Déchets Céramique :	66
II.6.1 La masse volumique apparente :	67
II.6.2 La masse volumique absolue :	67
II.7 L'eau de gâchage:	68
II.8 Confection et essais sur mortiers	68
II.8.1 Constituants du mortiers.....	68
II.8.1.1 Fixation d'une teneur en eau (E/C)	68
II.8.1.2 Formulation du mortier avec le remplacement partiel de sable par le déchets de céramique:	68
II.8.1.3 Formulation du mortier avec le remplacement partiel de ciment par le déchets de céramique:	69
II.8.1.4 Préparation du mortier.....	69
II.9 Essais de caractérisations physiques et mécaniques des mortiers	71
II.9.1 Essais sur mortier frais	71
II.9.1.1 Mesure de la consistance des mortiers	71
II.9.1.2 La masse volumique apparente :	73
II.9.2 Essais sur mortier durci	73
II.9.2.1 Mesure des résistances à la compression et à la traction	73
II.9.2.2 Résistance à la flexion	78
II.9.2.3 Résistance à la compression.....	80
II.10 Essais thermiques.....	81
II.10.1 Disposition dans le four.....	81
II.10.2 La méthodologie.....	81
II.11 Absorption par immersion totale	82
II.12 Perte de masse	83
II.13 Essai d'auscultation dynamique	83
II.13 Conclusion	85

Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

III.1 Introduction	87
III.2 Formulations des mortiers:	87
III.3 Résultats des essais sur mortier frais:	88
III.3.1 Ouvrabilité:	88
III.3.2 Densité à l'état frais	89
III.4 Résultats des essais sur mortier à l'état durci :	90
III.4.1 Remplacement partiel de sable par les déchets de Substitution:.....	90
III.4.1.1 Caractérisation physique :	90
III.4.1.2 Caractérisation mécanique :	92

III.4.2 Remplacement partiel de ciment par les déchets de Substitution:	93
III.4.2.1 Caractérisation physique :.....	93
III.4.2.2 Caractérisation mécanique :.....	95
III.5 Caractérisation thermophysique:	96
III.5.1 Remplacement partiel de sable par les déchets de Substitution:.....	96
III.5.1.1 Caractérisation physique :.....	96
III.5.1.2 Caractérisation thermomécanique:	98
III.5.2 Remplacement partiel de ciment par les déchets de Substitution:	100
III.5.2.1 Caractérisation physique :.....	100
III.5.2.2 Caractérisation thermomécanique:	102
III.5 Conclusion des Résultats et Discussions	104
Conclusion générale	105
Recommandations	106

Liste des figures

Chapitre I : Revue Bibliographique

Figure I. 1. Le ciment	1
Figure I. 2. Représentation schématique du procédé de fabrication du ciment	2
Figure I. 3. Flux thermique dégagé par une pate de ciment Portland en cours d'hydratation.....	5
Figure I. 4. Ca(OH)_2 et CSH	7
Figure I. 5. Cristaux de portlandite	7
Figure I. 6. Organigramme de mécanisme d'hydratation du C3S.....	7
Figure I. 7. aiguilles d'ettringite	8
Figure I. 8. monosulfoaluminate hydraté.....	8
Figure I. 9. Degré d'hydratation des phases C3S, C2S, C4AF et C3A en fonction du temps.....	9
Figure I. 10. Comparaison de la résistance à la compression des Phases du ciment en cours d'hydratation.....	9
Figure I. 11. Chaleur d'hydratation du ciment	10
Figure I. 12. Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine	11
Figure I. 13. Les sables des dunes mouvants.....	12
Figure I. 14. Carte de l'Algérie montrant la localisation des SD d'El-Oued.....	13
Figure I. 15. A) Spectres d'absorption FTIR et b) courbes granulaires des échantillons de sable d'El-Oued S1, S2, S3, S4 et S5	14
Figure I. 16. Analyses EDX des grains de sable S4 et S5	15
Figure I. 17. Modèles XRD des échantillons de sable d'El-Oued	16
Figure I. 18. Microstructure typique d'une surface céramique	18
Figure I. 19. Déchets issus des ménages urbains individuels ou collectifs	22
Figure I. 20. Déchets banals issus des activités industrielles	24
Figure I. 21. Exemple des déchets de soin.....	24
Figure I. 22. Schéma définissant le cycle de vie d'un matériau	25
Figure I. 23. Evaluation des impacts environnementaux	26
Figure I. 24. Axes du développement durable	27
Figure I. 25. Composition des déchets du bâtiment.....	28
Figure I. 26. Répartition des quantités de déchets de chantiers ou de démolition.....	28
Figure I. 27. Recyclage des déchets)	30
Figure I. 28. Déchet de céramiques	31
Figure I. 29. Effet de déchets céramique rouge sur la fluidité des mortiers	32
Figure I. 30. Effet de déchets céramique sur la densité à l'état frais de béton	32

Figure I. 31. Effet de déchets céramique rouge sur la résistance à la compression des mortiers conservés dans l'eau.....	33
Figure I. 32. Effet de déchets céramique sur la résistance à la compression comparée au béton témoins RC	33
Figure I. 33. Résistance à la compression en fonction du temps pour tous les taux de remplacement des agrégats naturels fins par des agrégats sanitaires fins recyclés	34
Figure I. 34. Effet de déchets céramique rouge sur la résistance à la flexion des mortiers conservés dans l'eau	34
Figure I. 35. Effet de déchets céramique sur la résistance à la flexion à 28 jours de cure	35
Figure I. 36. Mortier de ciment	36
Figure I. 37. L'eau du robinet.....	38
Figure I. 38. Courbe contrainte-déformation en compression simple	42
Figure I. 39. Comportement du béton en traction simple	42
Figure I. 40. À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie.....	43
Figure I. 41. Exemples de désordres de différentes classes, a/ écaillage superficiel, b/disparition du béton D'enrobage des armatures, c/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de L'épaisseur De béton atteint 50%.....	44
Figure I. 42. Processus de déshydratation/réhydratation de la pâte de ciment exposée à haute température	46
Figure I. 43. Déformation thermique des pâtes de ciment.....	47
Figure I. 44. Résistance en compression à chaud de béton à différentes températures	48
Figure I. 45. Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des BO et BHP	49
Figure I. 46. Evolution du module d'élasticité résiduel relatif	50
Figure I. 47. Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons.....	51
Figure I. 48. Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température.....	52
Figure I. 49. Etat de surface et fissures des bétons avec différents températures.....	53

Chapitre II : Méthodologie et choix des matériaux

Figure II. 1. Ciment Biskria	55
Figure II. 2. Sable de dune.....	56
Figure II. 3. Appareillage d'essai masse volumique apparente.....	57
Figure II. 4. Méthode de déposition du sable utilisée pour déterminer sa masse volumique minimale.....	58
Figure II. 5. Appareillage d'essai masse volumique apparente.....	59
Figure II. 6. Essai de la masse volumique absolue	59
Figure II. 7. Tamiseuse et les tamis utilisés pour l'analyse granulométrique.....	60
Figure II. 8. la courbe de l'analyse granulométrique du sable de dune	62
Figure II. 9. Equipements de l'essai d'équivalent de sable	63
Figure II. 10. Essai d'équivalent de sable.....	64
Figure II. 11. Processus de broyage des déchets céramiques	66
Figure II. 12. La masse volumique apparente de déchets de céramique	66
Figure II. 13. La masse volumique absolue de déchets de céramique.....	67
Figure II. 14. Equipement pour préparation des mortiers	68
Figure II. 15. Matériaux utilisés dans les mélanges.....	69
Figure II. 16. Equipement essai d'étalement à la table à secousse	70
Figure II. 17. Essais la masse volumique de mortier	72
Figure II. 18. Hausse du moule.....	73
Figure II. 19. Moules normalisés	73
Figure II. 20. Exemple de spatules et de règle métallique	74
Figure II. 21. Machine d'essai de compression.....	74
Figure II. 22. Ensemble des Moulage et des éprouvettes avec appareil a choc.....	75
Figure II. 23. Éprouvettes démoulées nommées et numérotées	76
Figure II. 24. Eprouvettes conservées dans l'eau	77
Figure II. 25. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion	78
Figure II. 26. Dispositif de rupture en compression	79
Figure II. 27. Disposition les éprouvettes dans le four	80
Figure II. 28. Appareil d'auscultation sonique et ses accessoires	81

Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

Figure III. 1. Evolution de l'étalement des mortiers sur la table à secousses en fonction du taux de Substitution.....	88
Figure III. 2. Evolution de l'étalement des mortiers sur la table à secousses en fonction du taux de substitutio.....	88
Figure III. 3. Effet du taux de substitution sur la masse volumique des mortier	89
Figure III. 4. Effet du taux de substitution sur la masse volumique des mortier	89
Figure III. 5. Evolution de l'absorption d'eau	90
Figure III. 6. Effet du taux de substitution sur la masse volumiqu.....	90
Figure III. 7. Evolution del'UPV	91
Figure III. 8. Evolution de la résistance à la flexion.....	92
Figure III. 9. Présentations Evolution de la résistance à la compression	92
Figure III. 10. Evolution de l'absorption d'eau	93
Figure III. 11. Effet du taux de substitution sur la masse volumique	94
Figure III. 12. Evolution de l'UPV	94
Figure III. 13. Evolution de la résistance à la flexion.....	95
Figure III. 14. Evolution de la résistance à la compression	95
Figure III. 15. Évolution de la masse volumique apparente à la haute température.....	96
Figure III. 16. Évolution de l'ultrason à la haute température	97
Figure III. 17. Évolution de la perte de masse à la haute température	97
Figure III. 18. Évolution de la résistance à la flexion (à haute température)	98
Figure III. 19. Évolution de la résistance à la compression (à haute température)	99
Figure III. 20. Évolution de la masse volumique apparente à la haute température	100
Figure III. 21. Évolution de l'ultrason à la haute température	100
Figure III. 22. Évolution de la perte de masse à la haute température	101
Figure III. 23. Évolution de la résistance à la flexion (à haute température)	102
Figure III. 24. Évolution de la résistance à la compression (à haute température)	102

LISTE DES TABLEAUX

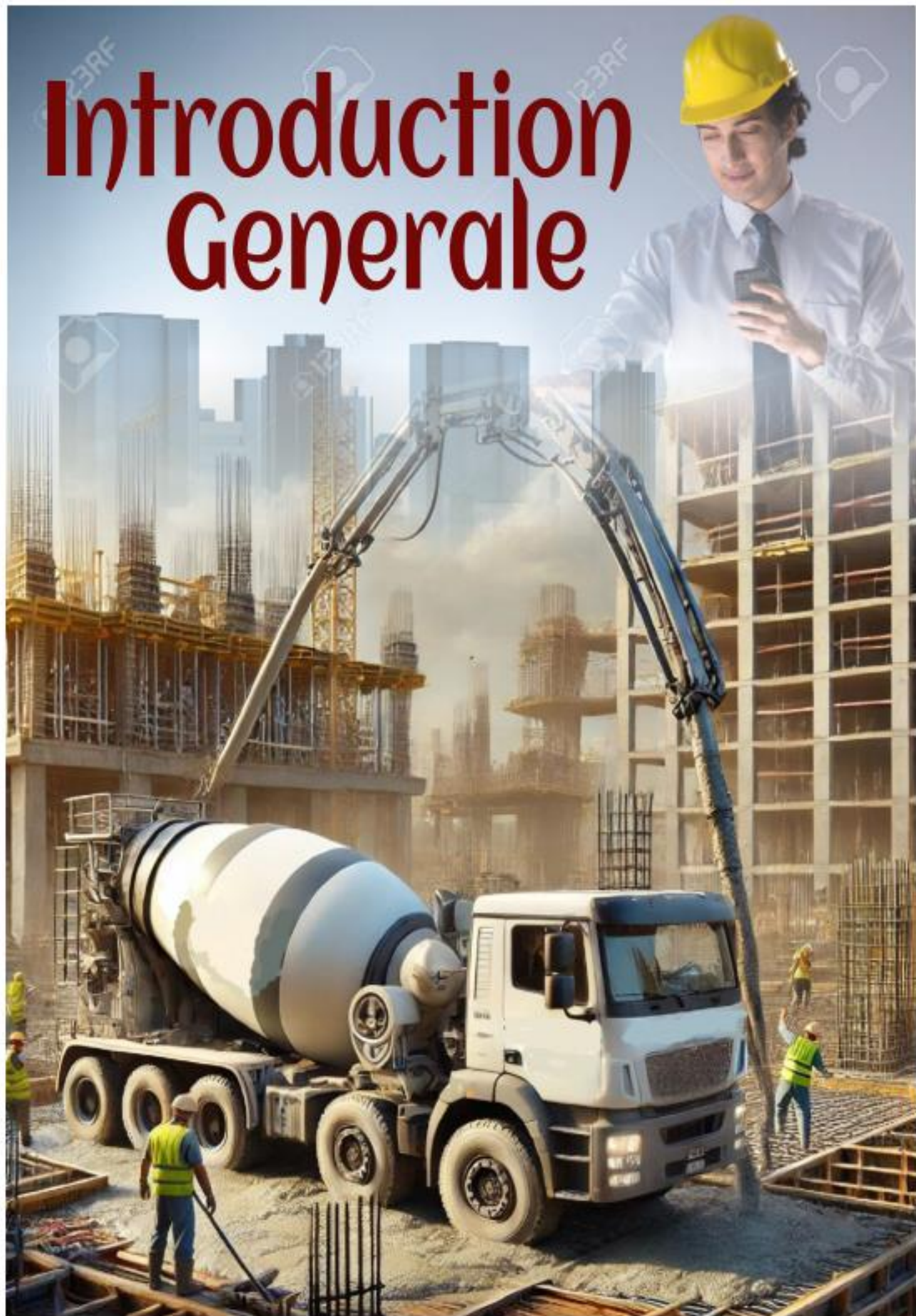
Chapitre I : Revue Bibliographique

Tableau I. 1. Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition	3
Tableau I. 2. Exigences mécaniques garanties des ciments selon la norme	4
Tableau I. 3. Phases anhydres du clinker	4
Tableau I. 4. La composition chimique du ciment	5
Tableau I. 5. Principaux produits d'hydratation du ciment Portland.....	9
Tableau I. 6. Analyse chimique des échantillons de sable d'El-Oued	4
Tableau I. 7. Ordre des étapes selon lesquelles sont élaborées les céramiques.....	19
Tableau I. 8. Composition de la céramique classique	20
Tableau I. 9. Produits électrotechniques	20
Tableau I. 10. Produits réfractaires.....	21
Tableau I. 11. Classification des dégradations d'ouvrage en béton par incendie	44

Chapitre II : Méthodologie et choix des matériaux

Tableau II. 1. Caractéristiques technique de ciment.....	56
Tableau II. 2. Masse volumique apparente de sable de dune	58
Tableau II. 3. analyse granulométrique du sable de dune	61
Tableau II. 4. Grosseur ou finesse du sable mesurée à partir du module de finesse	62
Tableau II. 5. résultats équivalent de sable de dune	64
Tableau II. 6. Valeurs de l'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable	65
Tableau II. 7. La masse volumique apparente de déchets de céramique	66
Tableau II. 8. Les mortiers avec le remplacement partiel de sable par le poudre de céramique	67
Tableau II. 9. Les mortiers avec le remplacement partiel de ciment par le poudre de céramique	68
Tableau II. 10. Séquence de malaxage du mortier.....	69
Tableau II. 11 Les valeurs d'étalement à la table.....	71
Tableau II. 12. Les résultats d'étalement à la table	71
Tableau II. 13. Les résultats de la masse volumique	72
Tableau II. 14. Propagation des impulsions	82

Introduction Generale



Introduction

La croissance démographique accélérée et l'urbanisation intensive que connaît le monde contemporain engendrent une demande croissante en matériaux de construction, exerçant ainsi une pression considérable sur les ressources naturelles et l'environnement. Face à cette réalité, le développement de matériaux de construction écologiques, économiques et performants s'impose comme une nécessité incontournable. Dans ce contexte, les régions arides et semi-arides, notamment celles d'Afrique du Nord, disposent d'un gisement naturel abondant et peu valorisé : le sable de dune. Ce matériau, longtemps considéré comme inapte à la construction en raison de la finesse de ses grains et de sa granulométrie homogène, suscite aujourd'hui un intérêt scientifique croissant en tant que substitut partiel ou total aux granulats conventionnels.

Parallèlement, l'industrie de la céramique génère des quantités importantes de déchets solides issus des rebuts de fabrication et des produits défectueux. Ces déchets, généralement mis en décharge, représentent non seulement un problème environnemental majeur, mais constituent également une ressource secondaire inexploitée, dotée de propriétés physico-mécaniques et thermiques potentiellement intéressantes pour la formulation de mortiers.

L'incorporation de ces deux matériaux — sable de dune et déchets de céramique — dans la composition de mortiers s'inscrit pleinement dans la démarche de l'économie circulaire et du développement durable, en réduisant l'exploitation des ressources vierges et en valorisant des sous-produits industriels. Cependant, au-delà des performances mécaniques à température ambiante, la tenue au feu des matériaux cimentaires constitue un critère de sécurité fondamental, notamment pour les structures soumises à des risques d'incendie.

En effet, l'exposition à des températures élevées provoque des modifications profondes de la microstructure des mortiers : déshydratation des hydrates, décomposition de la portlandite, transformation de phases minéralogiques et fissurations thermiques, autant de phénomènes qui altèrent irrémédiablement leurs propriétés mécaniques et leur durabilité. L'étude du comportement résiduel de ces mortiers après exposition à des températures allant jusqu'à 600°C, voire 900°C, permet ainsi d'évaluer leur aptitude à maintenir leur intégrité structurelle en situation d'incendie.

Problématique :

L'industrie de la construction représente l'un des secteurs les plus consommateurs de matériaux naturels à l'échelle mondiale. En Algérie, le développement urbain accéléré et les grands programmes de construction lancés ces dernières décennies ont engendré une demande croissante en matériaux de construction, notamment en granulats naturels et en sable. Cette situation soulève plusieurs préoccupations majeures qui constituent le cœur de la problématique de cette recherche

1. Manque de valorisation du sable de dune saharien

Le territoire algérien est recouvert à plus de 60% par le Sahara, riche en sable de dune. Pourtant :

- Ce matériau abondant et local reste largement sous-exploité dans le secteur de la construction, principalement en raison de ses caractéristiques granulométriques (grains fins et arrondis) qui ne correspondent pas aux spécifications traditionnelles des normes en vigueur.
- Les études sur l'utilisation du sable de dune dans les mortiers et bétons, bien qu'existantes, demeurent insuffisantes, surtout en ce qui concerne son comportement à haute température.

2.Problème des déchets de céramique

L'industrie céramique algérienne et le secteur du bâtiment génèrent chaque année des quantités considérables de déchets de céramique issus :

- De la production industrielle (pièces défectueuses, chutes de fabrication, rebuts de cuisson).
- Des travaux de démolition et de rénovation (carrelages, faïences, sanitaires brisés).
- Des chantiers de construction (casses accidentelles, surplus de matériaux).

Ces déchets posent un problème environnemental sérieux car :

- Ils sont difficilement biodégradables et persistent dans l'environnement pendant des siècles.
- Leur stockage en décharge occupe des espaces importants et génère des coûts élevés de gestion.
- Leur valorisation reste insuffisante en Algérie, faute de filières de recyclage bien développées.
- Ils constituent une source de pollution visuelle et environnementale dans les zones urbaines et périurbaines.

3. Raréfaction des ressources naturelles en granulats

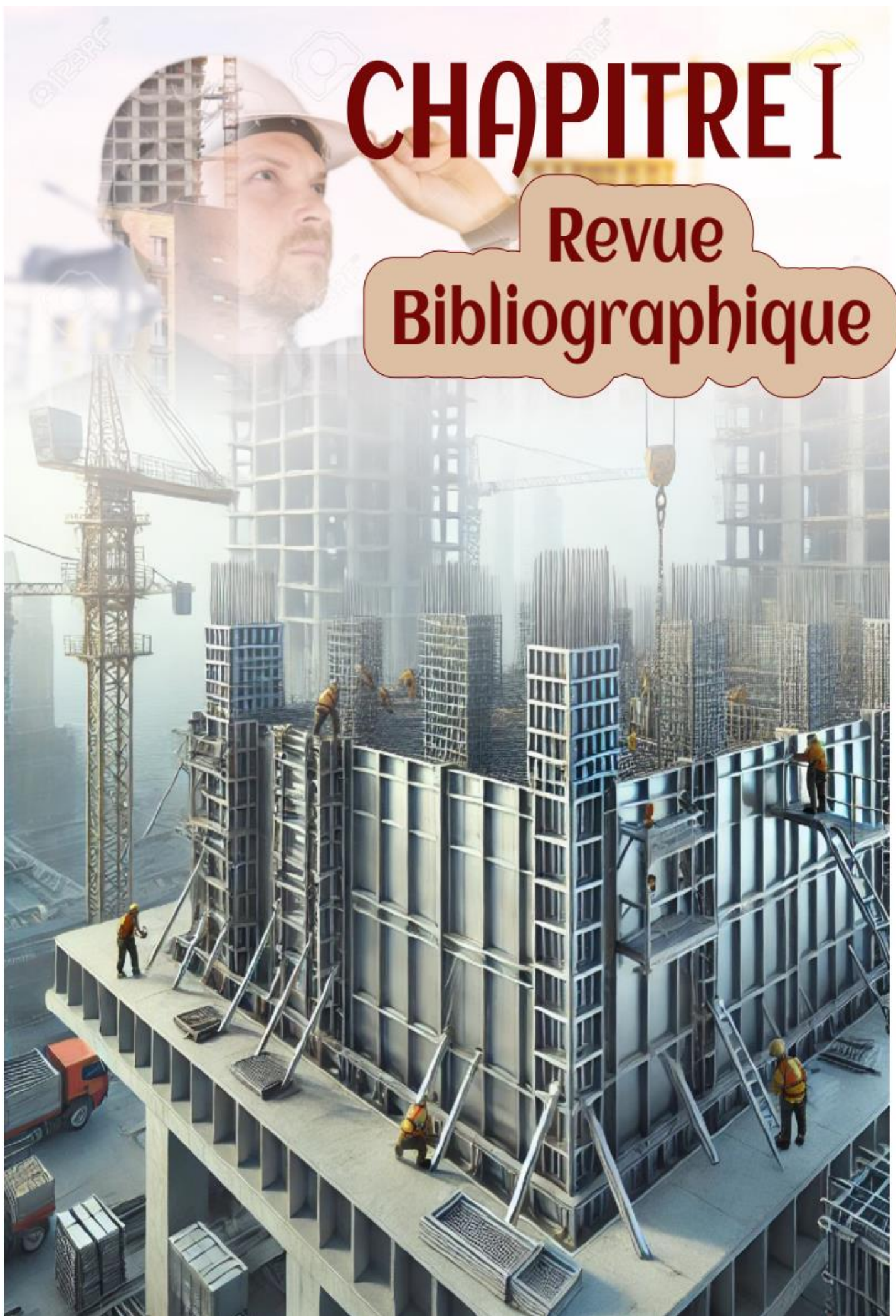
L'extraction intensive du sable naturel des rivières et des carrières pour répondre aux besoins croissants du secteur de la construction entraîne :

- Un épuisement progressif des gisements de sable naturel exploitables, menaçant la disponibilité future de cette ressource indispensable.
- Une dégradation environnementale significative des écosystèmes fluviaux et des paysages naturels liée à l'extraction excessive.
- Une augmentation des coûts de production des matériaux de construction due à la rareté croissante du sable naturel de qualité.

Des déséquilibres régionaux d'approvisionnement, particulièrement prononcés dans les régions sahariennes du sud de l'Algérie, éloignées des sources traditionnelles de granulats

CHAPITRE I

Revue Bibliographique



I.1 GENERALITES SUR LES CIMENTS

I.1.1 Introduction

Le ciment est un matériau de base dans les secteurs du bâtiment et du génie civil. Il est utilisé dans la fabrication du mortier, qui est le deuxième matériau le plus utilisé sur la planète. C'est un matériau de construction durable, versatile et totalement recyclable.

Le ciment est fabriqué dans plus de 150 pays dans des centaines d'usines locales. Sa production progresse régulièrement depuis le début des années cinquante. Elle ne cesse d'augmenter dans les pays en voie de développement en particulier en Asie qui constitue le grand producteur de ciment pendant la dernière décennie.

Cette augmentation de productivité est due à l'utilisation de la technologie (unités de production de plus en plus grandes, la mise en œuvre de la conduite automatique des procédés) et à l'utilisation d'un personnel moins nombreux mais plus qualifié requis par cette automatisation [1].

I.1.2 Définition

Le ciment est une matière pulvérulente formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante capable d'agglomérer, en durcissant des substances variées. Son emploi le plus habituel est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable et des graviers (granulats) pour donner le béton. Comme définition physique, le ciment est un liant hydraulique se présentant sous forme de poudre fine qui est à base de calcaire et d'argile utilisé qui fait prise par ajouts d'eau. Il durci rapidement et atteint en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. [2]

Les ciments courants sont élaborés à partir d'un mélange d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile, mélange qui est progressivement chauffé à une température voisine de 1450°C, puis brusquement refroidi. Au cours de ces opérations, s'enchaînent plusieurs réactions chimiques. Il en résulte le clinker qui, mélangé avec du gypse et éventuellement avec d'autres produits, puis finement broyé, donne le ciment [3].



Figure I.1 : Le ciment [4]

I.1.3 Fabrication du ciment

Pour fabriquer du ciment Portland, on fait cuire à température très élevée (1450°C), dans un four rotatif, un mélange de pierre calcaire broyée 80% et d'argile 20% (ou de matériaux similaires). La pierre calcaire fournit la chaux, et l'argile fournit principalement la silice et l'alumine. Le produit obtenu à la sortie du four s'appelle clinker. Le ciment Portland est ensuite fabriqué en ajoutant au clinker pulvérisé (grosseur des particules varie à peu près entre 1 et 80µm) une faible quantité (5%) de gypse. [4]

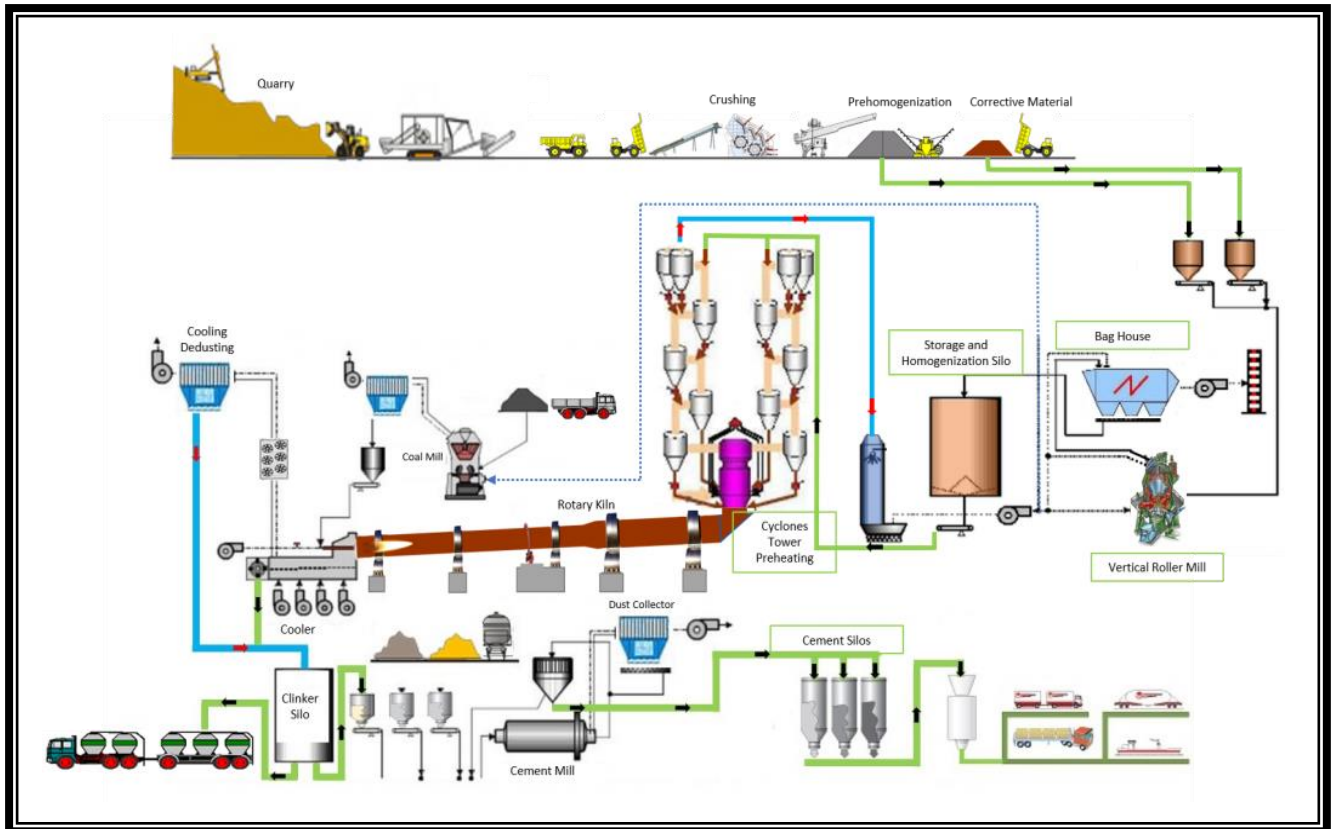


Figure I.2: Représentation schématique du procédé de fabrication du ciment

I.1.4 Principales catégories des ciments Algériens

Toutes les normes algériennes sont élaborées par : L'institut Algérien de Normalisation (IANOR).

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normales, selon l'arrêté interministériel du 3 Rabie Ethani 1424 correspondant au 4 juin 2003 portant sur les spécifications techniques et les règles applicables aux ciments. [5]

I.1.4.1 Classification des ciments en fonction de leur composition

Selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme Algérienne NA442 donne la classification suivante:

- * CEM I Ciment Portland Artificiel (CPA) ;
- * CEM II Ciment Portland Composé (CPJ) ;
- * CEM III Ciment de Haut Fourneau (CHF) ;
- * CEM IV Ciment Pouzzolaniques ;
- * CEM V Ciment aux Laitiers et aux Cendres.

Ces ciments diffèrent par le type d'ajout et sa teneur, incorporé dans le but de modifier certaines de leurs propriétés en raison des conditions d'environnement ou de performances mécaniques auquel ces ciments sont destinés. [4]

Tableau I.1: Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition [3]

		Composition (% en masse)											
		Constituants principaux										Constituants secondaires	
		Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres		Schiste Calciné	Calcaire			
					Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceuse	Calcaïque					
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL		
Ciment portland	CEM I	95 -100										≤ 5%	
Ciment portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20									≤ 5%	
	CEM II/A-S	65-79	21-35									≤ 5%	
Ciment portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94		6 - 10								≤ 5%	
Ciment portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94			6-20							≤ 5%	
	CEM II/B-P	65-79			31-35							≤ 5%	
	CEM II/A-Q	80-94				6-20						≤ 5%	
	CEM II/B-Q	65-79				21-35						≤ 5%	
Ciment portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94					6-20					≤ 5%	
	CEM II/B-V	65-79					21-35					≤ 5%	
	CEM II/A-W	80-94						6-20				≤ 5%	
	CEM II/B-W	65-79						21-35				≤ 5%	
Ciment portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94							6 - 20			≤ 5%	
	CEM II/B-T	65-79							21-35			≤ 5%	
Ciment portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94								6 - 20		≤ 5%	
	CEM II/B-L	65-79								21-35		≤ 5%	
	CEM II/A-LL	80-94									6 -20	≤ 5%	
	CEM II/B-LL	65-79									21-35	≤ 5%	
Ciment portland composé	CEM II/A-M	80-94	← 12-20 →										≤ 5%
	CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →										≤ 5%
Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	35-64									≤ 5%	
	CEM III/B	20-34	20-34									≤ 5%	
	CEM III/C	5-19	5-19									≤ 5%	
Ciment pouzzolanique	CEM IV/A	65-89		← 11-35 →								≤ 5%	
	CEM IV/B	45-64		← 36-55 →								≤ 5%	
Ciment composé	CEM V/A	40-64	18-30		← 12-20 →							≤ 5%	
	CEM V/B	20-38	20-38		← 21-35 →							≤ 5%	

I.1.4.2 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

La norme européenne NF EN 197-1, classe de ciment courant d'après leur résistance à la compression (résistance normale) déterminée conformément à la norme EN 196-1, mesurée à 28 jours en six classe de résistance selon le tableau. [6]

Tableau I.2 : Exigences mécaniques garanties des ciments selon la norme NF EN 197-1.

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32.5 L	-	≥ 12.0	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 N	-	≥ 16.0		
32.5 R	≥ 10.0	-		
42.5 L	-	≥ 16.0	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5 N	≥ 10.0	-		
42.5 R	≥ 20.0	-		
52.5 L	≥ 10.0	-	≥ 52.5	-
52.5 N	≥ 20.0	-		
52.5 R	≥ 30.0	-		

I.1.5 Caractéristiques chimiques du ciment:

A. Constituants du clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont [7]:

Tableau I.3 : Phases anhydres du clinker. [7]

Composés Chimiques	Formulation Chimique	Abréviation	Appellation minéralogique	Teneur Minimale(%)	Teneur Maximale(%)
Silicate tricalcique	3CaO SiO_2	C3S	Alite	50	70
Silicate bicalcique	CaOSiO_2	C2S	Bélite	10	30
Aluminate tricalcique	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C3A	Célite	2	15
Ferro aluminate Tetracalcique	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ Fe_2O_3	C4AF	Ferrite	5	15

B. La composition chimique du ciment portland est comme suit

Tableau I.4 : La composition chimique du ciment. [7]

Produit du cimentier	Formulation chimique	Abréviation	Mesure(%)
Silice	SiO ₂	S	17-25
Chaux	CaO	C	60-65
Alumine	Al ₂ O ₃	A	3-8
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	F	0.5-6
Gypse	CaSO ₄ +2H ₂ O	CSH ₂	3-5
Anhydrite	CaSO ₄	CS	-
Calcite	CaCO ₃	/	
Magnésie	Mgo	MgO	< 5
Trioxide de soufre	SO ₃	SO ₃	< 3

I.2 HYDRATATION DU CIMENT

Comme le ciment portland est un mélange hétérogène de plusieurs composés, son processus d'hydratation est un ensemble de réactions simultanées des substances anhydres avec l'eau [8]. Tous les composés ne réagissent pas de la même manière : les aluminates sont réputés pour réagir plus rapidement que les silicates, c'est pourquoi la rigidité (perte de consistance) et la prise caractéristique à la pâte de ciment portland sont généralement attribuées aux réactions des aluminates, alors que les silicates, constituant près de 75% du ciment ordinaire, jouent un rôle prépondérant dans le durcissement initial (taux de développement de résistance) du matériau.

I.2.1 Mécanisme et réactions d'hydratation:

Lorsque le ciment est au contact de l'eau, les réactions au cours du gâchage forment des CSH en libérant des ions Ca²⁺ et OH⁻, ces deux espèces se combinent et forment la portlandite. Comme on peut le voir, l'hydratation des silicates peut être séparée en cinq périodes distinctes : [9]

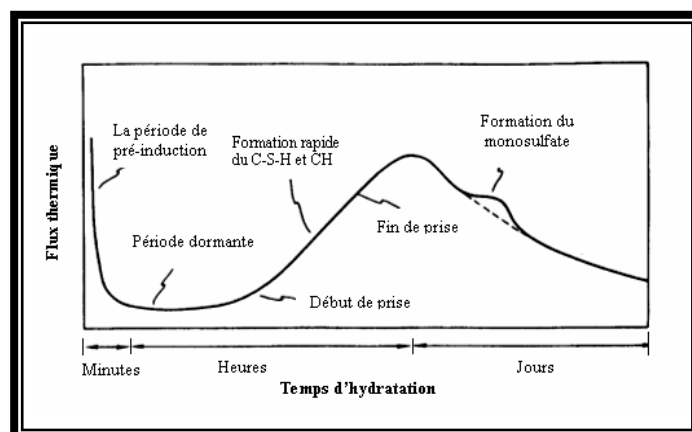


Figure I.3 : Flux thermique dégage par une pate de ciment Portland en cours d'hydratation.

☛ **Période 1 : réactions initiales** (réaction quasi-instantanée et fortement exothermique, provoquant un premier pic de dégagement de chaleur. Cette première réaction consomme moins de 1 % de C3S). Lorsque les silicates entrent en contact avec l'eau, les ions $(\text{SiO}_4)^{4-}$ qui sont en surface des grains passent en solution (sous la forme de complexes $(\text{H}_2\text{SiO}_4)^{2-}$ ou $(\text{H}_3\text{SiO}_4)^{-}$). La présence de ces ions fait alors augmenter la conductivité du milieu. Une couche protectrice de C-S-H se forme alors autour des grains ne permettant plus la réaction entre les silicates et l'eau.

☛ **Période 2 : (période d'induction)** Durant cette période (appelée aussi période dormante) il y a peu d'activité chimique, ce qui se traduit par un faible dégagement de chaleur (Cette étape permet notamment le transport du béton ou du mortier avant qu'il ne fasse prise) Durant cette période, la concentration en calcium croît alors que celle en silice décroît. La conductivité augmente toujours, mais plus faiblement que dans la 1ère période. Ainsi, il apparaît que des C-S-H dits métastables (C-S-H (m)) continuent de se former autour des grains de C3S alors que la portlandite ne précipite pas. Cette période peut varier considérablement d'un type de mélange à l'autre.

☛ **Période 3 : (période d'accélération)** Cette période est marquée par un fort dégagement de chaleur ce qui se traduit par une activité chimique intense. En général, c'est durant cette période que survient la prise. Deux types de réactions mènent à la formation des C-S-H dits stables (C-S-H (s)) et de la portlandite : soit par l'hydroxylation des C-S-H(m), soit par celle des C3S. La formation de ces hydrates fait diminuer les concentrations ioniques de la solution interstitielle, ce qui se traduit alors par une baisse de la conductivité.

☛ **Période 4 : (période de décélération)** La couche d'hydrates formée ne permet plus qu'une réaction d'hydratation par diffusion. L'eau diffuse dans le matériau afin d'atteindre les composants anhydres du système, ralentissant alors considérablement la cinétique d'hydratation. Ceci correspond sur la courbe à une diminution de la chaleur dégagée. De même que pour la 3ème période, plus les hydrates se forment, moins il y a d'ions dans la solution interstitielle, ce qui entraîne une diminution de la conductivité.

☛ **Période 5 : (période de consolidation)** Le ralentissement, dû au caractère diffusionnel de la réaction d'hydratation, peut s'étaler sur des mois ou des années. Cette période va permettre au béton de mûrir et à ses caractéristiques d'atteindre leurs valeurs maximales en terme de résistance ou de durabilité, la microstructure continue de se densifier. Les C-S-H ainsi que les cristaux de portlandite continuent de se former et de remplir la porosité.

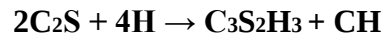
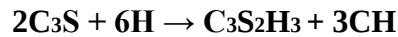
I.2.2 L'hydratation des composants du ciment

I.2.2.1 Hydratation des silicates C₃S et C₂S

L'hydratation des silicates tricalcique et dicalcique produit une famille d'hydrates de structure semblable mais de rapport C/S très variable ; il en est de même pour la teneur en eau combinée en général, les silicates de calcium hydratés produits sont peu cristallins et très poreux, présentant les caractéristiques d'un gel liquide. La stœchiométrie de ces composés est mal connue, leur structure varie avec la température, les proportions du mélange initial (rapport E/C) et l'âge d'hydratation.

Des études sur l'hydratation des alites en présence de gypse ont montré que le sulfate de calcium accélère l'hydratation du C₃S. Copeland et Kantro [10] reportent que l'hydratation à 1 jour est indépendante du degré de "gypsage", mais, à long terme 1 à 1,5% de SO₃ donne le degré d'hydratation maximum Bennir [11] lui aussi a reporté que la résistance à la compression et le degré d'hydratation des C₃S jusqu'à 48

heures sont indépendants du pourcentage de gypse introduit. Les réactions d'hydratation complètes des pâtes de C_3S et C_2S seraient :



Quand le C_3S est mélangé à l'eau, à la température ambiante, la réaction se complète en plus d'un an selon sa finesse. Il est maintenant admis que deux types de réactions se produisent [12] :

1- Une réaction en solution où les réactifs se dissolvent pour donner des ions en solution, qui vont se combiner pour former par précipitation de nouveaux produits.

2- Une réaction topo chimique qui se produit à la surface du solide anhydre sans passage en solution des réactifs. Le mécanisme d'hydratation du C_3S se subdivise en 4 principales étapes [13].

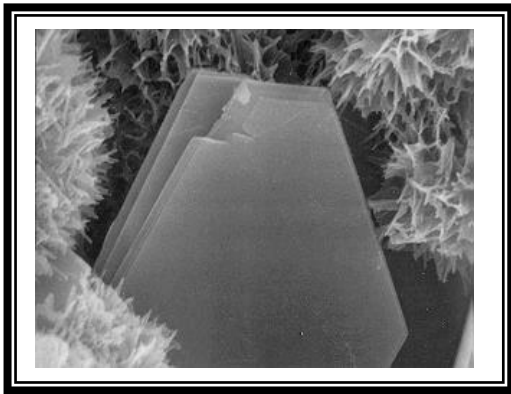


Figure I.4 : $Ca(OH)_2$ et CSH [16]

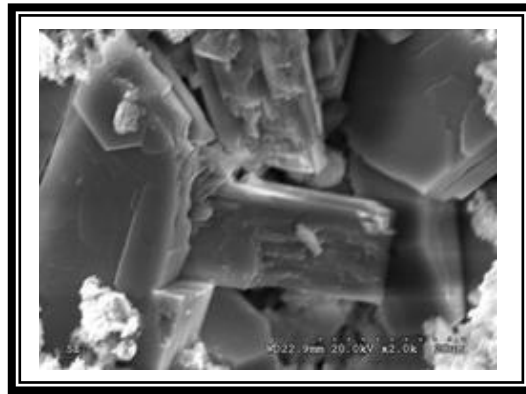


Figure I.5 : Cristaux de portlandite [16]

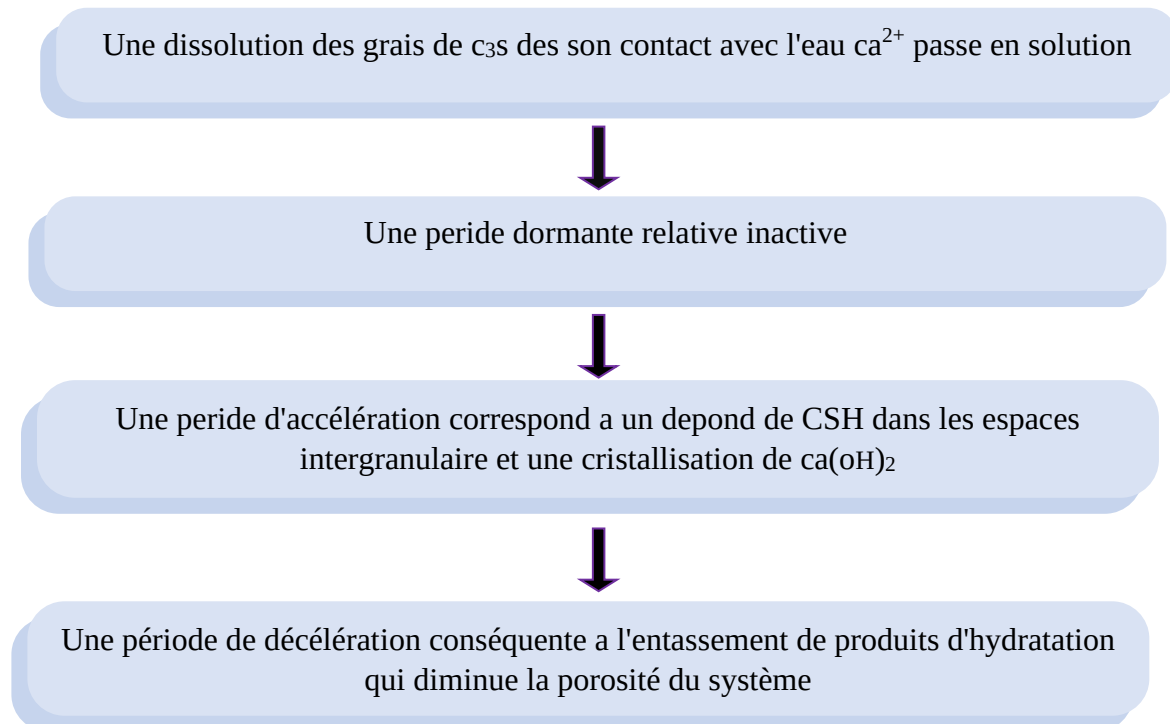
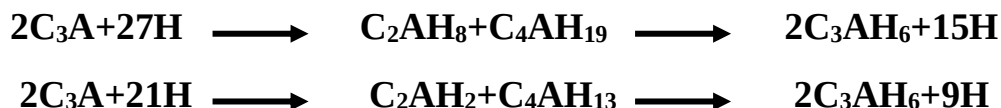


Figure I.6 : Organigramme de mécanisme d'hydratation du C_3S

I.2.2.2 Hydratation des silicates C3A

La phase aluminates composée de C₃A et C₄AF forme des hydrates, mais elle ne contribue que peu à la résistance de la pâte du ciment, elle est le responsable du phénomène dit de «prise éclair». L'hydratation du C₃A; qui conduit à la formation d'hydro aluminates métastables qui disparaissent au profit de l'hydrogénât C₃AH₆. Elle peut être représentée par les équations suivantes [14] :



Pour éviter ce phénomène (dite prise éclair), la réaction d'hydratation de C₃A et C₄AF doit être également contrôlée avec du gypse. Le C₃A et le gypse se dissolvent les premiers lors de l'hydratation du ciment. L'hydratation de C₃A conduit à la formation de trisulfoaluminate de calcium hydraté ou Étrangéité (3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.31H₂O) (figure 1.7). Le C₃A s'enrobe ensuite d'une couche protectrice d'Ettringite très finement cristallisée. Cette couche se dissout ensuite pour recrystalliser sous la forme d'aiguilles prismatiques [15]. L'ettringite n'est un produit hydraté stable que lorsque le gypse est en quantité suffisante. Or, dans la majorité des cas, le C₃A est en excès par rapport au gypse. C'est pourquoi, quand le gypse est consommé et que le C₃A n'est pas complètement hydraté, l'Ettringite se transforme en Monosulfoaluminate tétra calcique hydratés.

Le Monosulfoaluminate cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales. Sa structure est constituée d'une double couche d'hydroxyde avec une couche d'hydroxyde de calcium dans laquelle le tiers des ions calcium est remplacé par des ions Al³⁺ ou Fe³⁺ et des contre-ions sulfates entourés de molécules d'eau dans l'espace interfeuillet. L'ettringite et les Monosulfates représentent 20 à 30% du ciment hydraté. La vitesse de recrystallisation de l'ettringite est très faible. Cette particularité joue un rôle très important dans l'hydratation du ciment puisqu'elle permet de garder la maniabilité de la pâte dans les premières heures [15]. Les réactions d'hydratation sont comme suit :



De plus, si après la formation du Monosulfoaluminate tétracalcique il reste du C₃A, il se forme des composés de moins en moins riches en sulfate.

La phase ferrique C₄AF adopte le même mécanisme d'hydratation que la phase C₃A, les réactions sont cependant plus lentes, en présence d'eau et du gypse. L'hydratation de C₄AF est plus efficacement retardée que celle du C₃A.



Figure I.7: aiguilles d'ettringite [16]

Figure I.8: monosulfoaluminate hydraté [16]

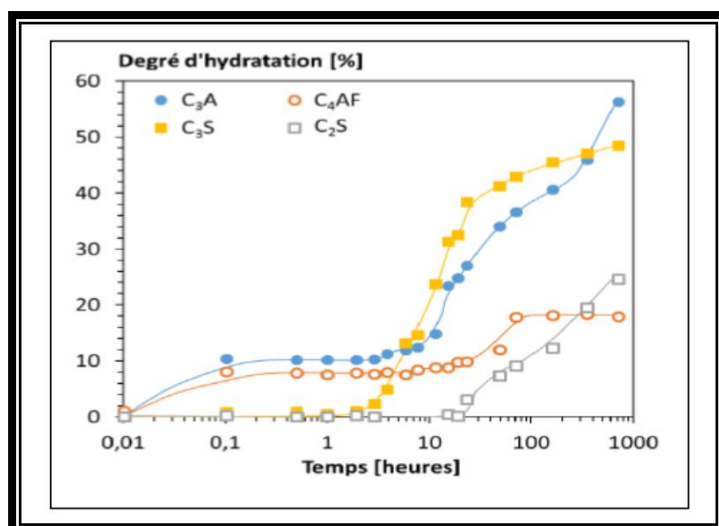


Figure I.9 : Degré d'hydratation des phases C_3S , C_2S , C_4AF et C_3A en fonction du temps [17]

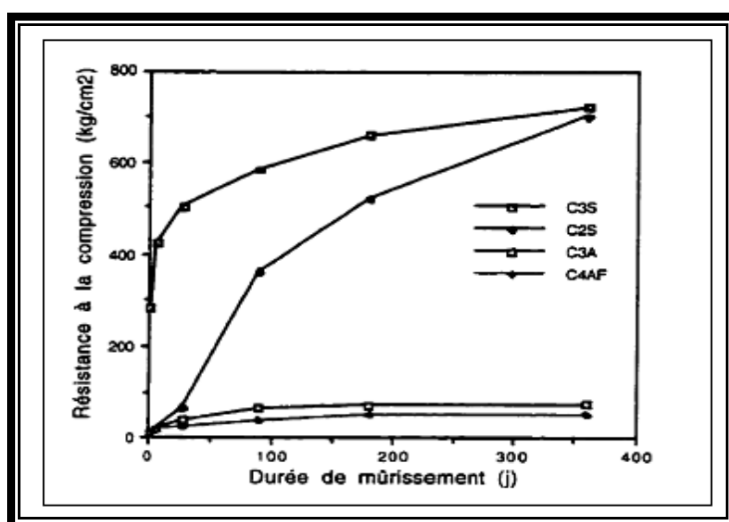


Figure I.10 : Comparaison de la résistance à la compression des Phases du ciment en cours d'hydratation [18].

Tableau I.5 : Principaux produits d'hydratation du ciment Portland

Dénomination	Formule chimique détaillée	Abréviation
Portlandite	$Ca(OH)_2$	CH
Silicate de Calcium Hydraté	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$	C-S-H
Trisulfoaluminate (AFt) ou ettringite	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$	$C_6AS_3H_{32}$
Monosulfoaluminate (AFm)	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$	C_4ASH_{12}
Aluminate tetracalcique hydraté	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$	C_4AH_{13}
Aluminate dicalcique hydraté	$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$	C_2AH_8
Aluminate tricalcique hydraté	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$	C_3AH_6

I.2.3 Chaleur d'hydratation

La dissolution des différents constituants est exothermique, plus de 500 joules par gramme de ciment sont libérés et selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus au moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C3A que l'on cherchera à utiliser par temps froid ou en préfabrication, alors qu'on aura intérêt à les éviter par temps chaud, cette chaleur à 12 heures, est de l'ordre de 300 j/g pour certains CPA-CEM I. [74]

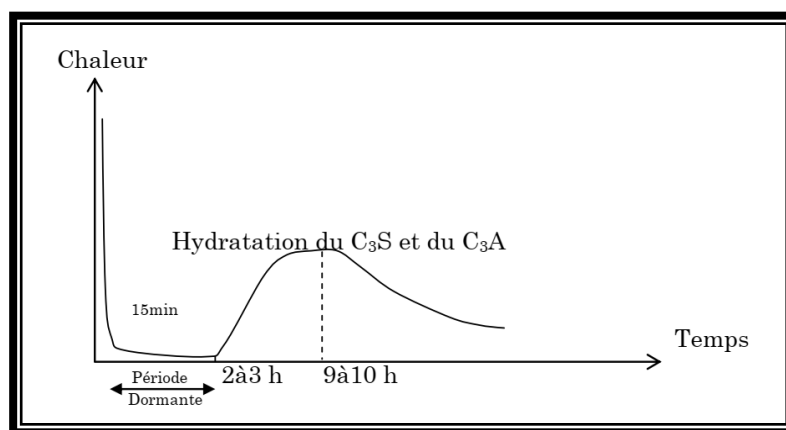


Figure I.11 : Chaleur d'hydratation du ciment

I.2.4 Finesse de mouture du ciment

La finesse a une relation directe avec presque toutes les propriétés physiques du ciment. La finesse de mouture, également appelée surface Blaine, exprimée en cm^2/g , représente la surface spécifique ou la surface développée d'une masse de 1 g de ciment, elle est d'une façon générale, comprise entre 3000 et 3500 cm^2/g . Plus la finesse est grande plus les résistances sont précoces et élevées avec une accélération de l'hydratation du ciment qui générera plus de chaleur d'hydratation ainsi une augmentation de la demande en eau, mais par contre, avec une finesse trop basse on obtient un béton avec une pauvre maniabilité, un ressuage excessif et par conséquent les risques de retrait et de fissuration sont accrus. [75]

I.2.4.1 Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine :

☛ **But :** Pour la détermination de la finesse du ciment ou bien le degré de broyage

☛ **Principe :** La finesse du ciment est mesurée en observant le temps mis un volume fixé d'air pour traverser un lit de ciment compact à une porosité spécifique à 0,5

☛ **Mode opératoire :**

Placer la grille au fond de la cellule, appliquer sur cette grille au moyen d'une tige à face intérieure plein un disque neuf de papier filtre. Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir. Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler couche supérieure du liant. puis placer sur celle-ci un autre disque neuf de papier filtre. Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule. Retirer le piston lentement. Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur. Enduire de vaseline la partie.

- L'unité de la surface spécifique de Blaine est cm²/g normes NA442/2000 :
- Ciment sans ajouts 2900 à 3000 cm²/g
- Ciment avec ajouts > 3500 cm²/g (paramètre technologique)

Rodé de la cellule et la placer sur son ajutage de lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartition la vaseline .Veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.

➤ Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que niveau du liquide atteigne la trait supérieur .Fermer le robinet .Mettre en marche un chronomètre sensible cinquième de seconde quand le niveau du liquide atteint le deuxième trait .l' arrêter quand le niveau atteint le troisième trait

Noter le temps écoulait de la

$$S = \frac{K \sqrt{e} \cdot \sqrt{t}}{p (1 - e) \cdot \sqrt{\mu}}$$

- S:surface spécifique (cm² /g)
- K:constante de l'appareille
- e :porosité de la couche tassé (0.5)
- ρ : masse volumique de grains
- μ : Viscosité de l'air a la température d'essai (en poises)

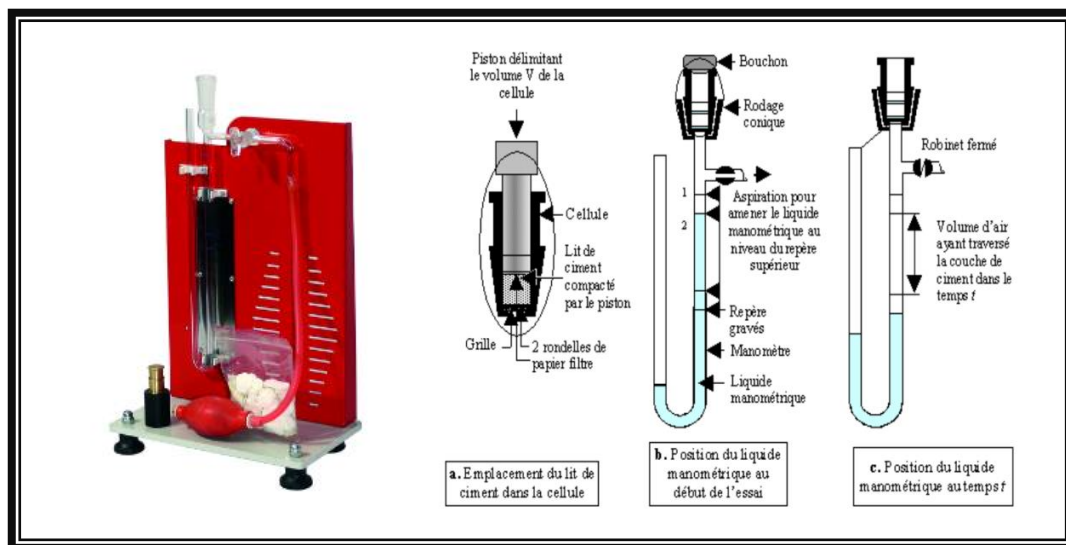


Figure I.12: Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine [76]

I.3 LES SABLES DE DUNES:

I.3.1 Introduction:

Les sables de dune sahariens ont fait l'objet depuis longtemps de campagne de reconnaissance et d'identification scientifique. Dès les années 50, des campagnes d'investigation menées dans le saharien algérien ont mis en évidence des provinces minéralogiques homogènes. Dans ces immensités désertiques, les sables sont caractérisés par une composition minéralogique et granulaire quasi similaires. Depuis et ce à ce jour, plusieurs investigations ont été tentées dans le but de l'utilisation de ce matériau surabondant dans le domaine de la construction, notamment en Algérie et en Afrique qui ont fait l'objet de travaux de recherche [28] (Figure I.13).



Figure I.13 : Les sables des dunes mouvants.

I.3.2 Définition de sable de dunes

Les sables présents dans les dunes mobiles (figure I.13) se caractérisent par des particules siliceuses de taille pratiquement uniforme et de dimensions réduites. Ces types de sables sont répandus dans diverses régions désertiques, formant des dunes mobiles de hauteurs variables qui occupent d'importants espaces, notamment dans le sud algérien. Le processus de triage granulaire, de déplacement, et d'accumulation de ces sables est largement influencé par la vitesse et l'intensité des vents [19].

La composition minéralogique du sable englobe divers minéraux tels que la silice, les silicates, les carbonates, et les argiles, avec une prédominance des silicates qui constituent la famille minérale la plus abondante dans la nature, représentant environ 90 % de la masse de l'écorce terrestre. Les sables des dunes se caractérisent principalement par leur pureté en silice, la présence de carbonates et d'argiles étant à l'état de traces.

I.3.3 Qu'est-ce qu'une dune ?

Une dune est un relief ou un modelé composé de sable. Une dune présente un profil transversal dissymétrique avec une pente douce du côté du vent et une pente plus raide du côté terre. La dune bordière délimite le haut de la plage par un bourrelet sableux de un à quelques mètres de haut. Sa base correspond à la haute mer et peut être endommagée lors des tempêtes. En arrière de ce premier cordon, on peut voir se développer un champ de dunes montrant des formes différentes : dunes alignées, dunes paraboliques, dunes en râteau... plus ou moins fixées par la végétation. [20]

I.3.4 L'emplacement géographique des dunes de sable

La figure I-3 offre une représentation cartographique détaillée, indiquant avec précision l'emplacement géographique des dunes de sable situées dans la région d'Oued Souf. Cette illustration permet une visualisation claire et informative de la répartition spatiale de ces caractéristiques naturelles spécifiques au sein de cette région donnée.

Le sable des dunes, présent en abondance dans le Sahara, occupe plus de 60 % de la superficie de l'Algérie. Ces dunes ont récemment attiré une attention croissante en tant que matériau de construction, comme en témoignent plusieurs études [22–23].

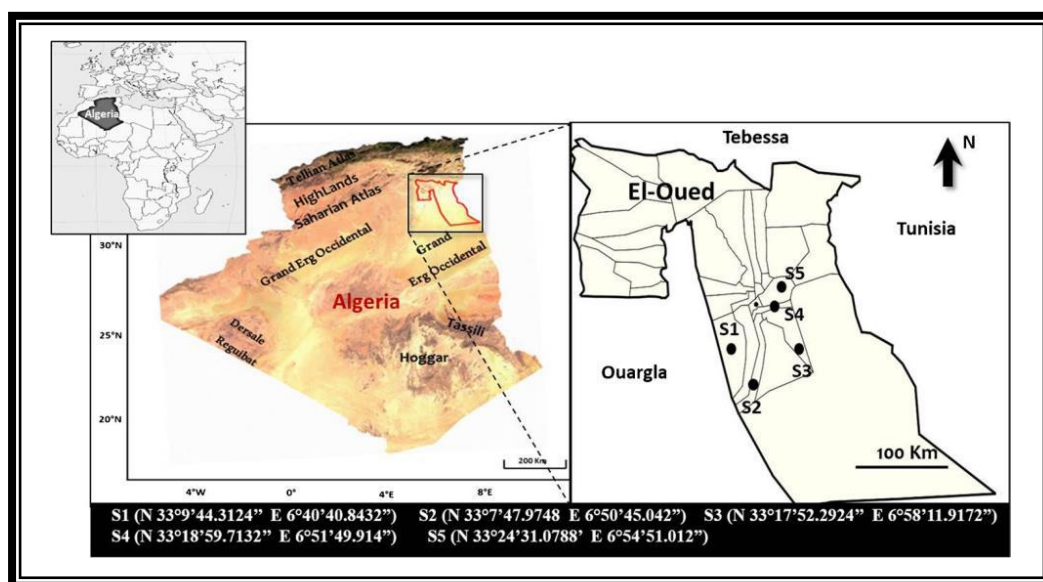


Figure I.14 : Carte de l'Algérie montrant la localisation des SD d'El-Oued [21]

I.3.5 Analyse chimique par rayons X dispersifs en longueur d'onde fluorescence de sable des dunes:

L'analyse des échantillons de sable de dune étudiés (S1,S2,S3,S4 et S5) par WDXRF sont présentés dans le tableau I-1. Nous soulignons que tous les échantillons de sable ont des teneurs élevées en silice. (SiO) qui variait de 87,10 à 94,24 % et de faibles quantités d'oxyde de calcium (CaO) [21].

Tableau I.6: Analyse chimique des échantillons de sable d'El-Oued [21].

Sample	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	Zn (%)	Sr (%)	Zr (%)	Ba (%)
S1	94.24	1.96	2.77	0.27	0.46	0.26	-	-	0.003	0.005	0.020
S2	91.95	4.37	2.82	0.37	0.44	-	-	0.007	0.005	0.010	0.020
S3	88.21	8.90	1.72	0.36	0.34	0.42	-	0.020	0.007	0.004	0.024
S4	88.71	7.36	1.50	0.29	0.30	0.37	1.40	0.018	0.007	0.005	0.030
S5	87.10	8.79	1.68	0.36	0.34	0.42	1.25	0.020	0.008	0.003	0.020
Sample	SiO₂/Al₂O₃	Fe₂O₃ + MgO(%)			Al₂O₃/SiO₂	Al₂O₃ + Na₂O + K₂O(%)				CIA	CIW
S1	34.03	0.53			0.029	3.23				58.56	58.56
S2	32.61	0.37			0.031	3.26				39.22	39.22
S3	51.28	0.78			0.019	2.06				16.20	16.20
S4	59.14	0.66			0.017	3.20				14.62	14.62
S5	51.85	0.78			0.019	3.27				14.33	14.33

I.3.5.1 Répartition granulométrique du sable d'El-Oued [21].

La distribution granulométrique d'un sable donné est un paramètre textural crucial pour déterminer son adéquation à diverses applications il peut fournir des informations sur les conditions de transport, de tri et de dépôt du sable étudié. Les courbes granulométriques des échantillons S1,S2,S3,S4 et S5 sont présentées sur la figure I-5b. Toutes les courbes présentaient des formes sigmoïdes similaires avec une légère variation entre les échantillons. On peut observer qu'environ 90 % en masse des grains sont uniformément répartis entre 160 et 400 μm , alors que les échantillons de sable S2 et S5 sont les plus inestimables parmi tous [24–25].

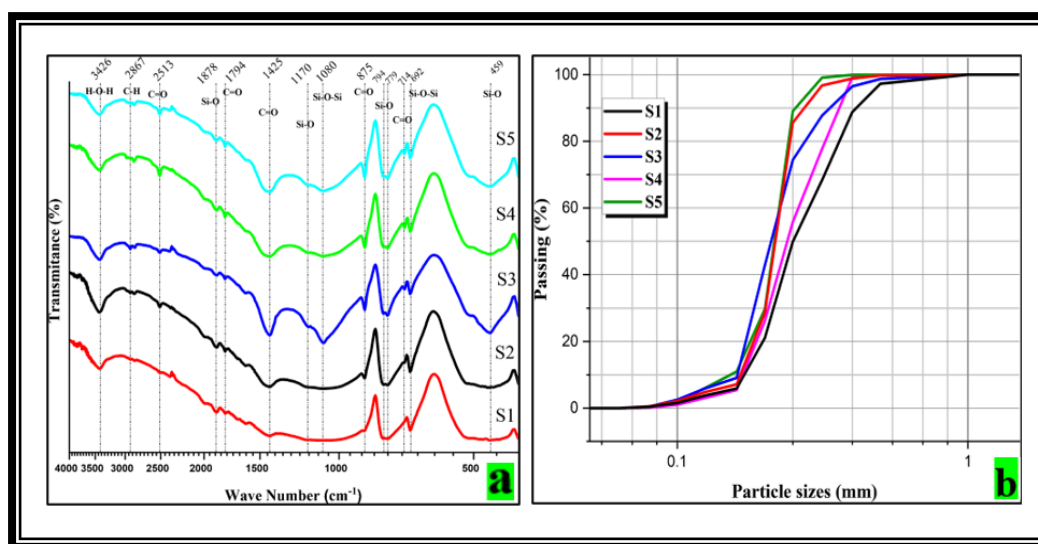


Figure I.15 : a) Spectres d'absorption FTIR et b) courbes granulaires des échantillons de sable d'El-Oued S1, S2, S3, S4 et S5, [21].

Des études physicochimiques, minéralogiques et thermiques du sable El-Oued du désert algérien ont été réalisées à l'aide d'analyses granulométriques, FTIR, XRF, XRD, SEM/EDX et TG-DTA. Nos résultats indiquent des sables bien triés et de taille fine à moyenne. Le SEM et le traitement logiciel ont montré que les grains de sable d'El-Oued sont bien arrondis en raison de l'environnement éolien avec un long transport et des altérations chimiques significatives.

L'analyse chimique par XRF, FTIR et EDX a montré des teneurs élevées en silice (94,24%) avec des impuretés subordonnées (carbonates et autres oxydes mineurs tels que Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , MgO). Ceci a été confirmé par la technique XRD. En outre, la taille des cristallites de quartz dans tous les échantillons de sable est comprise entre 331 et 3637 nm. L'analyse thermique (TG-DTA) a montré que le sable d'El-Oued était relativement stable jusqu'à 800 °C. La taille nanométrique des cristallites est favorable à la nanotechnologie et à d'autres applications industrielles.

Ces caractéristiques physicochimiques suggèrent que ces sables peuvent être extraits pour le béton, la fonderie, l'industrie céramique et le stockage de l'énergie solaire, mais pas pour la fabrication du verre. Par conséquent, ces utilisations potentielles encouragent l'exploitation et l'exploration des dunes de sable en tant que géo ressources locales, contribuant ainsi directement au développement durable de la région géologique, directement au développement durable du secteur des géo matériaux en Algérie [21,26].

I.3.5.2 Morphologie et analyse EDX [8]

La technique EDX permet une analyse semi-quantitative des éléments chimiques présents dans les grains d'échantillons de sable voir (Figure I-16). Chaque point sur la figure représente la composition élémentaire EDX des grains sélectionnés dans les échantillons de sable de la région d'El-Oued. Les résultats indiquent que l'oxygène et le silicium sont les principaux composants dans tous les échantillons, avec une abondance accrue dans les échantillons S1 et S5. Ces observations suggèrent que la silice (SiO_2) prédomine comme minéral principal dans tous les échantillons de sable d'El-Oued. Toutefois, une faible proportion d'aluminium ($\leq 8,7\%$) a été détectée dans presque tous les grains de sable, confirmant la présence d'une certaine quantité d'aluminium dans le quartz.

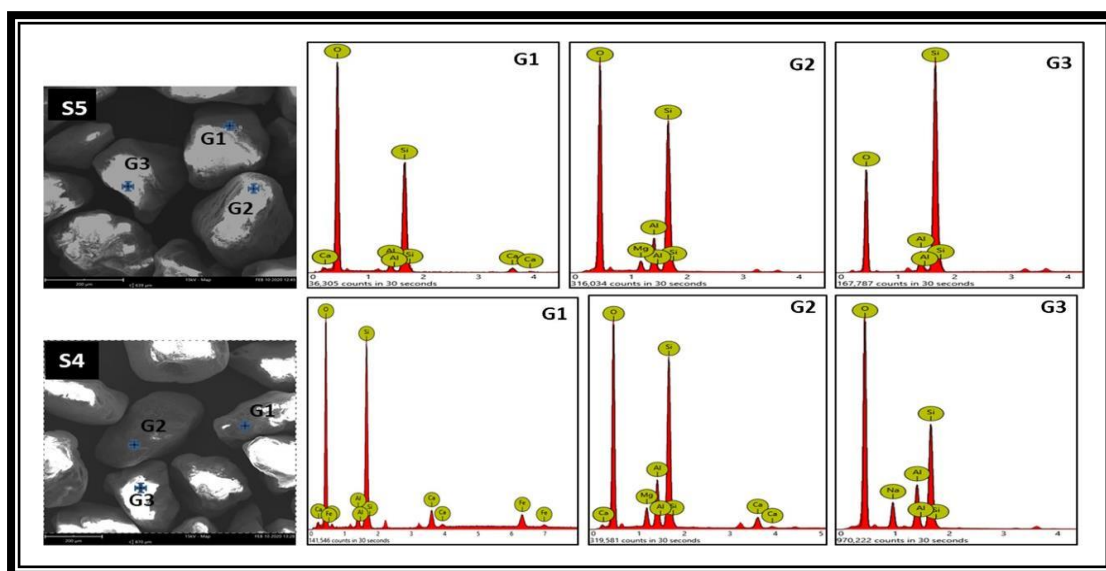


Figure I.16 : Analyses EDX des grains de sable S4 et S5 [21].

I.3.5.3 Minéralogie du sable d'El-Oued [8]

La figure (I-17) présente les diffractogrammes des échantillons de sable S1, S2, S3, S4 et S5 de la région d'El-Oued, révélant un caractère cristallin élevé pour tous, en accord avec les résultats de [27]. L'identification des minéraux a été effectuée à l'aide du programme X'Pert High Score et des cartes JCPDS.

Les ajustements Rietveld des modèles XRD permettent une évaluation semi-quantitative des principales phases cristallines des échantillons de sable. Les paramètres microstructuraux tels que le groupe d'espace, les paramètres de réseau, la taille des cristallites et la micro déformation ont été déterminés et synthétisés. L'analyse semi-quantitative révèle que le quartz α à structure hexagonale (P3₁21 (154)) est la phase dominante dans tous les échantillons de sable, avec un ratio le plus élevé de 93,5 % pour l'échantillon n°1.

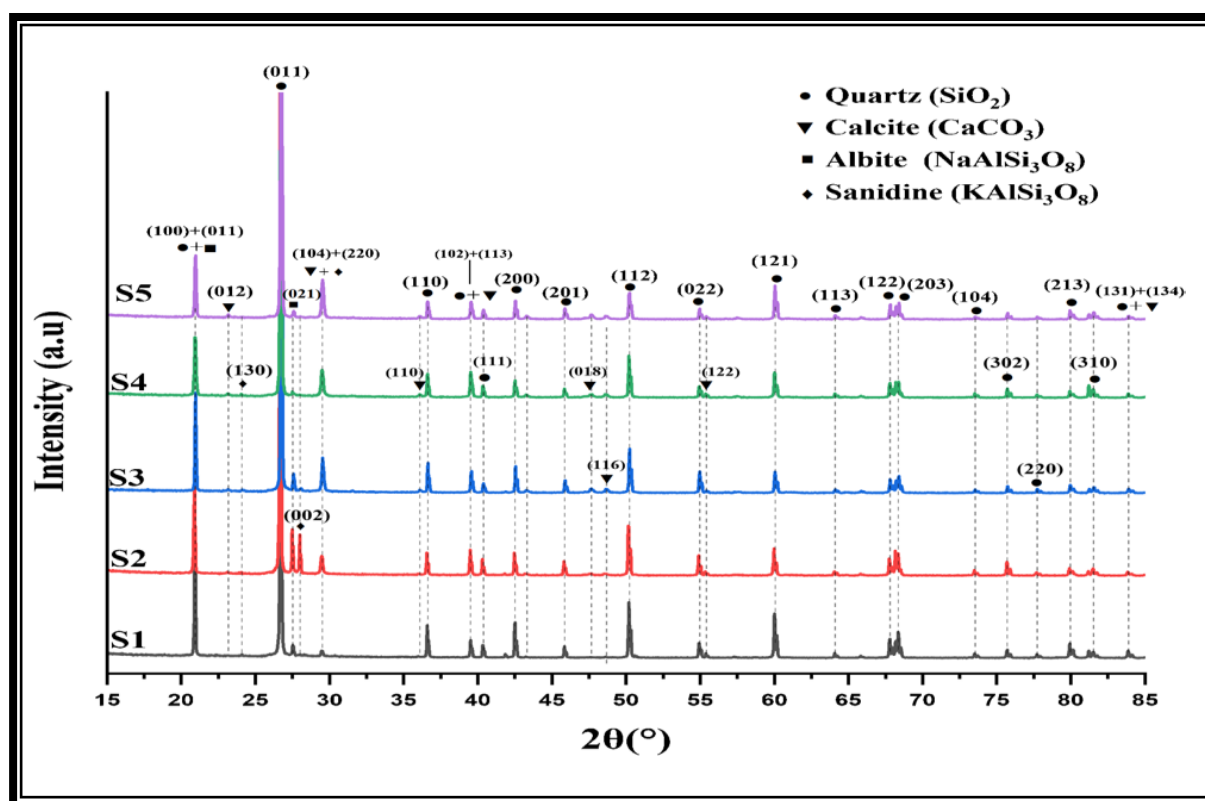


Figure I.17 : Modèles XRD des échantillons de sable d'El-Oued [21].

I.3.6 Rôle de sable dans le mortier :

L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécaniques, de plus, sa disponibilité et son aspect esthétiques (couleur). Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide [40].

I.3.7 Exigences sur le sable d'usage général :

Le sable doit être siliceux, silico-calcaire ou même calcaire à condition que les grains ne soient pas friables. Il doit être propre, c'est-à-dire dépourvu d'impuretés susceptibles de compromettre la qualité du mortier en œuvre (argile, vase, terre végétale, plâtre, sels minéraux, matières organiques). Le degré de propreté du sable est mesuré par l'essai d'équivalent de sable, L'indice fourni par cet essai (ESV) doit être inférieur à 75%. Il est préférable d'utiliser des sables roulés de rivière. Les sables de carrière conviennent s'ils ne renferment pas d'impuretés nocives. Les sables de mer doivent être lavés (sinon ils sèchent mal et peuvent donner lieu à des efflorescences en raison des sels qu'ils contiennent). La granulométrie des sables doit être limitée à 4mm. En général, les dosages du mortier sont exprimés en poids de liant par m³ de sable sec. Or, le plus souvent, sur le chantier, le sable renferme un certain pourcentage d'eau (pouvant varier de 0% à 20 %) et il suffit de très peu d'eau pour que le poids du m³ de sable soit modifié, c'est le phénomène bien connu du foisonnement du sable [40].

I.4 CERAMIQUE :

I.4.1 Définition :

Les céramiques sont des matériaux inorganiques, non métalliques, nécessitant de hautes températures lors de leur fabrication. Il s'agit en général d'oxydes métalliques, et plus généralement de métaux oxydés, mais pas uniquement. Les céramiques ont en général une structure cristalline, parfois associée à une phase amorphe. Lorsque la majorité est amorphe, on parle de vitrocéramique ; lorsque la totalité est amorphe, on parle du verre. [46-47].

La plupart des céramiques sont des matériaux polycristallins, c'est à dire comportant un grand nombre de microcristaux bien ordonnés (grains) reliés par des zones appelées (joins de grains) comme illustré en Figure 2.1 [48].

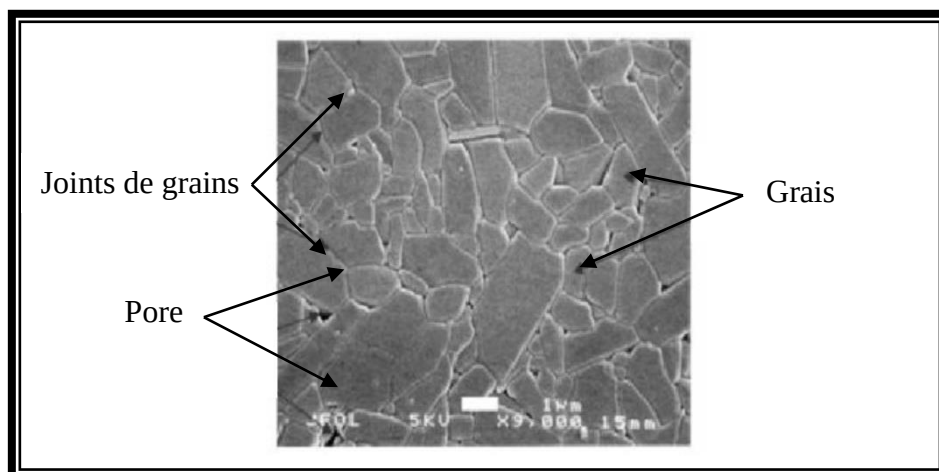


Figure I.18 : Microstructure typique d'une surface céramique

I.4.2 Propriétés Générales Des Céramiques :

I.4.2.1 Liaison et Structure

Les éléments qui entrent dans la composition des céramiques sont liées entre eux par des liaisons fortes, covalentes ou ioniques, et forment des composés hétéropolaires. Les liaisons ioniques et covalentes impliquent tous les électrons libres [49],

I.4.2.2 Microstructure et propriétés

Les propriétés mécaniques des céramiques dépendent, dans une large mesure, des matières premières employées, ainsi que des méthodes de fabrication qui fixent les microstructures finales et déterminent la répartition des différentes phases présentes.. [50-51]

I.4.2.3 Propriété chimiques

(réaction chimique, gonflement) : solvants organiques et pH extrêmes.

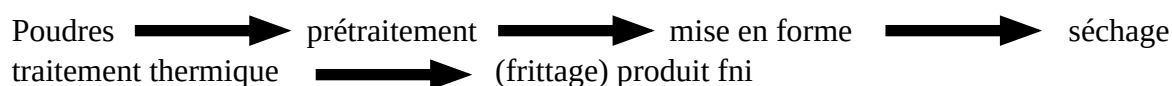
- Hautes pressions et de hautes températures

-Microbiennes : Leurs limites sont liées à leur difficulté de synthèse et aux coûts élevés

I.4.3 Élaboration des céramiques :

L'élaboration est spécifique à chacune des familles de matériaux céramiques, celles-ci se distinguant précisément par leur mode d'élaboration. . [52-53]

☛ **frittage** : Quand l'un des composants reste à l'état solide lors de la cuisson, il a lieu avec ou sans formation de phases vitreuses selon qu'il y a fusion ou non d'un ou plusieurs composants



☛ En revanche, quand il y a fusion de tous les composants, le procédé est appelé fusion c'est le cas des verres, des vitrocéramiques et des réfractaires électro fondus.

☛ **prise du liant** : En ce qui concerne les liants hydrauliques, les matériaux n'acquièrent pas leur cohésion par cuisson .

☛ Les céramiques sont élaborées selon l'ordre montré dans le tableau 4.1 ci-dessous.

Tableau I.7: Ordre des étapes selon lesquelles sont élaborées les céramiques.

Famille de céramiques	1ère étape	2ème étape	3ème étape
Céramiques traditionnelles ou techniques	Poudre	Mise en forme	Traitement thermique
Verres	Poudre	Traitement thermique	Mise en forme
Liants minéraux	Traitement thermique	Poudre	Mise en forme

I.4.4 Classification des produits céramiques:

On peut classer les céramiques selon leur application, selon leur mode d'élaboration et la forme finale et selon leur composition chimique : [54]

I.4.4.1 Selon leur application :

- ☛ Céramiques traditionnelles, à usage alimentaire, pour le bâtiment ou l'ornementation:
 - poterie, vaisselle, faïence, porcelaine, carrelage, briques, tuiles ;
- ☛ Céramiques techniques ou industrielles
 - Céramiques électroniques (faibles courants), ou céramiques fonctionnelles

I.4.4.2 Selon leur mode d'élaboration et la forme finale :

- ☛ produits façonnés : pièce livrée sous sa forme définitive
 - Pièces frittée sous pression atmosphérique,
 - Pièce frittée sous pression (HIP)
 - Pièce électro fondue.
- ☛ Produits non façonnés (PNF) :
 - Produit livré sous la forme de mortier destiné à être coulé ou projeté puis « cuit » sur place,
 - protection thermique de céramique pour revêtir une pièce.

I.4.4.3 Selon leur composition chimique :

☛ monolithiques :

➤ Oxydes :

- Produits siliceux (SiO_2),
- Produits alumineux, avec 30 à 100 % d'alumine (Al_2O_3) :

aluminosilicates (argile, mullite), alumine-oxyde de chrome-silice (ACS), haute teneur en alumine,

➤ Produits basiques, à base de magnésie (MgO), ou non-oxydes :

- Carbures
- Nitrures

☛ composites : matrice céramique à renfort céramique, ou matrice céramique à renfort métallique.

I.4.5 Les compositions céramiques [55]

I.4.5.1 La poudre

Elle est commercialisée en plusieurs formules selon la translucidité, Opaque, Dentine, Émail, Des poudres correctrices (poudre à maquillage) Elle est essentiellement composée

- ☛ Silice : 55 ~ 70%
- ☛ L'alumine : 12 ~ 15%
- ☛ Des oxydes
- ☛ Des colorants

I.4.5.2 Le liquide

- ☛ L'eau distillée

a- Céramiques classiques :

Tableau I.8: composition de la céramique classique

Composition	Argile	Kaolin	Feldspath	Craie	Talc	Quartz
Grès	80	-	-	-	-	20
Faïence	50	-	20	20	20	30
Porcelaine dure	3	42	25	5	-	25
Vitréous	50	-	25	-	-	25

b- Produits électrotechniques :

Tableau I.9: Produits électrotechniques

Composition	Argile	Kaolin	Feldspath	Craie	Talc	Alumine	Carbonate
Stéatite	-	5	-	-	80	-	20
Porcelaine	3	42	25	5	-	25	-
alumineuse	-	-	-	-	-	-	-
Produit alumineux	-	10	-	-	10	80	-
Vitréous	50	-	25	-	-	25	-

C- Produits réfractaires:**Tableau I.10:** Produits réfractaires

Composition	Argile	Chamotte	Cianite	Talc	Alumine	Carbonate
Silico alumineux	20	80	-	80	-	20
Mullite	-	-	80	-	20	-
Cordiérite	40	-	-	40	20	-

I.4.6 Les grandes caractéristiques des céramiques :

Les céramiques sont caractérisées par des liaisons fortes, ce qui se traduit dans la pratique par [56] :

- ☛ Une très bonne tenue en température.
- ☛ Une excellente rigidité élastique.
- ☛ Une bonne résistance à la corrosion.
- ☛ Une bonne résistance à l'usure.

I.5 LES DECHETS

I.5.1 Introduction

Depuis le regroupement des sociétés humaines dans des villes et des villages, les activités quotidiennes ont été sources de rejets de déchets. Qu'il s'agisse des excréments produits par tout être humain ou par les animaux d'élevages, de restes d'aliments non consommés, de sous-produits de l'artisanat puis de l'industrie, de biens de consommation généralisés par l'évolution socio- économique des dernières décennies, la ville a toujours cherché à gérer sa production de déchets solides et liquides.[30]

La notion de déchet recouvre aujourd'hui une réalité de plus en plus présente. Toujours plus nombreux en quantité, toujours plus importante et toujours plus difficile à faire disparaître, les déchets s'imposent parmi les réflexions politiques incontournables. La nature ou l'origine des résidus permettent de distinguer les catégories de déchets dont l'élimination sera encadrée par des réglementations distinctes. C'est aussi en fonction de la nature ou de l'origine des déchets que les différentes filières d'élimination devront être empruntées avec, comme priorité, de faciliter le recyclage et la valorisation.[31]

I.5.2 Définition d'un déchet:

Un déchet est un débris, un résidu considéré comme indésirable et sans valeur pour la personne qui s'en débarrasse. Le terme « déchet » revêt une signification particulière selon les pays, les cultures et même les personnes. Ainsi, un objet peut être sans valeur pour une personne et avoir une valeur pour une autre (un meuble antique mis au rebut par exemple)[32].

Des déchets est tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout objet, bien meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer [32].

I.5.3 Types de déchets

Il existe de plusieurs types de déchets fabriqués par une variété de processus.

I.5.3.1 Selon la réglementation algérienne:

☛ **Déchets ménagers et assimilés** : tous déchets issus des ménages ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles, commerciales, artisanales, et autres qui, par leur nature et leur composition sont assimilables aux déchets ménagers [33].



Figure I.19 : Déchets issus des ménages urbains individuels ou collectifs [80]

☛ **Déchets spéciaux:** tous déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toutes autres activités qui en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés et les déchets inertes [33].

☛ **Déchets spéciaux dangereux :** tous déchets spéciaux qui par leurs constituants ou par les caractéristiques des matières nocives qu'ils contiennent sont susceptibles de nuire à la santé publique et/ou à l'environnement [33].

☛ **Déchets inertes :** tous déchets provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et /ou à l'environnement [33].

I.5.3.2 Selon la nature:

☛ **Déchets dangereux:** les déchets dangereux sont les déchets issus de l'activité industrielle contiennent, en quantité variable, des éléments toxiques ou dangereux qui présentent des risques pour la santé humaine et l'environnement et qui de ce fait, nécessitent un traitement particulier, adapté à leur dangerosité. Un déchet dangereux présente une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : explosif, comburant, inflammable, irritant, nocif, toxique, cancérigène, infectieux, corrosif, mutagène, .. [34] (Figure I.11).

☛ **Déchets non dangereux:** les déchets non dangereux sont les déchets qui ne sont pas toxiques et ils ne constituent pas un risque sur la santé ou l'environnement parce qu'ils ne présentent aucune des caractéristiques relatives au degré de dangerosité. Ils sont principalement générés par les entreprises et les industriels, mais aussi par les collectivités et les ménages [35]. Le traitement de ces déchets permet de les transformer en matières réutilisables ou en matières premières secondaires et de limiter ainsi l'épuisement des matières premières [35].

*** Typologies des déchets acceptés:**

- Déchets Industriels Banals (D.I.B).
- Ordures ménagères résiduelles (O.M.R.).
- Encombrants.
- Emballages valorisables en mélange ou pré-triés.
- Bois A et Bois B.
- Déchets verts.
- Papiers, cartons.
- Verre.
- Déchets minéraux (sable, laitiers...).
- Déchets volumineux (laine de verre, polystyrène...).
- PVC (menuiserie).

☛ **Déchets inertes:** les déchets inertes sont les déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou nuire à la santé humaine [34].

☛ **Déchets ultimes:** déchets qui ne sont plus valorisables, ni par recyclage, ni par valorisation énergétique [18]. Un déchet résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux [36].

I.5.3.3 Selon l'origine:

☛ **Déchets ménagers et assimilés:** les déchets issus des ménages et tout déchet provenant des activités économiques, commerciales ou artisanales et qui par leur nature, leur composition et leurs caractéristiques, sont similaires aux déchets ménagers [33] (Figure I.12).

☛ **Déchets des Activités Economiques (DAE):** il s'agit de déchets d'entreprises qui s'apparentent, par leur nature et leur composition, aux déchets ménagers. La loi considère qu'ils sont « assimilables aux déchets ménagers » et peuvent ainsi être collectés et éliminés comme tels [37].

☛ **Déchets industriels:** tout déchet résultant d'une activité industrielle, agroindustrielle, artisanale ou d'une activité similaire; [38].



Figure I.20 : Déchets banals issus des activités industrielles [81]

☛ **Déchets médicaux et pharmaceutiques:** tout déchet issu des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, palliatif ou curatif dans les domaines de la médecine humaine ou vétérinaire et tous les déchets résultant des activités des hôpitaux publics, des cliniques, des établissements de la recherche scientifique, des laboratoires d'analyses opérant dans ces domaines et de tous établissements similaires.



Figure I.21 : Exemple des déchets de soin [82]

☛ **Déchets agricoles:** tout déchet organique généré directement par des activités agricoles ou par des activités d'élevage ou de jardinage (gazon, branchage...) ; [38] (Figure I.14).

☛ **Les déchets organiques:** les termes suivants recouvrent la même notion : déchets biodégradables ou compostables, les bio-déchets ou les déchets fermentescibles. Un déchet organique est tout déchet pouvant subir une décomposition biologique naturelle, anaérobie ou aérobie. Il s'agit de : (résidus verts, boues d'épuration des eaux, déchets organiques de la cuisine, journal, fleurs coupées...), Ces déchets peuvent être dégradés par les bactéries, champignons et autres micro-organismes et/ou par des réactions chimiques (oxydation, minéralisation). S'ils n'étaient pas contaminés (Figure I.15).

I.5.4 Cycle de vie d'un matériau dans le génie civil :

Le cycle de vie d'un matériau inclut les phases de [61,62] :

1. Extraction des matières premières ;
2. Production des constituants ;
3. Fabrication des matériaux et produits qui le composent ;
4. Matériels et engins nécessaires à sa réalisation ;
5. Distribution et transport jusqu'aux chantiers ;
6. Sa construction et sa vie en œuvre (exploitation, maintenance et entretien) ;
7. Et en fin de vie, sa disparition et déconstruction et la valorisation des matériaux.

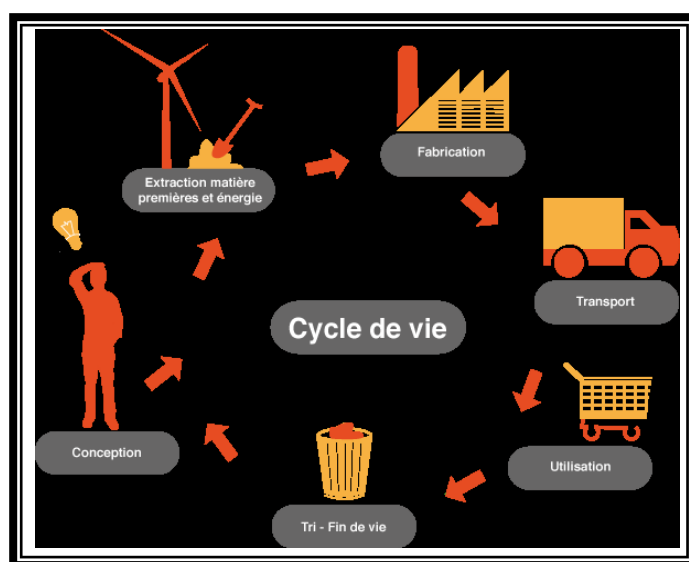


Figure I.22 : Schéma définissant le cycle de vie d'un matériau [62]

I.5.5 Avantages de la connaissance du cycle de vie d'un produit :

Le cycle de vie d'un produit passe par son analyse c'est pour ça qu'en parle de l'analyse du cycle de vie d'un matériau ACV. En effet, ACV est un outil d'évaluation et d'aide à la décision permettant l'évaluer l'impact environnemental d'un produit ou d'un service afin de définir des priorités d'action en matière d'environnement, et ce, en fonction de l'ensemble des mesures réalisables et des contraintes, notamment économiques. Parmi les avantages de la connaissance du cycle de vie d'un produit et par conséquent de ACV [62]:

➤ Améliorer leur empreinte environnementale grâce à l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), la Société de Toxicologie. L'ISO a déjà publié jusqu'à maintenant plus de 350 normes relatives à l'environnement et aux systèmes de management environnemental.

➤ Maîtriser au mieux les délais et les coûts de la fabrication d'un produit puisque la phase de planification et de conception qui permette de découper le projet en tâches, de décrire leur enchaînement dans le temps, d'affecter à chacune une durée et un effort à réaliser.

➤ Obtenir une qualité conforme aux exigences. Là aussi, il est également important de définir les normes qualité qui seront appliquées comme la méthode de conception choisie ou les règles qui régiront les tests.

➤ Maîtriser la communication qui sert comme appui à une démarche marketing lors d'un lancement de produits

➤ Le pilotage des projets qui permet le contrôle de la gestion des flux, matière et énergie d'un site

I.5.6 Evaluation des impacts environnementaux / Analyse de l'impact

Il s'agit d'évaluer l'impact sur l'environnement des émissions et extractions inventoriées pour déterminer quelles émissions contribuent à quel impact environnemental (effet de serre, toxicité humaine,...). Cette évaluation, se fait souvent avec certains logiciels (IMPACT 2002+, Ecoindicator 99,...) via des modèles référents, est réalisée pour chacun des flux entrants et sortants inventoriés. La figure II.2 illustre une évaluation globale des impacts environnementaux. Enfin, le tableau II.3 illustre les différentes catégories de dommage et d'impact qui sont répertoriés dans le logiciel IMPACT 2002 + [64,65].

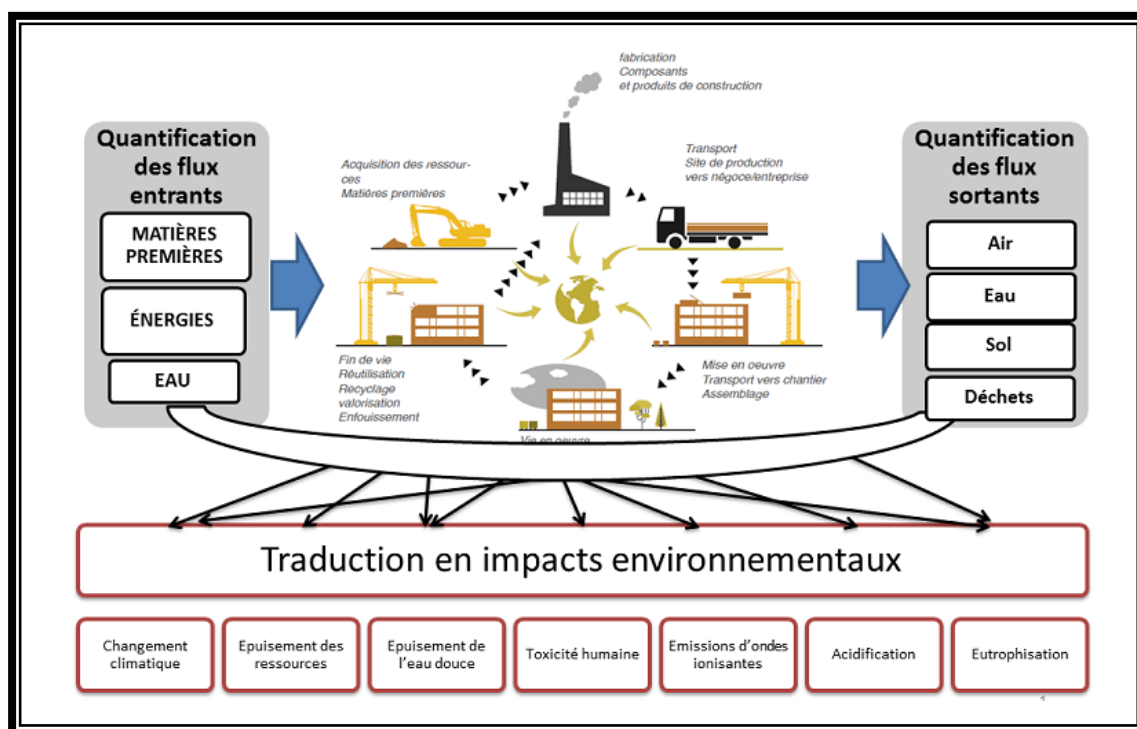


Figure I.23 : Evaluation des impacts environnementaux [64]

I.5.7 Développement durable

La notion du développement, telle qu'ont développé les économistes, tire son origine des sciences du vivant (le développement d'un organisme = évolution de l'état embryonnaire vers l'état adulte). La croissance, quant à elle, correspond, à un changement quantitatif (augmentation de la richesse d'un pays par exemple). Ces deux phénomènes ne sont pas nécessairement liés, il est possible d'observer une croissance économique sans développement réel de la société concernée et vice versa

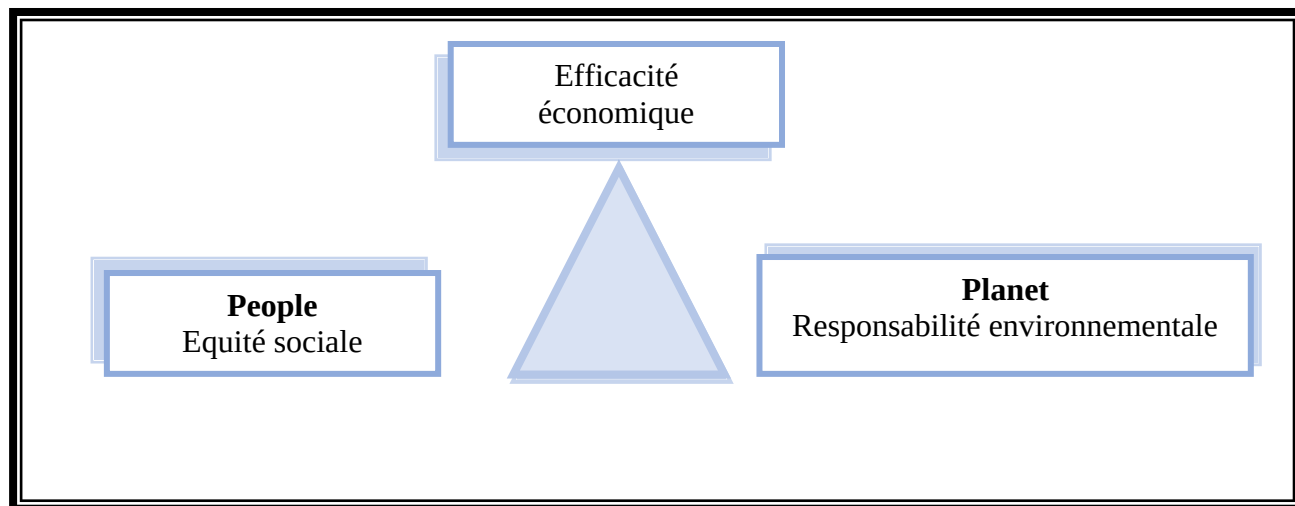


Figure. I.24 : Axes du développement durable [63].

Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs [63]. Ce dernier s'articule autour trois principaux axes qui sont :

- Efficacité économique,
- Equité sociale,
- Responsabilité environnementale.

I.5.8 valorisations dans le Génie Civil

I.5.8.1 Sous-produits industriels

La valorisation des sous-produits industriels participe à plusieurs enjeux importants : un enjeu économique régional ou local, un enjeu environnemental grâce à l'aménagement des sites d'exploitation concernés, et une diminution du recours à des produits issus de carrières éloignées. Les sous-produits industriels sont de différentes natures : laitiers de haut fourneau, scories d'aciéries et cendres volantes, etc. [63].

Chaque année, les activités du bâtiment et des travaux publics génèrent plus de 100 millions de tonnes de matériaux de démolition (cf. projet de note d'information de l'IDRRIM du 8 juin 2010) et

de déblais considérés, dans la plupart des cas, comme des déchets inertes. L'emploi de ces matériaux, aujourd'hui envisagé après leur dépollution et leur recyclage, a très vite été considéré comme une priorité, car cela présente au moins trois avantages majeurs que sont les économies de :

- Décharges (volume de stockage des déchets inertes) ;
- Carrières (ressources naturelles de granulats) ;
- Transport.

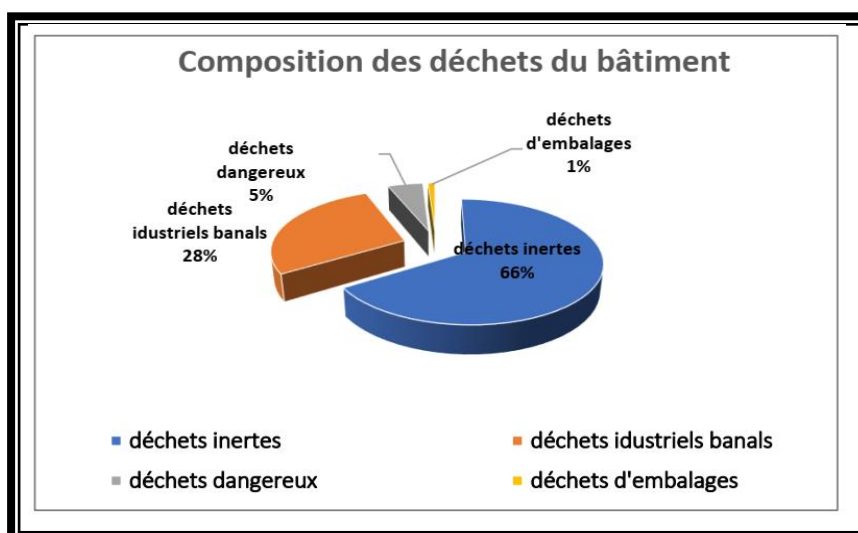


Figure I.25 : Composition des déchets du bâtiment [77]

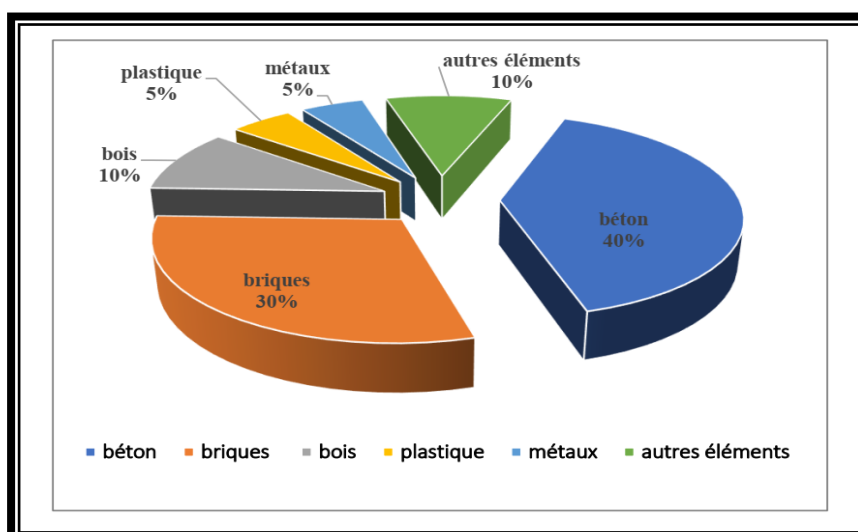


Figure I.26 : Répartition des quantités de déchets de chantiers ou de démolition [77]

I.5.8.2 Besoins du Génie Civil

➤ Matériaux

Sur lesquels présentent de faibles exigences et consommés en grande masse dans les remblais mais transportables sur de faibles distances en raison des coûts [63];

➤ Granulats

Qui doivent répondre à des spécifications diverses selon la place qu'ils occuperont dans les structures et les techniques de traitement utilisées. Les exigences de qualité peuvent à ce niveau devenir élevées, voire sévères pour les couches de surface (produits finis de qualité identique à celle des matériaux traditionnels) [63].

➤ Liants

Qui doivent répondre à des spécifications bien précises et dont les propriétés doivent rester constantes dans le temps. Employés en petite quantité et concurrentiels de produits coûteux (ciments, bitumes), et ils peuvent connaître des conditionnements préalables à l'emploi et supporter des coûts de transport plus élevés [63].

➤ Activants

Qui seront utilisés en petites quantités, ce qui peut poser des problèmes de collecte, stockage, distribution et régularité [63].

I.5.9 Déchets en Algérie :

Selon un rapport de la GIZ d'avril 2020, la quantité annuelle de déchets industriels en Algérie est estimée à 2 547 000 tonnes. Ces déchets sont répartis en quatre catégories principales :

- Les déchets d'emballages et de plastique, estimés à environ 1,2 million de tonnes par an.
- Les pneus usagés, dont la quantité est estimée à plus de 2 millions d'unités par an.
- Les déchets d'huiles et d'huiles lubrifiantes, dont la quantité est estimée à 110 000 tonnes par an.

Ces chiffres soulignent l'importance de développer des stratégies de gestion des déchets en Algérie, en mettant l'accent sur la récupération et la valorisation pour réduire l'impact environnemental et encourager le développement d'activités économiques dans ce domaine. [57]

I.5.10 Recyclage des déchets**I.5.10.1 Définition**

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent[5]. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés [78].

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- **Réduire**, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- **Réutiliser**, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- **Recycler**, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

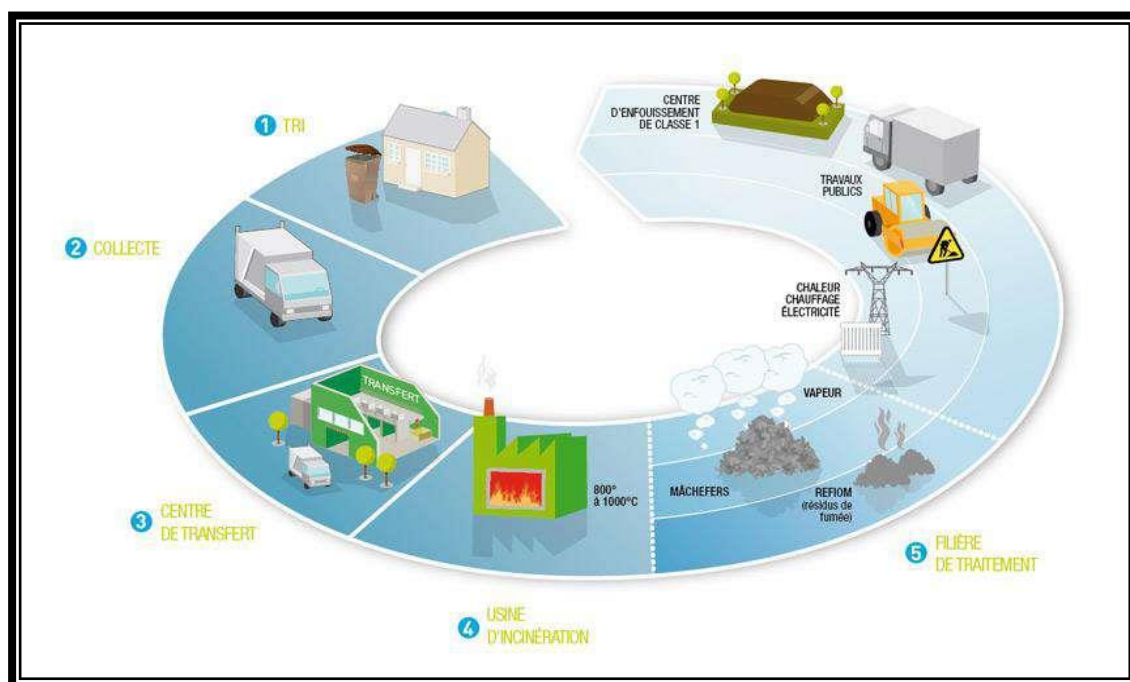


Figure I.27 :Recyclage des déchets[79]

I.5.10.2 Historique du recyclage en génie civil :

Le principe de recyclage des matériaux n'est pas nouveau puisqu'il a déjà été utilisé par les Romains. Le principe consistait notamment dans la destruction des statues des Dieux qui n'étaient pas vénérés et les matériaux récupérés servaient à en faire de nouvelles.

Devant le fait des villes sinistrées pendant et après la seconde guerre mondiale, le recyclage des matériaux s'est présenté comme une solution envisageable et a connu son début en Europe et plus précisément en Allemagne et en Grande-Bretagne. Les gravats provenant des bâtiments détruits par les bombardements étaient employés pour la reconstruction ; les granulats recyclés obtenus par ce recyclage comportaient une forte proportion de briques, du fait du mode de construction de l'époque[58].

A partir de 1975, les premières tentatives de recyclage ont débuté aux Etats-Unis, plus précisément dans le domaine routier, où les granulats recyclés provenaient du concassage de béton armé et non armé dans les couches de fondation de chaussées. La première utilisation réelle de béton recyclé était destinée aux sous couches des voies de circulation en Californie et la composition comportait du béton recyclé, de l'asphalte et de 8% de ciment. En 1976, la première réussite de l'utilisation d'agréats recyclés et celle d'un ancien béton de 41 ans d'âge pour la formulation d'un nouveau béton toujours de chaussée dans l'état d'Illinois suivi par d'autres projets similaires dans d'autres états de 1980 à 1985 [59].

I.5.10.3 Recyclage de déchets dans le domaine du génie civil en Algérie :

En Algérie, des bâtiments publics, des immeubles et des ponts sont démolis après des sinistres naturels comme le séisme et les crues ou simplement par le vieillissement. Les matériaux de démolition sont, pour l'instant, rarement recyclés. L'industrie de construction génère aussi une quantité importante de déchets C&D (briques et béton en particulier) qui est rarement valorisée.

Cependant, dans toutes les villes algériennes et surtout dans les grandes villes, va bientôt apparaître le besoin de démolir ou de déconstruire les anciennes bâtisses coloniales des années cinquante. La seule tentative de valorisation des déchets de démolition a été tentée en 1981. La ville algérienne d'El-Asnam (Chlef actuellement), a été secouée en octobre 1980 par deux tremblements de terre intenses qui l'ont quasiment réduite en un énorme tas de gravats. Face à quelques milliers de bâtiments (38% des bâtiments) qui devaient être démolis et par suite l'évacuation de plusieurs centaines de milliers de tonnes de débris, une opération pilote de recyclage de béton démolé a été menée avec l'aide du CSTC (Belgique), et a démontré qu'il était possible de recycler les débris de béton en blocs de construction de qualité convenables. Dans le but de pouvoir recycler le plus grand nombre de débris et d'adopter les conditions minimales, on a pu réaliser, suivant la composition choisie suivante, des blocs présentant des résistances acceptables (min : 2,1 MPa et max : 7 MPa) [60] :

- Débris de briques : 30%
- Débris de blocs de béton : 50%
- Débris de béton : 10% impuretés + débris divers (enduits, carrelages, etc.) : 10% [60].

I.6 DECHET DE CERAMIQUE:

I.6.1 Introduction :

Un déchet est tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon [66]. Il est défini comme inerte, selon la directive européenne 1999/31/CE du 26 avril 1999 [08], relative à la mise en décharge "s'il ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante"

Une partie des déchets du secteur du bâtiment et des travaux publics peut être recyclée sous forme de granulats. L'Est Var manque de sources de granulats. Certains déchets de démolition et déblais de terrassements peuvent être concassés et criblés en produisant des granulats de différents calibres utilisables dans les TP en sous couches de routes ou en produits de drainage. Les déchets du BTP contiennent aussi des parties non recyclables comme des déblais de terrassement argileux et marneux, des céramiques kaoliniques, des carreaux et tuiles et des plâtres (non encore récupérés). Ces déchets

considérés comme ultimes doivent être stockés en sites de Classe III, déchets inertes non dangereux. Nous manquons en pays de Fayence d'un tel site. Celui envisagé au vallon des Fréyères en zone Natura 2000 n'est pas adapté. [67]

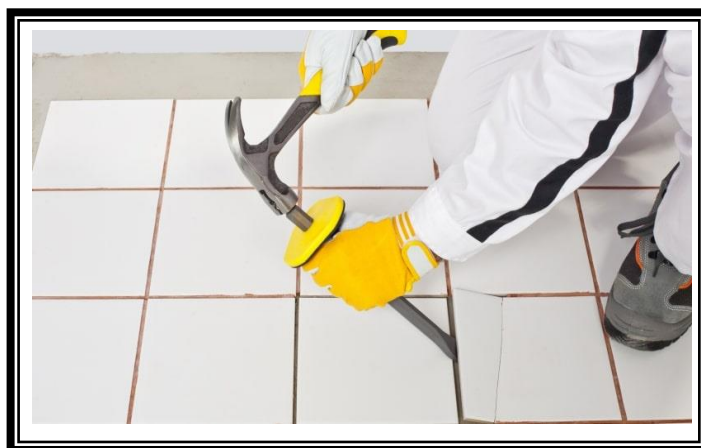


Figure I.28 : Déchet de céramiques

I.6.2 Influence des déchets céramiques sur les propriétés des matériaux Cimentaires :

Une partie des déchets provenant de l'industrie de la céramique et de la faïence peut être recyclée sous forme de granulats (Figure I.28). Plusieurs études ont été faites sur l'étude de l'effet de l'incorporation des déchets céramique (dalle de sol, faïence, brique.....) sur le comportement des matériaux cimentaire à l'état frais et durci [68].

I. 6.3 À l'États frais :

❖Maniabilité :

Abadou [69] a constaté que le remplacement de (0%, 10%, 20%, 30%, 40% et 50%) du sable naturel par les déchets de céramique rouge (MS : Mortier avec déchets céramique sanitaire et ME : Mortier avec déchets céramique faïence) entraîne un léger abaissement de la fluidité des mortiers. Pitarch et al. [70] ont constaté aussi que des quantités plus importantes de déchets céramiques (30 %), qui contenaient de plus grandes quantités de sable recyclé, ont légèrement diminué l'ouvrabilité du béton.

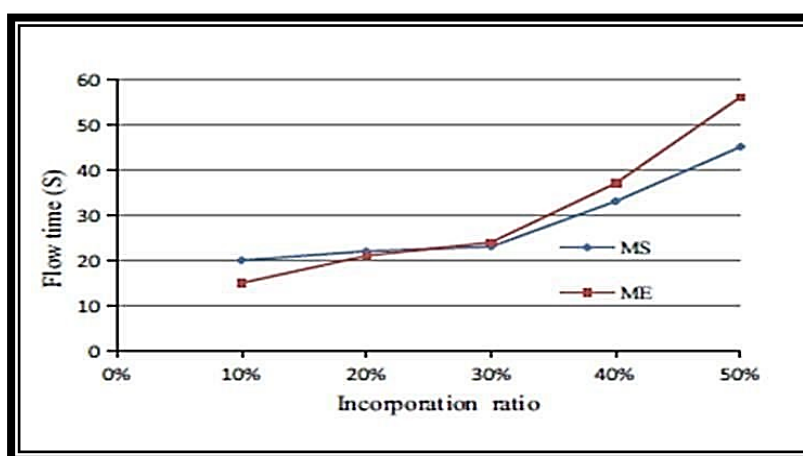


Figure I.29 : Effet de déchets céramique rouge sur la fluidité des mortiers [69].

❖Densité fraîche :

Alves et al. [71] ont étudié l'influence de substitutions de (0%, 20%, 40%, 60%, 80 et 100%) du sable par le déchet de céramique (SWC). Ils ont trouvé que plus le pourcentage de déchets de céramique augmente plus la densité diminue (Figure II.03). Ils ont expliqué cette diminution par la teneur en eau beaucoup plus élevée des mélanges qui contiennent les déchets de céramique.

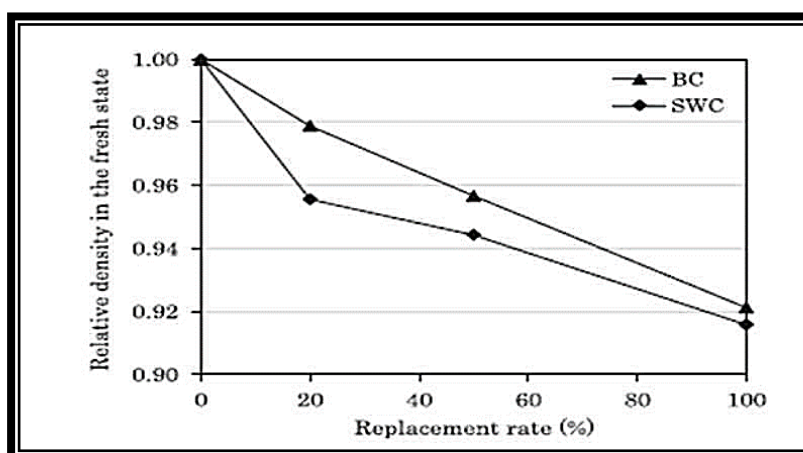


Figure I.30 : Effet de déchets céramique sur la densité à l'état frais de béton [71].

I. 6.4 À l'États durci :

❖ Résistance à la Compression :

Abadou [59] a étudié l'effet de remplacement de (0%, 10%, 20%, 30%, 40% et 50%) du sable naturel (MD : Mortier à base de sable de dune et MA : Mortier à base de sable alluvionnaire) par les déchets de céramique rouge (MS : Mortier avec déchets céramiques sanitaire et MF : Mortier avec déchets céramique faïence) sur la résistance à la compression du mortier du ciment. Les résultats montrent que tous les mortiers à base de déchets céramique ont une résistance mécanique plus importante que celle du mortier de référence (Figure II.03). Les résultats montrent aussi que les MD avec céramique sanitaire ont développé des résistances supérieures par rapport à ceux incorporant des déchets céramiques faïence.

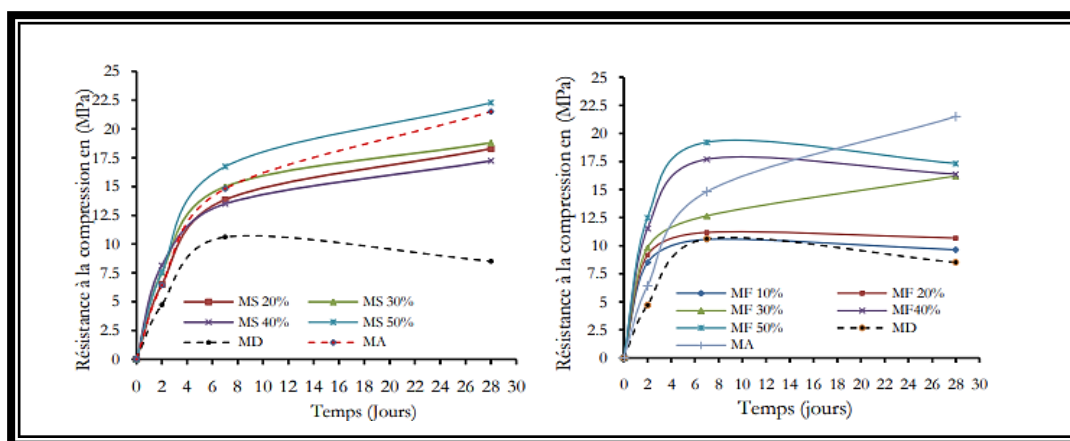


Figure I.31 : Effet de déchets céramique rouge sur la résistance à la compression des mortiers conservés dans l'eau [59].

Pitarch et al [70] ont trouvé que le béton élaboré avec les granulats TCW (déchets céramiques de tuiles) a développé les meilleurs résultats en matière de résistance à la compression, qui étaient maximale pour la substitution de 20 % en poids (Figure II.04). Ils ont constaté, bien que les valeurs de résistance aient légèrement baissé avec des quantités plus importantes de déchets TCW (30 % en poids), elles étaient similaires à celles obtenues pour le béton avec les granulats calcaires (RC). Ils ont conclu que la résistance à la compression des bétons recyclés de TCW a été partiellement attribuée à leur plus faible ouvrabilité par rapport aux bétons correspondants préparés avec la même quantité de déchets CSW (CSW Céramique sanitaire). Pour le béton élaboré avec les granulats CSW, Pitarch et al [70] ont trouvé que ces bétons recyclés ont développé des propriétés mécaniques similaires à celles des éprouvettes de référence (Figure I.32), qui diminuaient légèrement avec l'augmentation de la teneur en déchets.

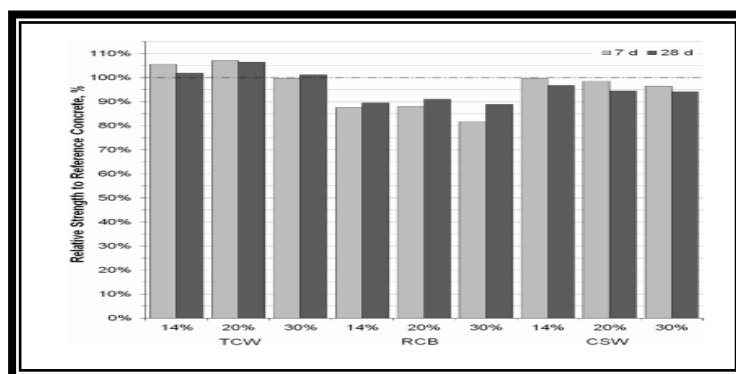


Figure I.32 : Effet de déchets céramique sur la résistance à la compression comparée au béton témoins RC [70].

Alves et al. [71] ont trouvé que pour les mélanges contenant des granulats de déchet de céramique sanitaires (SWC), une diminution considérable de la résistance à la compression avec une augmentation du taux de remplacement a été observée, pour tous les âges (Figure II.06). À 7, 28 et 56 jours d'âge, la perte maximale de résistance, par rapport au béton de référence, était de 49,8 %, 42,5 % et 34,9 %, respectivement. Ils ont constaté que cette réduction de la résistance à la compression est due à l'augmentation du rapport eau/ciment effectif avec le taux de remplacement, ce qui a contribué à la réduction de la résistance de la pâte [71].

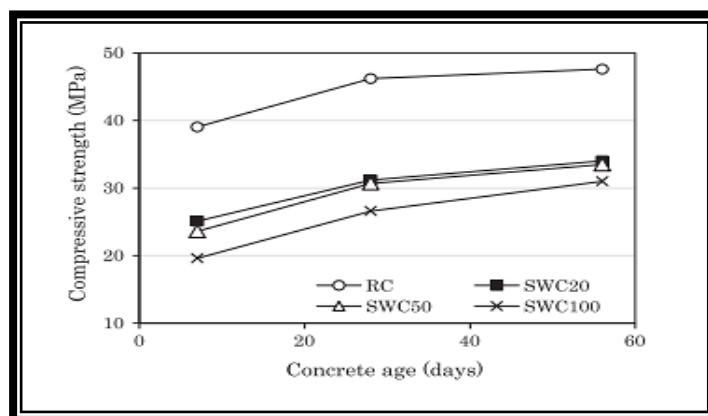


Figure I.33 : Résistance à la compression en fonction du temps pour tous les taux de remplacement des agrégats naturels fins par des agrégats sanitaires fins recyclés (SWC).

❖ Résistance à la flexion :

Abadou [69] a étudié l'effet de remplacement de (0%, 10%, 20%, 30%, 40% et 50%) du sable naturel (MD : Mortier à base de sable de dune et MA : Mortier à base de sable alluvionnaire) par les déchets de céramique rouge (MS : Mortier avec déchets céramiques sanitaire et MF : Mortier avec déchets céramique faïence) sur la résistance à la flexion du mortier du ciment. Les résultats montrent que tous les mortiers à base de déchets céramique ont des résistances à la flexion assez proches que celle du mortier de référence (Figure II.07). Les résultats indiquent que l'incorporation des déchets céramiques a une influence très peu significative sur la résistance à la flexion et que la nature d'addition semble être un paramètre plus important que le taux de substitution [69].

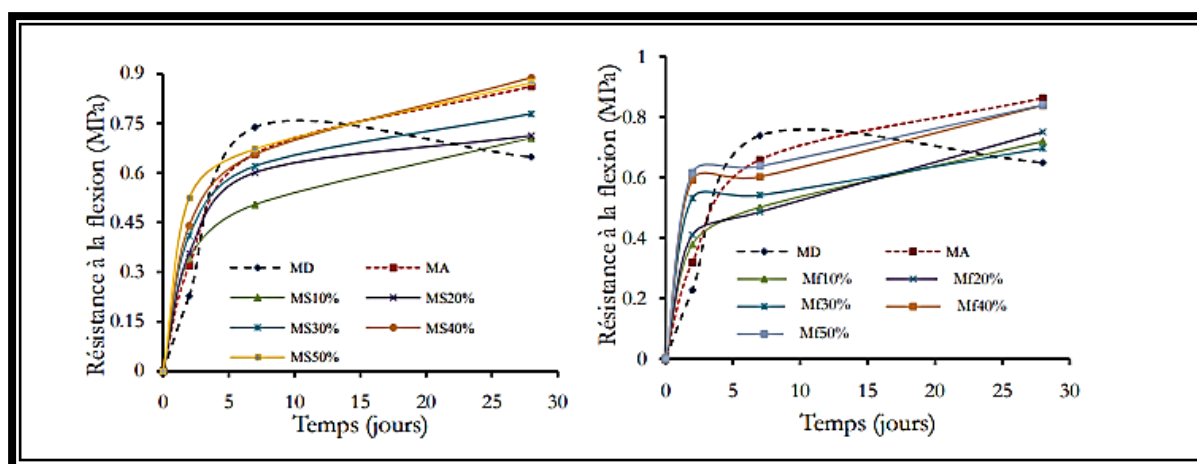


Figure I.34 : Effet de déchets céramique rouge sur la résistance à la flexion des mortiers conservés dans l'eau [69].

Bommisetty et al. [72] ont trouvé que la résistance à la flexion est augmentée en fonction de substitution de 5%, 10%, 15%, 20% et 25% du granulats naturel par des déchets de céramique et passe par un optimum de 20%. Ils ont conclu que l'augmentation de la quantité de déchets céramiques remplit plus de vides dans le mélange de béton, ce qui augmente la résistance à la flexion, comme le montre la Figure II.08.

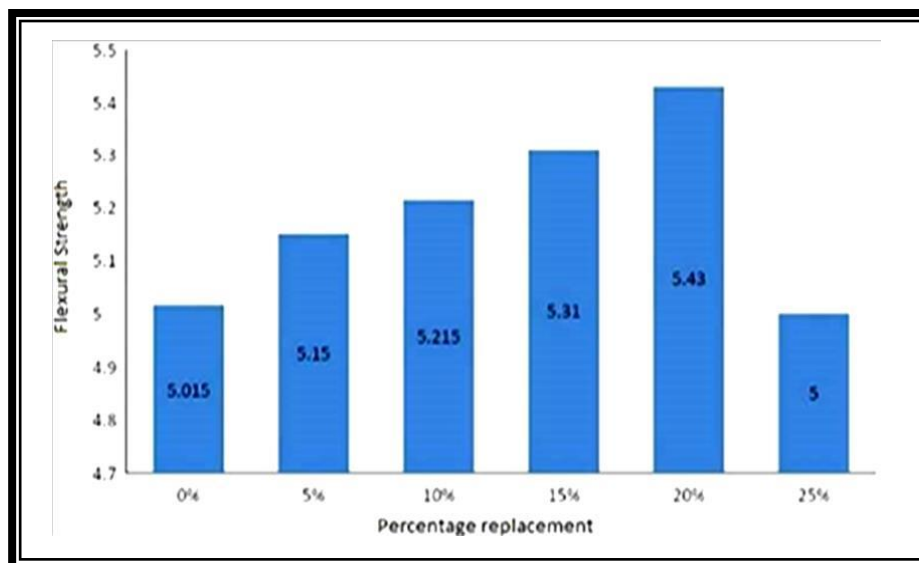


Figure I.35 : Effet de déchets céramique sur la résistance à la flexion à 28 jours de cure [72].

I.7 IDENTIFICATION DES MORTIERS

I.7.1 Introduction

Le mortier est un matériau pouvant satisfaire à une variété d'exigences dans le domaine de la construction. Toutefois, il n'existe pas de mortier universel, convenant à toutes les situations. Le Concepteur ne pourra choisir le mélange convenant le mieux pour un projet donné que s'il a une bonne connaissance des matériaux qui entrent dans la composition du mortier et de leurs propriétés. La fonction principale d'un mortier est de liasonner les éléments de maçonnerie de manière à ce qu'ils constituent un seul bloc. Par ailleurs, le mortier sépare les éléments et remplit toutes les fentes et fissures en formant une surface de contact homogène. Le rejointoiement doit permettre de renforcer les propriétés structurales des éléments et en même temps empêcher la pénétration de la pluie. Ceci exige une adhérence complète. Si elle est réalisée, le mur aura une durabilité suffisante pour résister aux éléments.



Figure I.36 :Mortier de ciment

I.7.2 Définition

Les mortiers sont très utilisés pour des travaux de tous types, ces derniers se déclinent en divers produits, qu'ils soient de ciment, de chaux ou de résine, tous ne s'utilisent pas de la même façon.

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différent selon les réalisations [40].

Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement [41].

I.7.3 Le rôle d'utilisation du mortier

La pâte plastique obtenue peut jouer plusieurs rôles essentiels :

- ☛ Assurer la liaison, la cohésion des éléments de maçonnerie entre eux, c'est-à-dire la solidité de l'ouvrage, le rendre monolithique.
- ☛ Protéger les constructions contre l'humidité due aux intempéries ou remontant du sol.
- ☛ Sous forme d'enduits aériens.
- ☛ Sous forme d'écrans étanches.

- ☛ Constituer des chapes d'usure pour dallages en béton.

Devenir la matière première dans la fabrication de blocs manufacturés, carreaux, tuyaux divers éléments moulés [42].

I.7.4 Les différents types de mortiers:

Mélange de sable, d'eau et de liant comme le ciment ou la chaux, le mortier est un matériau qui vous est indispensable sur vos chantiers. Grâce au mortier, vous scellez des blocs de béton entre eux, vous réalisez des enduits de façades, vous liez des composants [43].

➤ Mortier de ciment portland

Le ciment portland donne au mortier de maçonnerie sa résistance mécanique, en particulier la résistance initiale, qui est indispensable à une époque où la vitesse de construction est telle que l'on exige qu'un mur puisse supporter une charge importante le lendemain même de sa construction. Les mortiers du ciment portland manquent de plasticité, ont un faible pouvoir de rétention d'eau et sont difficiles à travailler. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1,3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables [44].

➤ Mortier de chaux

C'est le composant traditionnel du mortier, il possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La chaux grasse, obtenue par extinction de la chaux vive en la laissant vieillir, est le produit de qualité que l'on devrait utiliser, mais le vieillissement prend beaucoup de temps et le travail de la chaux grasse est très salissant. C'est pourquoi il est plus pratique d'utiliser la chaux hydratée sèche. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air, ce processus peut être fortement ralenti par un temps froid et humide [44].

➤ Mortiers bâtards

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux, dans les proportions égales, suivant leur domaine d'utilisation éventuelle, les compositions de chaux et ciment peuvent être variées [44].

➤ Mortier à base de ciment de maçonnerie

C'est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air, les adjuvants donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers du ciment. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec des adjuvants [44].

➤ Le Mortier réfractaire

Il est fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues [45].

➤ Le Mortier rapide

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements [45].

► Le Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:

- ☛ Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- ☛ Mortiers d'imperméabilisation.
- ☛ Mortier d'isolation thermique.
- ☛ Mortier de jointoiement.
- ☛ Mortier de ragréage.
- ☛ Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- ☛ Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment.
- ☛ Mortier de réparation [45].

I.8 EAU DE GACHAGE

I.8.1 Introduction:

L'eau utilisée pour la fabrication des mélanges de béton doit être de l'eau potable dépourvue de toutes impuretés et odeurs. En général toutes les eaux potables peuvent être utilisées pour la production du béton; l'eau de mer, même si elle est agressive vis-à-vis du ciment durci, peut être utilisée pour la fabrication d'un béton non armé. L'eau a essentiellement deux fonctions:



Figure I.37 : l'eau du robinet

✓ Une **fonction physique**, qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide (permettant donc son écoulement et le moulage)

✓ Et une **fonction chimique** entant que liant de la poudre de ciment. Elle sert aussi à mouiller les agrégats, et donc à assurer un bon lien avec la pâte de ciment.

L'eau dans la pâte de ciment hydraté est contenue sous différentes formes, notamment sous forme d'eau libre, adsorbée et liée. Elle est nécessaire non seulement pour l'hydratation du ciment mais aussi de donner au béton une consistance suffisamment fluide pour qu'il puisse être utilisé.

I.8.2 Actions de l'eau :

Pour hydrater 100kg de ciment, 25 litres d'eau sont nécessaires ($E/C=0,25$) or E/C mis en œuvre pour des bétons classiques classiquement $\gg 0,5$ (0,6-0,7) : la quantité d'eau ajoutée est toujours très supérieure à la quantité nécessaire à l'hydratation du ciment. Un excès d'eau provoque :

- Des déformations : Retrait, gonflement.
- Création de réseaux capillaires augmentation de la porosité, baisse de la compacité et ségrégation
- Une diminution des performances mécaniques : baisse de la résistance à la compression / flexion
- augmentation de la perméabilité (plus grande pénétration des agents extérieurs). Des défauts de parements et une sensibilité à l'évaporation.
- Elle rend le béton sensible au gel : expansion lors transformation en glace
- Elle favorise les réactions électrochimiques (carbonatation, corrosion, alcali réaction).
- Elle favorise les moisissures et le développement de matières organiques.
- Elle dissout : gypse, plâtre, chlorure et Elle transporte : chlorure, sulfates, gaz carbonique.
- Elle chemine : par gravité, par capillarité, en vapeur

I.8.3 Exigences requises pour les eaux de gâchage : NF EN 1008

- Eau potable : aucun essai
- Eaux usées : non
- Eaux d'origine souterraine
- Eaux naturelles de surface ou de rejets industrielles
- Eau récupérée de la fabrication des bétons

* Eau de mer : peut être utilisée pour la production de béton non armé mais pas pour le béton armé (BA) ou le béton précontraint (BP).

La norme préconise 3 types d'exigences :

☛ Exigences sensoriels :

- traces visibles d'huile, de mousse, (les organiques en général réduisent la résistance des bétons)...
- matières en suspension importantes,
- couleur,
- odeur.

☛ Exigences chimiques :

- Teneurs limitées pour certains éléments indésirables :
- les chlorures (incompatibles avec la confection de BA car amorce la corrosion des armatures),
- les sulfates (risque de formation d'ettringite secondaire gonflante),
- les alcalins (risques d'alcali-réaction)
- les sels de plomb et de zinc,
- les phosphates et les nitrates.

☛ Exigences mécaniques :

- Temps de début de prise : ne doit pas être $<$ de 1h et ne doit pas s'écarter de $\pm$ de 25% par rapport au même essai avec de l'eau distillée.
- Temps de fin de prise : ne doit pas être $>$ de 12h et ne doit pas s'écarter de $\pm$ de 25% par rapport au même essai avec de l'eau distillée.
- Résistance en compression à 7j (béton ou mortier): doit atteindre au moins 90% des résistances obtenues avec de l'eau distillée.

I.9 MORTIERS SOUMIS A HAUTE TEMPERATURE

I.9.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à une analyse approfondie des études existantes sur l'impact des températures élevées générées par le feu sur les propriétés thermiques et mécaniques de différents types de béton. Il examine également le comportement thermomécanique de ces matériaux lorsqu'ils sont utilisés dans les éléments structuraux. Cette revue bibliographique met en lumière les enjeux critiques liés à la performance des bétons en conditions d'incendie, fournissant un cadre essentiel pour la compréhension et l'amélioration de leur résistance et leur durabilité dans des applications structurales.

Les incendies sont source de dégradations importantes du béton. L'impact des températures élevées sur le comportement du béton est étudié depuis les années 1940. Lors du chauffage du béton, ses constituants subissent diverses transformations qui ont un impact sur ses propriétés mécaniques et minéralogiques.

À la suite des différents incendies survenus durant les dernières décennies, il a été démontré la difficulté d'appréhender le feu et les dégradations survenues. Les dégradations importantes sont caractérisées par un détachement de matière, une perte de résistance mécanique et dans certain cas la mise hors service de l'ouvrage.

I.9.2 Comportement mécanique du mortier a température ambiante

Le béton se caractérise, pour la partie mécanique, par la résistance à la compression, généralement considérée comme sa propriété importante, et par la résistance à la traction. Cette partie permet de présenter un aperçu du comportement mécanique du béton à température ambiante sous sollicitation de compression et de traction.

I.9.2.1 Comportement en compression

La résistance en compression est le paramètre de base pour le béton, elle définit souvent une classe de résistance dont sont censées découler beaucoup d'autres propriétés. Le comportement de béton en compression est traduit principalement par une relation contrainte-déformation, cette relation est présentée schématiquement à la (figure I.38).

On peut distinguer, à déformation croissante, trois phases de comportement [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005] :

1. Une phase de comportement analogue à celui d'un matériau homogène et élastique, se traduisant par une relation à peu près linéaire entre la contrainte et la déformation.
2. La phase de développement de la microfissuration qui entraîne une incurvation progressive de la courbe jusqu'à l'atteinte du maximum de contrainte.

La phase de développement des surfaces de fracture et d'une fissuration plus ou moins généralisée, c'est-à-dire la propagation progressive de la rupture.

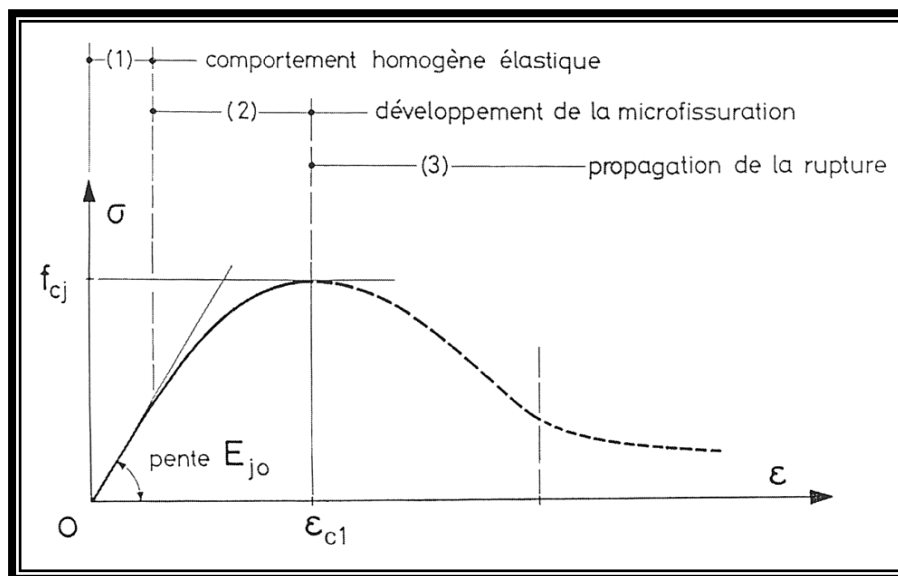


Figure I.38: Courbe contrainte-déformation en compression simple [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005].

I.9.2.2 Comportement en traction

C'est le second paramètre de base, avec la résistance en compression, qui caractérise les propriétés mécaniques du béton. La (figure I.39) présente la courbe contrainte-déformation pour le béton en traction simple.

Dans la première phase, le comportement est quasi linéaire jusqu'à l'atteinte de la force maximale, cette charge maximale correspond à la formation d'une fissure. Juste avant l'apparition de la fissure visible, il y a un endommagement diffus dans une bande de faible largeur autour de la future fissure, qui explique une petite non-linéarité précédant la charge maximale.

Après l'apparition de la fissure, la force décroît rapidement lorsque l'allongement croît jusqu'à s'annuler [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005].

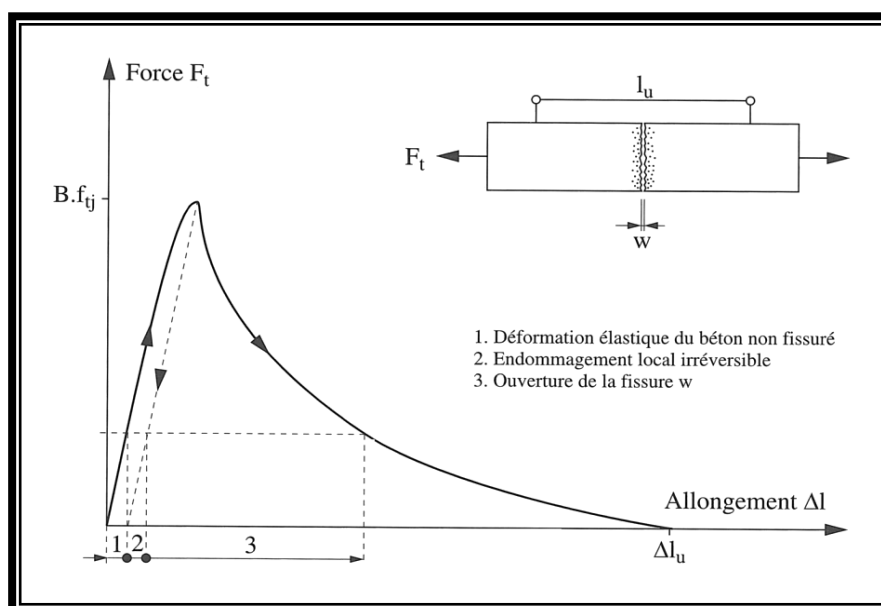


Figure I.39: Comportement du béton en traction simple [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005].

I.9.3 Comportement au feu des structures en béton lors d'incendie

Les qualités de résistance mécanique, de facilité d'utilisation, de durabilité et la très bonne tenue au feu, font du béton le matériau de construction par excellence. Mais lorsqu'il est exposé au feu, le béton perd graduellement sa résistance mécanique et il se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur. Cependant, ce processus de dégradation est suffisamment lent et progressif pour permettre un maintien de la stabilité des structures pendant un laps de temps, le plus souvent, suffisant à l'évacuation des personnes, mais aussi, pour permettre de retrouver après extinction de l'incendie un ouvrage endommagé mais réparable [Touidjine, 2011].

Les dégradations de béton par incendie sont relativement rares pour les ouvrages d'art et affectent d'avantage les bâtiments. A titre d'exemple, l'incendie du gratte-ciel Windsor de 29 étages à Madrid, la tour est resté debout malgré le feu qui s'est propagé à de nombreux étages. Le feu a démarré au 21ième étage et s'est rapidement propagé, il s'est achevée après 26 heures de lutte laissant un bâtiment complètement brûlé [Denoël, 2007]



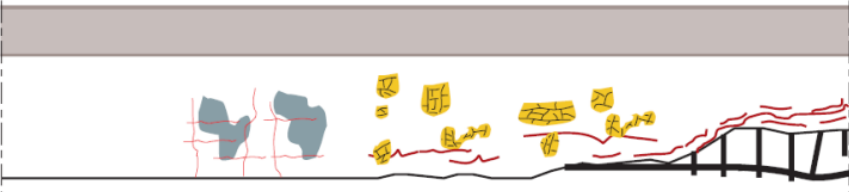
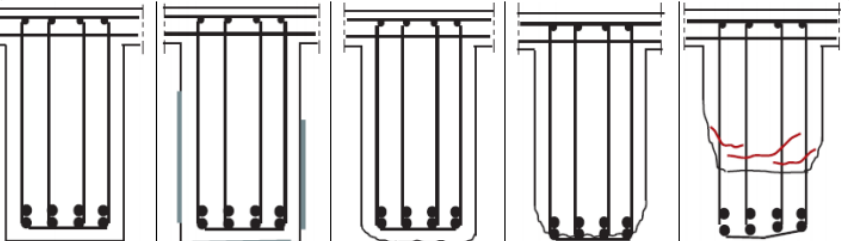
Figure I.40: À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie [Denoël, 2007].

Dans le cas des tunnels routiers, les températures qui s'installent lors des incendies peuvent être supérieures à 1000°C [Denoël, 2007]. On peut citer l'incendie important du tunnel sous la Manche, le 18 Novembre 1996. Cet ouvrage a été soumis à un feu d'une durée de près de 9 heures et une température maximale de près de 1100°C.

Après l'incendie du tunnel du Mont-Blanc (24 mars 1999), une investigation in situ, qui a été complétée par une étude en laboratoire, a été menée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC [Divet et al., 2005].

Cette investigation a pour objectif d'évaluer les caractéristiques mécaniques résiduelles du béton ainsi que de connaître la profondeur de l'endommagement dans le but d'optimiser les travaux de réparations. Les différents faciès de dégradation du béton sont regroupés dans le (Tableau I.2).

Tableau I.11. Classification des dégradations d'ouvrage en béton par incendie
[Divet et al., 2005].

Classe de désordres	0	1	2	3	4
Vue en élévation d'une poutre sous dalle					
Coupe					
Désordres observés	Aucun. état de référence de béton sain.	Dépôts de suies, coloration, traces de microfissures non orientées (faïençage).	Ecaillage superficiel (0 à 10 mm), Fissures nettes et orientées (>0,5 mm).	Disparition du béton d'enrobage, Les armatures sont visibles, Le béton sous-jacent est légèrement feuilleté.	Les armatures sont totalement dégagées et présentent des déformations plastiques, Une forte épaisseur de béton a disparu ou est feuilletée et a perdu sa cohésion.

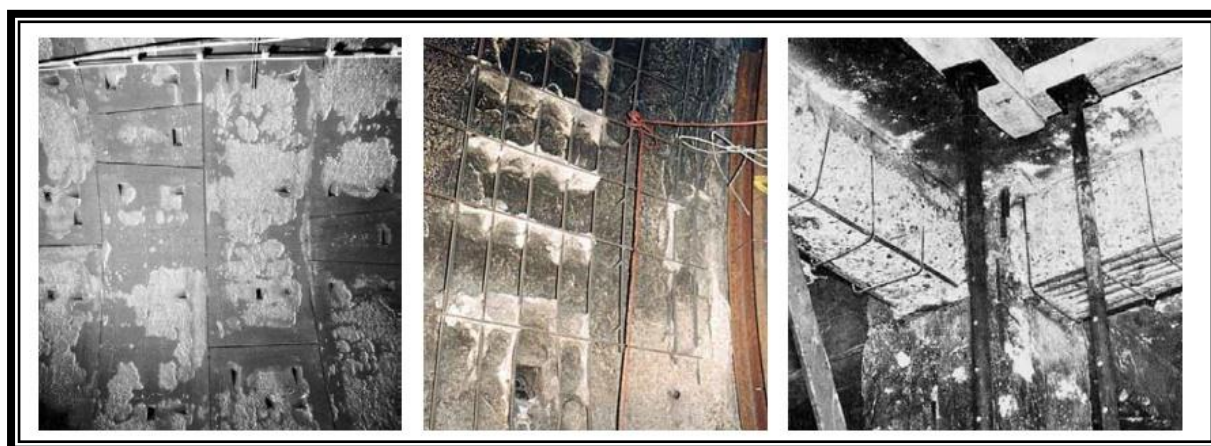


Figure I.41: Exemples de désordres de différentes classes, a/ écaillage superficiel, b/disparition du béton d'enrobage des armatures, c/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50% [Divet et al., 2005].

I.9.4 Comportement du béton à la haute température

I.9.4.1 Transformations de la matrice cimentaire

La température engendre de fortes dégradations de la microstructure du béton par les modifications subies à la matrice cimentaire et aux granulats.

Comme évoqué au premier chapitre, la pâte de ciment ordinaire hydratée contient en moyenne 50 à 70 % de C-S-H et de 25 à 27 % de Portlandite Ca(OH)_2 , le reste étant constitué d'ettringite, de monosulfoaluminate, d'aluminates calciques hydratés et de quelques grains de ciment anhydre.

Les principales transformations des composants dans la matrice cimentaire avec l'augmentation de la température ont été étudiées par plusieurs auteurs [84] [85] [86]

1. **Jusqu'à 120°C**, l'eau libre est l'eau adsorbée s'échappent du béton d'une façon marquée à 100°C. L'eau non liée est complètement éliminée à 120°C

2. **Entre 70 et 80°C**, l'ettringite ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$), se décompose et entraîne une baisse de sa concentration dans la matrice cimentaire [84] [85]

3. **Entre 130°C et 170°C**, la décomposition du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) provoque une double réaction endothermique [88].

4. **Autours de 180°C et jusqu'à environ 300°C**, les molécules d'eau sont arrachées à certains calcium de silicate hydraté (C-S-H) [85] [84]. C'est la première phase de déshydratation du C-S-H. Cela caractérise l'échappement de l'eau liée chimiquement.

5. **Entre 250 et 370°C**, on observe une coloration rosée de certains granulats due à l'oxydation des composés contenant du fer, qui a lieu aux alentours de 300°C. Cette oxydation est accompagnée par des petits piques endothermiques provoqués par la réaction. Parallèlement, la perte d'eau liée dans la matrice cimentaire et les dégradations conséquentes deviennent plus significatives.

6. **Entre 450 et 550°C**, il se produit la décomposition de la portlandite Ca(OH)_2 en chaux libre (CaO) en libérant de l'eau [87]. $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. Aussi sur ces températures, on observe la coloration rosée des granulats qui devient plus intense, sauf pour les silex qui se calcinent entre 250°C et 450°C et par conséquent prennent une coloration blanche-grise.

7. **A 573°C**, il se produit une transformation du quartz de la phase α -quartz à la phase β quartz. Cette transformation est accompagnée d'une augmentation jusqu'à 5% du volume du quartz. Cela induit l'apparition de fissures autour des grains de quartz. En revanche, les granulats en silex observent une décomposition des silanols (SiOH) entre la température de 400 et 570°C [89].

8. **Entre 600°C et 700°C**, une deuxième phase de déshydratation du C-S-H se produit. Cette réaction produit une nouvelle forme de silicates, silicate bi-calcique ($\beta\text{C}_2\text{S}$). Elle est accompagnée par un dégagement des molécules d'eau [87].

9. **Autour de 800°C**, il a lieu la décarbonatation du carbonate de calcium: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. C'est une réaction qui est fortement endothermique qui libère du gaz carbonique [84].

10. **Entre 800 et 1200°C**, la désintégration complète des composés calcaires dans les granulats et la matrice cimentaire, causé à la fois aux phénomènes de dissociation et à la contrainte thermique, produit le blanchiment du béton et l'apparition de sévères fissures. Les granulats calcaires deviennent blanches.

11. A 1200°C, le béton commence à fondre.

12. A partir de 1300-1400°C a lieu le début de la fusion de la pâte de ciment.

Selon les observations d'Alonso et Fernandez [84], au cours du refroidissement du béton une nouvelle formation de Portlandite se produit et un processus de réhydratation des silicates conduit à la formation de nouveaux C-S-H. Les travaux menés par Alonso [84] ont été réalisés par un processus de déshydratations et de réhydratation de la pâte de ciment soumise à différents cycles de chauffage-refroidissement à la vitesse de 1°C/min. La figure(I.40) montre l'évolution des composants de la matrice en phase de chauffage et de refroidissement.

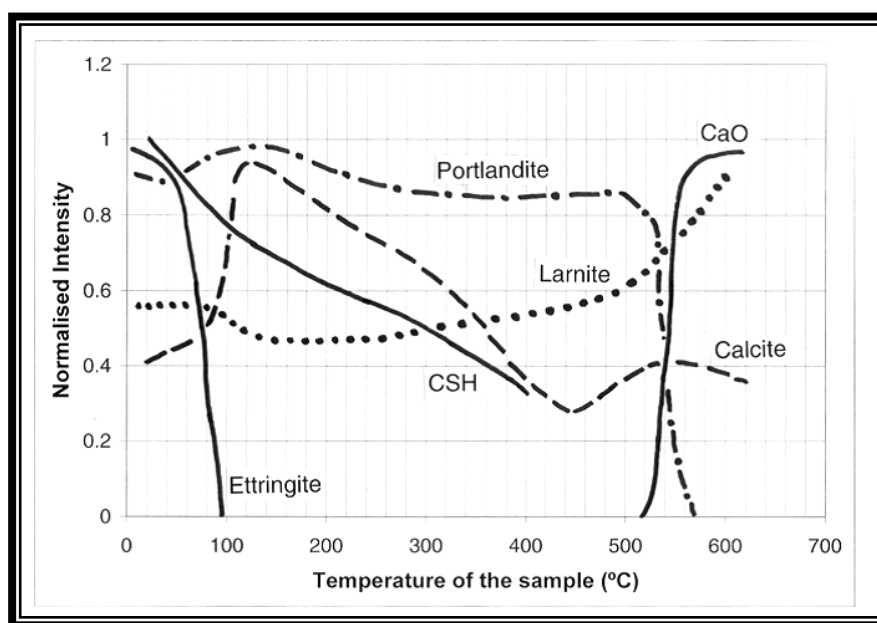


Figure I.42: Processus de déshydratation/réhydratation de la pâte de ciment exposée à haute température [84].

Sur la (Figure I.40), on observe une disparition complète de l'ettringite avant la température de 100°C. Le C-S-H se déshydrate progressivement avec la montée de température jusqu'à 400°C. Tandis que la Portlandite observe une légère augmentation à 100°C suivi d'une stagnation jusqu'à 450°C pour une chute importante de sa concentration jusqu'à 600°C. Cette chute de Portlandite est accompagnée par la formation du CaO.

I.9.4.2 Transformations des granulats

Selon le type de granulat, la haute température modifie ses caractéristiques minéralogiques. Ils se décomposent et subissent des modifications physico-chimiques et minéralogiques significatives.

Les granulats siliceux ne réagissent pas avec la pâte de ciment et ne développent pas de liaisons importantes avec la matrice cimentaire. Ils sont considérés comme neutres. Les granulats de quartzite présentent des caractéristiques relativement stables vis-à-vis du feu. A partir de 573°C, une transformation du quartz α en quartz β s'accompagne d'une forte dilatation de 1 % à 5 % [90]. Cette transformation peut provoquer un gonflement ou un éclatement du granulat. Aussi, l'éclatement a été

observé pour des granulats de silex entre 110°C et 450°C [89]. Cette réaction à la chaleur est la conséquence de la présence d'eau piégée dans les micropores d'eau provenant de la déshydroxylation des groupes silanes du quartz cryptocristallin.

A contrario, Les granulats calcaires sont considérés comme réactifs. Ils développent de fortes liaisons avec la pâte de ciment. Ce sont des granulats qui présentent un comportement stable jusqu'à une température de 600°C. A partir de 600°C, les granulats présentent une décarbonatation de la calcite : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Lors du refroidissement, le CaO peut réagir avec l'humidité de l'air pour donner de la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La formation de cette nouvelle Portlandite avec un volume supérieur à celui du granulat initial crée des nouvelles fissures dans le béton [84].

I.9.4.3 Déformation thermique libre

Le béton étant constitué de granulats et de pâte de ciment, la déformation thermique de chaque partie et leurs interactions conditionnent l'endommagement du matériau.

❖ La déformation thermique de la pâte de ciment :

L'analyse de la déformation thermique de la pâte de ciment démontre qu'elle se décompose en deux phases. [90] [91]

❖ **Première phase :** Une expansion est observée jusqu'à 150°C. Cette phase de dilatation est attribuée aux mouvements de l'eau et à la dilatation volumique des molécules d'eau. Aussi, la réduction des forces capillaires de l'eau du fait de l'augmentation de la température influe sur l'expansion.

❖ **Deuxième phase :** la pâte de ciment subit un retrait au-delà de 150°C et il devient très important une fois la température de 300°C dépassée. Le retrait est lié au départ de l'eau contenue dans le matériau. Diederrichs [91] ont étudié la déformation de trois pâtes de ciment différentes (Figure I.41) et ils ont constaté que la nature de la pâte n'a pas grande influence sur la déformation thermique.

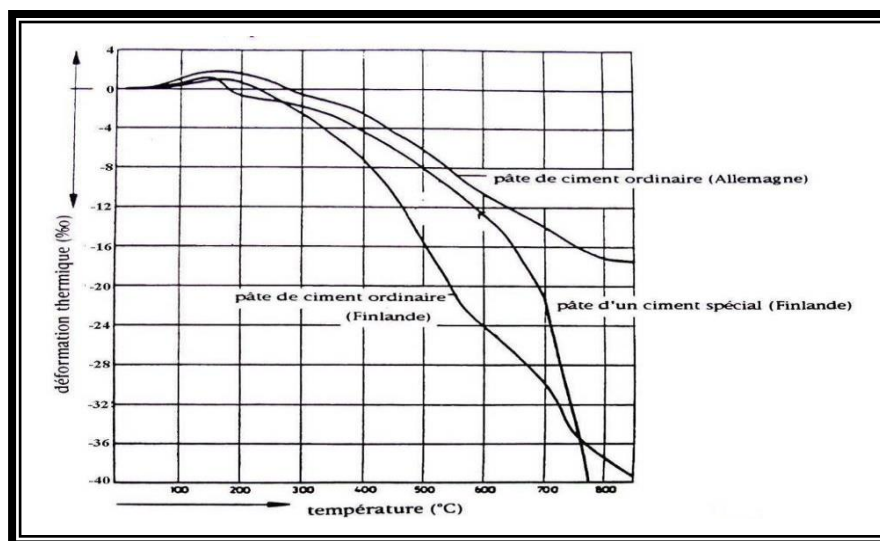


Figure I.43: Déformation thermique des pâtes de ciment [91].

La vitesse de chauffage a une influence sur la température de changement de comportement de la pâte de ciment [92]. Avec une vitesse de chauffage de moins de 10°C/min, la température de changement de comportement est autour de 150°C à 200°C. Alors qu'avec une vitesse de 35°C/min, la température de changement de comportement avoisine 300°C, rapporté par [92]. Tandis que les vitesses utilisées par

Hager, de 0.5°C/min et 1°C/min, conduisent respectivement à des températures de changement de comportement entre 225°C et 300°C. Plusieurs facteurs peuvent influencer cette température de comportement comme l'humidité relative de la pâte de ciment.

❖ Déformation thermique des granulats

Les granulats réagissent différemment à l'augmentation de la température que la pâte de ciment. L'expansion thermique dépend de la nature minéralogique des granulats, notamment de leur teneur en silice. Le granulat calcaire a un coefficient d'expansion thermique plus faible que celui du granulat de nature siliceuse mais plus important que le granulat de basalte [93], [94], [95], [86] a comparé dans son étude les déformations thermiques de la pâte de ciment à celle du béton contenant des granulats d'origine diverses.

I.9.5 Evolution des Propriétés mécaniques

Les changements structuraux et les déformations engendrées au béton par la montée de température affectent grandement ses propriétés mécaniques. La résistance à la compression et à la traction du béton se voient modifiées et le module d'élasticité affecté. Ces propriétés mécaniques sont étudiées à chaud ou après refroidissement. Les études de la résistance mécanique du béton à chaud permettent d'évaluer le comportement en cours d'un incendie. En revanche, les études après refroidissement du béton, résistance résiduelle, permettent d'indiquer les propriétés mécaniques « post-incendie ». Cela permet d'évaluer la capacité portante résiduelle de l'ouvrage et sa robustesse. Ainsi, la possibilité de réparation pourra être étudiée.

❖ Résistance à la compression:

L'évolution de la résistance à la compression au moment de l'exposition à la température se dénomme la résistance à chaud. La résistance à la compression à chaud a été étudiée par différents auteurs. Hager [92] a étudié la résistance à chaud sur différentes compositions du béton avec un rapport E/C de 0.3, 0.4 et 0.5. La résistance à chaud en compression en fonction de la température permet de diviser l'évolution en trois phases (Figure I.42).

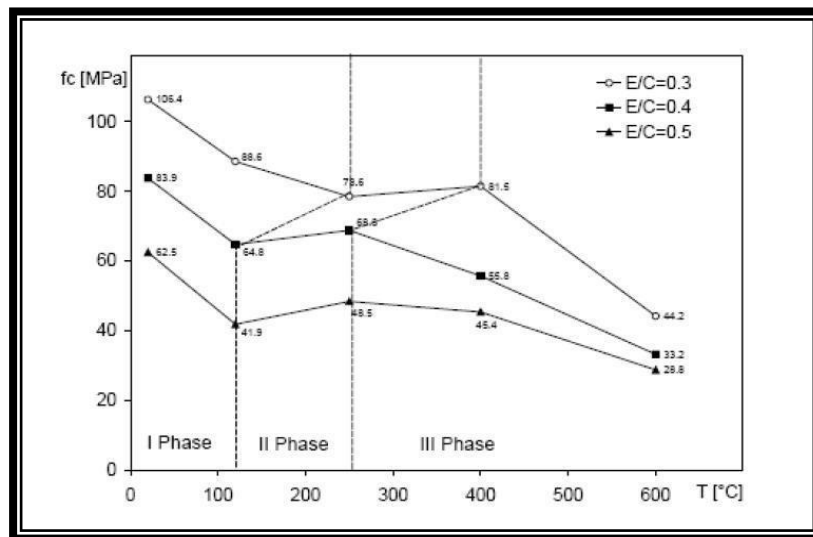


Figure I.44: Résistance en compression à chaud de béton à différentes températures [92].

☛ **La première phase, de 0°C à 100°C:** chute de la résistance de 20 à 30%.

☛ **La deuxième phase, de 100°C à 250°C:** elle est caractérisée par une chute de résistance moins importante que celle enregistrée à 100°C. En revanche, l'augmentation de la résistance du béton avec un faible E/C (BHP) est observée aux environs de 400°C. Cette augmentation retardée a été constatée par d'autres auteurs [96].

☛ La troisième phase, au-delà de 400°C pour le BHP et 250°C pour les autres bétons, elle est caractérisée par une chute de résistance monotone.

Les premières fissures liées à la déformation différentielle entre les granulats et la pâte sont observées dans cette phase.

❖ Résistance à la traction

Nguyen [97] a fait une étude comparative des résultats des essais de résistance à la traction résiduelle par fendage de différentes études sur le béton ordinaire et le béton haute performance [87], [96], [95]

L'étude comparative est représentée dans la (figure I.43) Une baisse légère de résistance à la traction est observée jusqu'à la température 350°C. Au-delà de 350°C, une chute de résistance plus importante est constatée.

Les bétons à faible rapport E/C présentent une baisse plus significative de résistance à la traction que les bétons à rapport E/C élevé dès la température 150°C [96].

L'influence du type de granulats sur la résistance résiduelle à la traction est similaire à son influence sur la résistance résiduelle à la compression [89]. Entre 300°C et 600°C, les bétons avec des granulats siliceux ou de silex présentent des pertes de résistance plus importante que le béton avec des granulats de calcaire. Au-delà de 600°C, la perte de la résistance résiduelle à la traction est plus importante pour le béton avec des granulats à calcaire. Cela est liée à la décarbonatation.

L'étude de Pliya 2010, conclue à une amélioration de la résistance en traction des bétons contenant de la fibre polypropylène. Il attribue cette amélioration de résistance à la traction à la fusion du polypropylène qui remplit les pores du béton et se resolidifie durant la phase de refroidissement. Ainsi, les forces de contact et les liaisons entre les différents grains s'améliorent. Avec le béton à hautes performances, les fibres fondues se diffusent moins dans la matrice cimentaire du fait de sa forte densité. Après le chauffage à 600°C, les résistances résiduelles à la traction des bétons avec et sans fibres de polypropylène sont presque les mêmes.

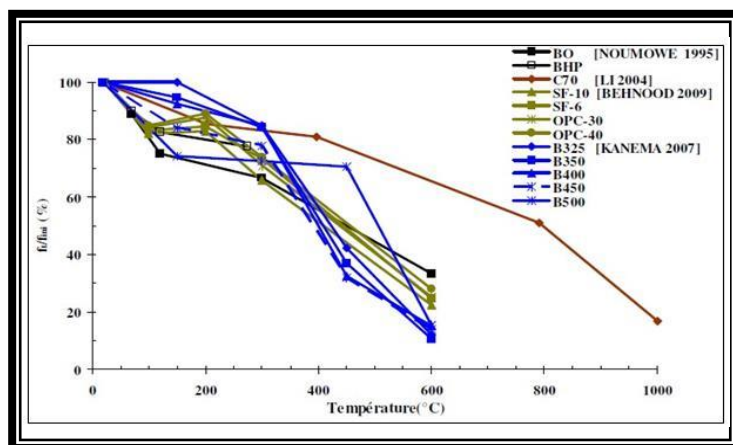


Figure I.45: Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des BO et BHP [97].

I.9.6 Module d'élasticité

Il existe très peu d'études réalisées sur l'évaluation du module d'élasticité du béton à chaud. Cependant, de nombreuses études se sont intéressées à l'évaluation du module d'élasticité après son exposition à la haute température, module d'élasticité résiduelle. Nguyen [98] a réuni les résultats de l'évolution du module d'élasticité résiduelle obtenue sur différentes études [98], [96] et [26]. L'évolution en fonction de la température du module d'élasticité résiduelle relatif des différentes études sont exposés dans la(figure I.46). On constate que le module d'élasticité résiduel diminue en fonction de la température d'une manière progressive. Cette diminution est similaire pour les types de béton étudiés (BO, BHP et BAP) et cela même avec différents rapports Eau/Liant. De ce fait, le type de béton n'a pas grande influence sur l'évolution de la rigidité du béton [96] et [92]. La rigidité observée après traitement à 600°C est presque nulle. Elle est de 2% pour l'étude de Kenema [96]. Cette forte chute est liée aux différentes transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire, à la déformation des granulats avec l'interface pâte-granulats et à l'augmentation du volume poreux [92] et [87].

La nature des granulats utilisée dans la composition du béton présente une influence sur l'évolution du module d'élasticité résiduelle [89], [99] et [95]. Le béton avec des granulats calcaire présente une chute de la valeur du module d'élasticité plus faible que celui du béton avec des granulats à base de quartzite [95] et à base siliceux et silico-calcaire [89]. Cependant, il n'y'a pas de différence notable entre les modules d'élasticité résiduelle du béton ordinaire et du béton haute performances contenant des granulats calcaires ou siliceux

Le module de l'élasticité résiduelle contenant des fibres polypropylènes baisse avec l'augmentation de la température d'exposition [100]. Cela malgré que l'ajout de fibres polypropylènes à un effet bénéfique sur la stabilité du béton à haute température. Cette diminution est plus importante avec l'augmentation du dosage de fibres polypropylène utilisées [100]. Cela est dû aux vides laissés dans la matrice du béton après évaporation des fibres.

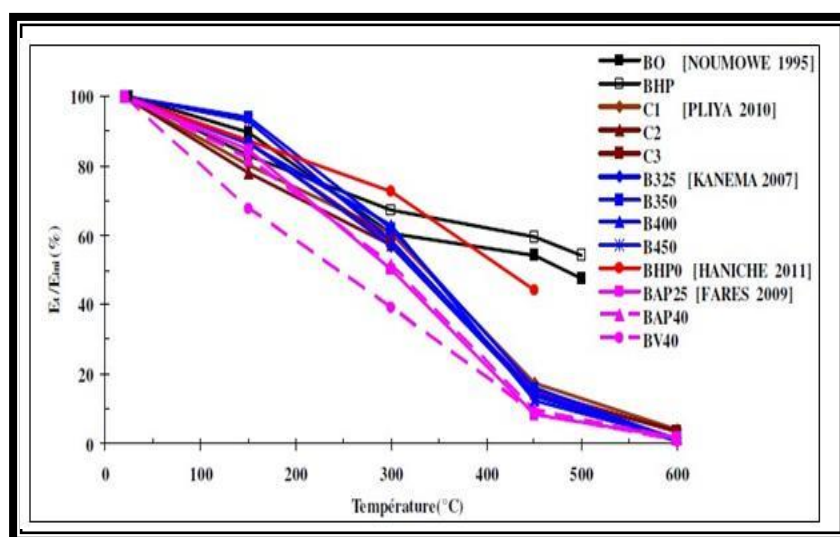


Figure I.46 : Evolution du module d'élasticité résiduel relatif [97].

I.9.7 Evolution des propriétés physiques

I.9.7.1 Perte de masse

La perte de masse se caractérise par la perte de matière sous forme solide ou de gaz avec l'augmentation de la température. La principale cause de la perte de masse du béton avant 600°C est le départ de l'eau. Hager [92] a étudié la perte de masse en fonction de la température du BO et du BHP, notés respectivement M30C et M100C. La courbe d'évolution de la perte de masse est représentée dans la (figure I.45). Elle peut être divisée en trois phases :

☛ **De la température ambiante jusqu'à 100°C ou 150°C** une faible variation de la masse est constatée. Cette variation est due au départ de l'eau libre des capillaires [Mali, 1982], [87]. Sur cette phase, la perte de masse est plus importante avec un E/C élevée. Cela est observé sur la (Figure I.45) [92] entre le BO et le BHP, E/C plus faible.

☛ **De 150°C à 300°C**, on observe une perte de masse beaucoup plus rapide. Cette perte est caractérisée par le départ de l'eau liée dans les hydrates. Cela est constaté principalement à la première phase de déshydratation du gel C-S-H et à la décomposition du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [87], [45]. Jusqu'à 300°C, le béton perd approximativement 65 à 80 % de la masse d'eau totale [96].

☛ **Au-delà de 300°C**, la perte de masse est moins importante que la phase précédente. Cela correspond à :

- La déshydratation de la Portlandite entre 450°C et 550°C,
- La décomposition des silanols (SiOH) du silice entre 400°C et 570°C,
- La décarbonatation du calcaire CaCO_3 entre 600°C et 800°C [89], et [88].

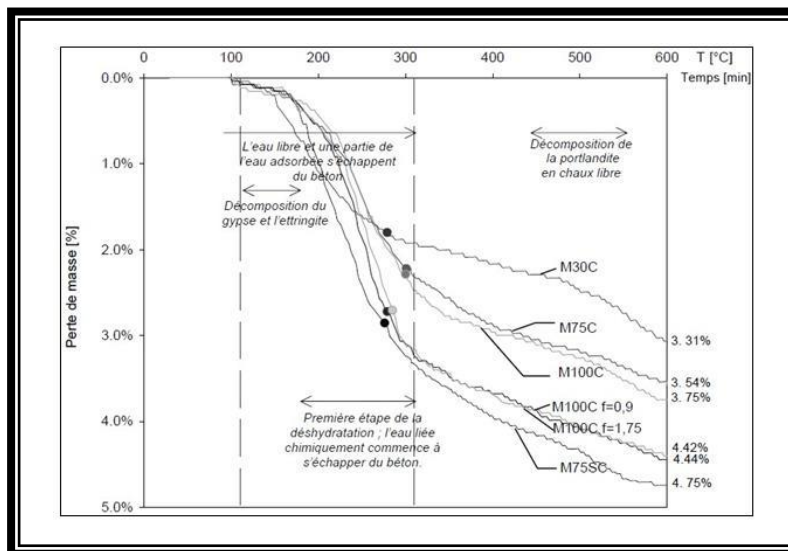


Figure I.47: Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons [92].

Plusieurs études observent que la perte de masse du BHP est toujours inférieure à celle du BO [89], [96], [92]. Cela est lié à la quantité d'eau utilisée dans la composition du béton. Plus la quantité d'eau est importante plus la perte de masse est conséquente. Cependant, la vitesse de chauffage a un effet important sur la perte de masse. On observe une perte de masse plus importante avec un chauffage de 1°C/min qu'avec 10°C/min, particulièrement entre 100°C et 300°C [96].

I.9.7.2 Porosité

☛ La porosité à l'eau

La porosité à l'eau permet de quantifier le volume des pores avec un diamètre entre 0.1 mm et 2.5 mm accessible à l'eau par le réseau capillaire de la structure du béton. La porosité augmente en fonction de température pour tout type de béton [87]. L'augmentation de la porosité se décompose en deux phases :

➤ **De la température ambiante jusqu'à 300°C**, une croissance de la porosité relativement similaire est observée pour différents types de béton (BO, BHP), augmentation de 16% (Figure I.46). Certains auteurs [86] observent dans cette phase une porosité stable ou qui décroît légèrement. Certains auteurs attribuent un tel phénomène à la recristallisation de la chaux amorphe

➤ **Au-delà de 300°C**, la porosité du BO augmente d'une façon plus significative que le BHP. De la (figure I.47) on observe une augmentation de la porosité de 34% alors que l'augmentation de la porosité du BHP est de 20%. Cette forte croissance de la porosité est attribuée à l'ouverture des microfissures engendrées par la dilatation différentielle pâte-granulat. Cette dilatation est causée par le départ d'une grande partie de l'eau liée.

La perte d'eau localisée entre les feuillets des hydrates induit un retrait et réduit ainsi le volume de l'espace libéré par l'eau entre les feuillets. On note sur la (figure I.46) l'évolution de la porosité en fonction de la température de différents types de béton.

L'addition de fibres propylènes contribue à l'augmentation de la porosité avec la température. L'accroissement de la porosité évolue avec la quantité de fibres polypropylènes ajoutées. Tandis que l'addition de fibres métalliques n'a peu d'effet sur la porosité accessible à l'eau [98].

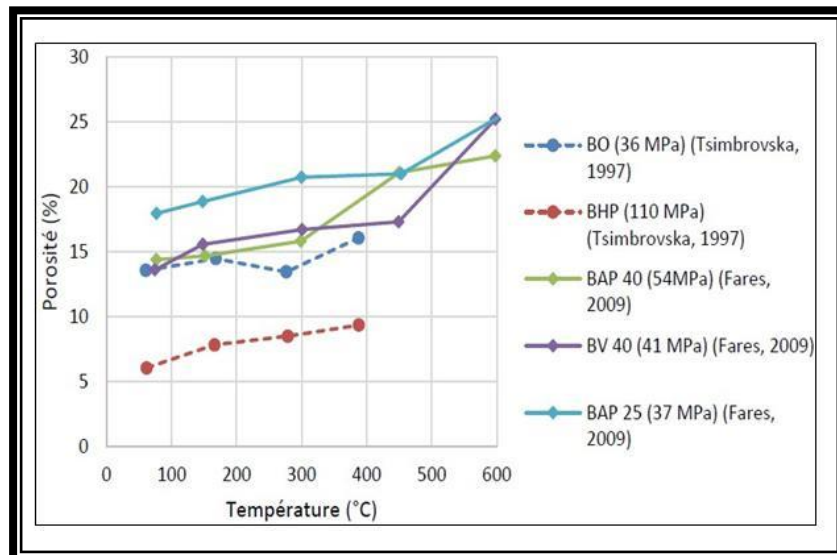


Figure I.48: Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température [101].

I.9.7.3 Formes d'endommagement thermique

On distingue deux modes d'endommagement thermique:

► **L'écaillage**, appelé aussi « progressive spalling ». C'est un phénomène caractérisé par une perte progressive de matière qui correspond à un détachement de matière graduel et répétitif.

► **L'éclatement**, appelé aussi « explosif spalling ». C'est un phénomène caractérisé par la perte brutale de matière accompagné d'un fort bruit. Les morceaux détachés sont volumineux et peuvent engendrer la perte de capacité portante de la structure.

Ces deux modes d'endommagement sont appelés « spalling ». Ils apparaissent dans les endroits non isolés et exposés à la chaleur du feu. L'instabilité thermique du béton se présente au-delà d'une certaine température sous diverses formes :

* **Eclatement de granulats**, appelé aussi « aggregate spalling ». Il est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface exposée à la haute température. Les principales causes de ce phénomène sont la conversion de quartz- α au quartz- β à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement des granulats sont que superficiels.

* **Eclatement de surface**, appelé aussi « area spalling ». C'est un éclatement discoïdal violent, probablement causé par la migration d'eau. Il est caractérisé par le détachement de petits morceaux du parement exposé au feu, de taille jusqu'à 20 mm environ.

* **Eclatement d'angle**, appelé aussi « corner spalling ». Il est constaté dans les stades avancés du feu. Le béton se trouve affaibli et les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et extrémités de l'ouvrage.

* **Eclatement explosif (explosif spalling)**. C'est un éclatement très violent qui se produit généralement dans les 30 premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température dépassant 100°C. Il se caractérise par une perte brutale de petits ou gros morceaux de béton pouvant causer une perte de résistance.

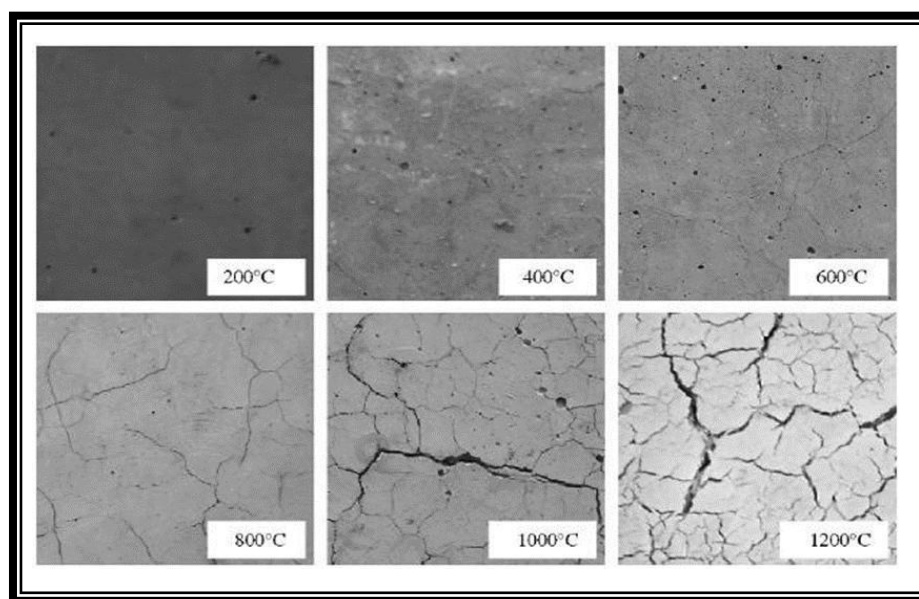


Figure I.49 :Etat de surface et fissures des bétons avec différents températures [90].

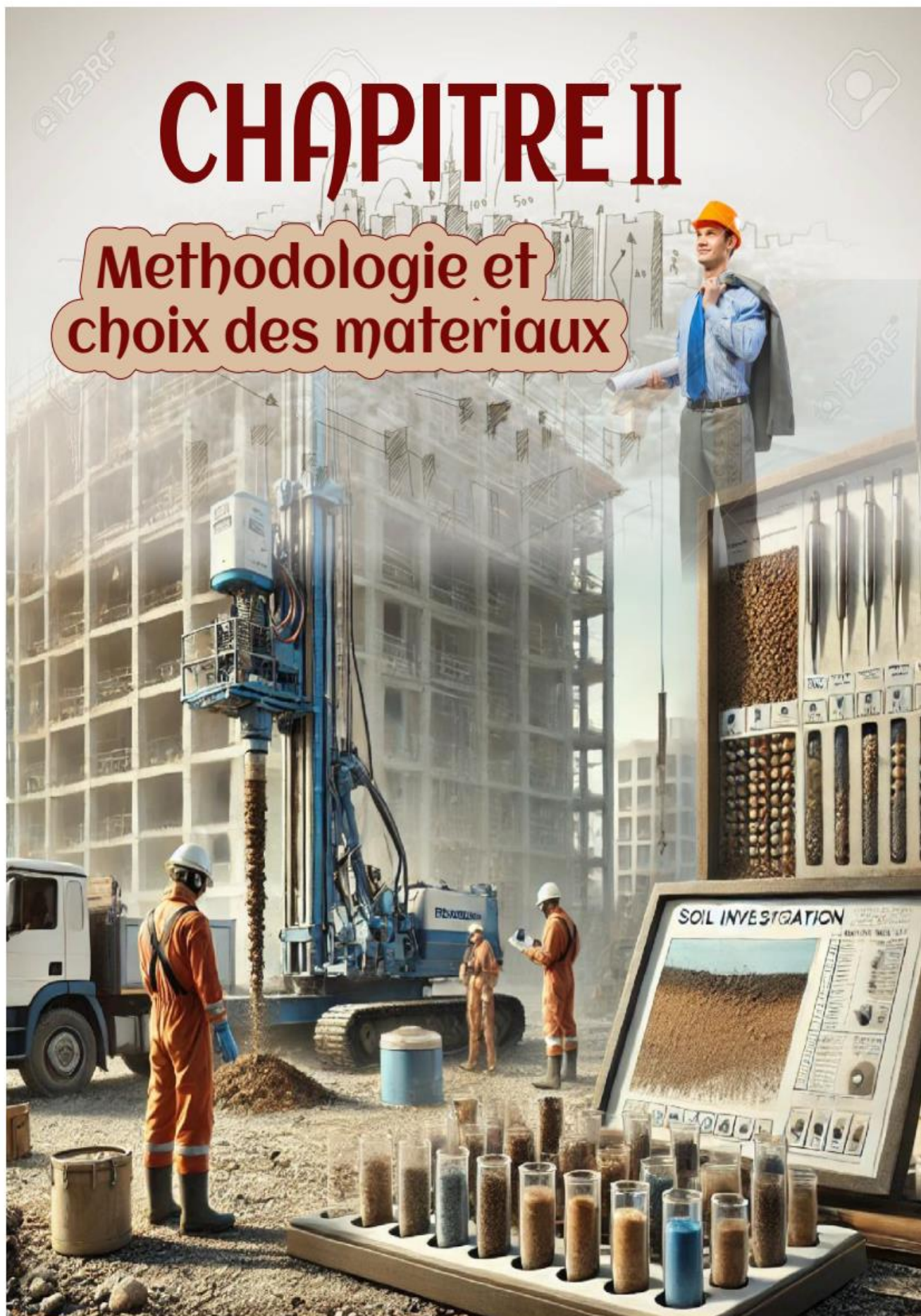
I.10 Conclusion

Cette revue bibliographique a permis de dresser un état des connaissances sur les principaux matériaux et phénomènes impliqués dans l'étude des mortiers écologiques à base de sable de dune et de déchets céramiques de substitution, soumis à des températures élevées.

Le sable de dune saharien, abondant en Algérie, représente une ressource locale prometteuse. Les analyses chimiques et minéralogiques montrent une très forte teneur en silice (jusqu'à 94,24%), une granulométrie fine et homogène, ainsi qu'une stabilité thermique satisfaisante jusqu'à 800°C, ce qui le rend potentiellement exploitable dans la construction.

Concernant les déchets céramiques, leur incorporation dans les matériaux cimentaires présente des effets variables selon le type et le taux de substitution. De manière générale, les résultats de la littérature montrent une amélioration ou un maintien des résistances mécaniques pour des taux de substitution modérés (10 à 30%), tout en contribuant à une démarche de développement durable par la valorisation des déchets.

Enfin, le comportement des mortiers soumis à haute température révèle une dégradation progressive de leurs propriétés mécaniques et physiques (perte de résistance, augmentation de la porosité, perte de masse), liée aux transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire et des granulats. Ces dégradations s'intensifient significativement au-delà de 300°C, avec des phénomènes critiques comme la décomposition de la portlandite (450–550°C) et la transformation du quartz (573°C).



II.1 Introduction :

Les matériaux utilisés dans cette étude jouent un rôle très important dans la détermination des propriétés du mortier à l'état frais et durci.

Il est donc nécessaire de comprendre les différentes caractéristiques des ingrédients utilisés dans les formulations de mortiers, car chaque ingrédient peut grandement influencer les résultats de l'étude. Dans ce chapitre, nous caractérisons chaque composant du mortier. La méthodologie suivie pour réaliser ce travail.

II.2 Objectif du travail :

Notre objectif principal était d'étudier la valeur de l'effet de la poudre des déchets céramique dans les formulations de mortiers on deux sens , une fois le sable de dune est remplacé partiellement [{ 0 %, 30 % (15% Poudre+15% Grossier), 30% Poudre,30% Grossier } du poids du sable] par des déchets céramique et autre sens a procédé à la substitution partiellement du ciment par les pourcentages suivants de la poudre céramique (10% , 20%), Le but de ces méthodes est d'obtenir un mortier de qualité sur les propriétés à l'état frais et durci ainsi sur la durabilité comparable à un mortier témoin.

II.3 Méthodologie du travail pratique :

La caractérisation de tous les matériaux utilisés en premier lieu :

- Un ciment produit de la cimenterie BISKRIA de type CEM II/B-L 42.5 N
- Le sable de dune de la région d'eloued. "Oued el Alenda"
- Déchets de céramique. (Poudre , Grossier)

Dans un deuxième temps, nous avons déterminé la composition du mortier témoin ainsi que toutes les variantes du mortier étudié en fonction de la proportion de déchets. Les échantillons tout en évaluant les performances mécaniques du béton après l'avoir soumis à des températures élevées (80°C, 250 °C, 500°C, 700°C, Flamme nue) , ensuite été soumis à des tests physiques et mécaniques.

Enfin, une conclusion générale est présentée qui abordera tous les points soulevés dans cette étude.

II.4 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment gris CEM II/A-L 42.5 R provenant de l'usine « SPA BISKRIA CIMENT» à Biskra Algérie, disponible localement et conformément aux exigences de spécification standard ASTM C 150, et la norme algérienne NA 442-2013 avec densité absolue de 3,10 g/cm³, dont les caractéristiques physico-mécaniques ainsi que les compositions chimiques sont présentées dans le tableau II.1. L'analyse de la composition chimique, des propriétés physiques et mécaniques a été autorisée par le laboratoire du fabricant.



Figure II.1 :Ciment Biskria

II.4.1 Caractéristiques techniques :

Tableau II.1 : Caractéristiques technique de ciment

Analyse chimique (%)	Valeur
Perte au feu	6-8
Teneur en sulfate (SO_3)	2.5-2.9
Teneur on oxyde de magnésium (mgo)	< 3.5
Teneur en chlorures (Cl^-)	< 0.08
Résidu insoluble	NA
Composition potentielle du clinker (selon Bogue)(%)	Valeur
C_3S	60-65
C_3A	6-10
Propriété physique	Valeur
Début de prise	150 min
Fin de prise	260 min
Propriété physique	Valeur
Consistance normale (%)	25.4-26
Expansion a chaud	< 1mm
Resistance a la compression	Valeur
2 jours (MPa)	23-26
28 jours (MPa)	45-50

II.5 Sable de dune

Le sable de base utilisé est un sable de dune roulé (SD) de couleur dorée et de granulométrie comprise entre 0.063 et 1.25 mm. Il provient de la région d'Oued Souf, de la commune de "Oued el Alenda", est situé au sud est de la wilaya d'El-Oued en Algérie, comme le montre la Figure II.2.

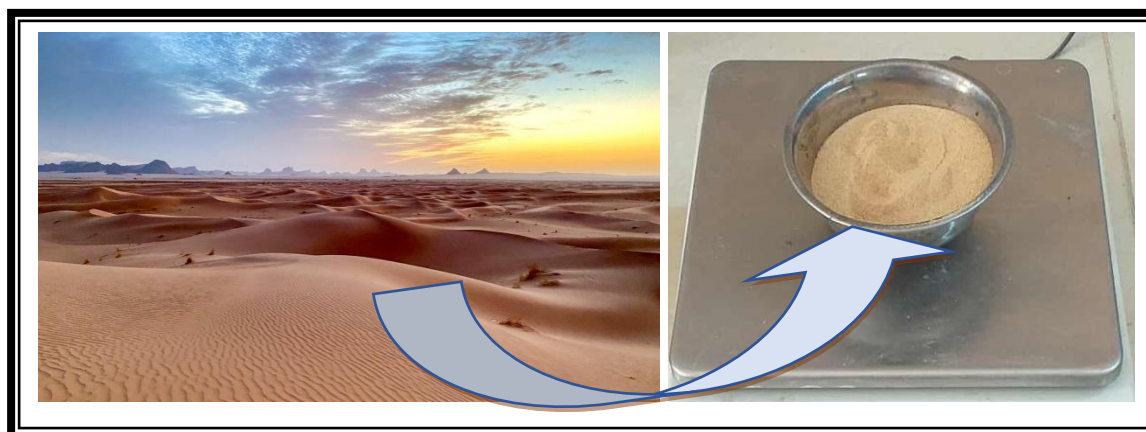


Figure II.2 : Sable de dune

II.5.1 Les caractéristiques physiques :

II.5.1.1 La masse volumique apparente : (NF EN 1097-3 (1998))

II.5.1.1.1 Définition

La masse volumique apparente est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, y compris les vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

II.5.1.1.2 Appareillage

- 1- Étuve réglé à 105 ± 5 °C pour sécher les granulats ;
- 2- Entonnoir sur trépied, muni d'une passoire et d'un opercule mobile ;
- 3- Récipient de mesure
- 4- Balance de précision
- 5- Règle à araser



Figure II.3 : Appareillage d'essai masse volumique apparente

II.5.1.1.3 Matériaux utilisés

- Un échantillon de sable de dune

II.5.1.1.4 Le protocole de l'essai :

- 1- Sécher les échantillons à l'étuve jusqu'à masse constante à $T = 105 \pm 5$ °C.
- 2- Prendre un récipient de volume connu ($v = 1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ L} = 1000 \text{ cm}^3$) et le peser vide (M_0 en g)
- 3- Remplir le récipient du matériau sec à l'aide d'un entonnoir jusqu'à ce qu'il déborde en formant un cône
- 4- Araser l'excès à l'aide d'une règle
- 5- Peser le récipient rempli de matériau (M_1 en g)
- 6- Déduire la masse de l'échantillon : ($M = M_1 - M_0$)

7- Calculer la masse volumique apparente de l'échantillon selon la formule suivante :

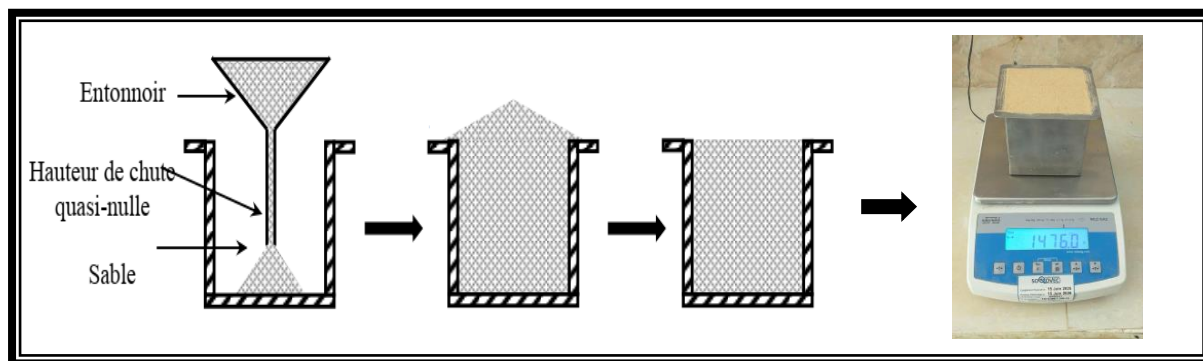


Figure II.4 : Méthode de déposition du sable utilisée pour déterminer sa masse volumique minimale.

$$\rho_{App} = \frac{M}{V} \text{ g/cm}^3 \text{ ou } \times 1000 \text{ Kg/m}^3$$

* les résultats sont résumés dans le tableau pour 3 échantillons :

Tableau II.2 : Masse volumique apparente de sable de dune

Propriété	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1476.00	1468.90	1469.70
Moyenne	1472		

II.5.1.2 La masse volumique absolue : (NF EN 1097-6/A1 (2014))

II.5.1.2.1 Définition:

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides entre des grains.

La méthode pour déterminer la masse volumique absolue est celle de la Méthode de l'éprouvette graduée. C'est une méthode très simple et très rapide. Toutefois sa précision est faible.

II.5.1.2.2 Appareillage

- 1- Etuve pour sécher les granulats
- 2- Entonnoir sur trépied, muni d'une passoire et d'un opercule mobile
- 3- Balance électronique de précision (0,01 g)
- 4- Éprouvette graduée de l'ordre de 500 cm³ de volume



Figure II.5 : Appareillage d'essai masse volumique apparente

II.5.1.2.3 Le protocole de l'essai

- 1-Peser une masse de $M = 100 \text{ g}$ de matériau sec.
- 2- Remplir l'éprouvette graduée d'un volume ($V1 \text{ en cm}^3$) d'eau (chimiquement inerte par rapport au matériau).
- 3-Introduire le matériau dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air en frappant légèrement l'éprouvette contre la paume de la main.

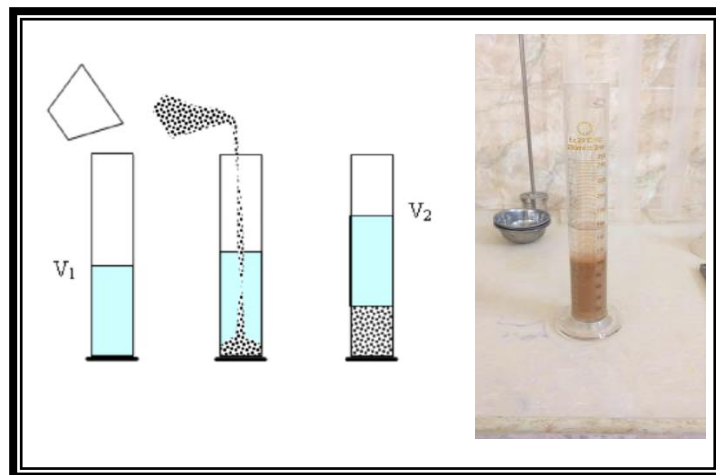


Figure II.6 : Essai de la masse volumique absolue

- 4- Lire sur l'éprouvette le nouveau volume obtenu ($V2 \text{ en cm}^3$), les lectures de volume doivent être effectuées en bas de ménisque d'eau.
- 5-Déduire le volume de l'échantillon $V_{ech} = V2 - V1 \text{ (en cm}^3\text{)}$.
- 6- Calculer la masse volumique absolue

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_{ech}} \text{ (g/cm}^3 \text{) ou } \times 1000 \text{ Kg/ m}^3$$

Après l'essai, nous avons obtenu le résultat suivants :

$$-\rho_{abs} = \frac{M}{V_{ech}} \quad -M_s=150g \quad -V_1=100 \text{ ml} \quad -V_2=157 \text{ ml} \quad V_{ech}= V_2- V_1= 57 \text{ ml}$$

$$\rho_{abs} = \frac{150}{57} = 2.63 \text{ g/cm}^3$$

II.5.1.3 Analyse granulométrique d'un sol : (EN 933-1 et EN 933-2)

II.5.1.3.1 Définition :

L'analyse granulométrie se propose de définir la répartition des grains constitutifs d'un sol par classes de taille, elle est réalisée:

- ☛ Par un tamisage mécanique pour les grains supérieurs à 0,08mm.
- ☛ Par un essai de sédimentation pour les particules inférieures à 0,08mm.

La granularité se définit comme la répartition de la dimension moyenne des particules du sol, exprimée en pourcentage de la masse totale du matériau.

L'analyse granulométrique s'effectue jusqu'à 80 µm par tamisage du matériau par voie sèche ou par voie humide, les dimensions des mailles des tamis les plus couramment utilisés sont les suivants: 0,063 mm ; 0,125 mm ; 0,250 mm ; 0,500 mm ; 1 mm ; 2 mm ; 4 mm ; 8 mm ; 16 mm ; 31,5 mm ; 63 mm ; 125 mm

II.5.1.3.2 Appareillage:

- 1- Colonne de tamis
- 2- Vibro-tamis;
- 3- Pinceau;
- 4- Balance de précision;
- 5- Étuve ventilée et réglée.



Figure II.7 : Tamiseuse et les tamis utilisés pour l'analyse granulométrique

II.5.1.3.3 Le protocole de l'essai

L'essai portera sur un échantillon de sable ou sur un échantillon de gravier. Le poids de l'échantillon représentatif est fonction de la dimension du grain le plus gros, il est recommandé de prendre cette quantité définie par les limites :

$$200 \times D < P < 600 \times D$$

P : Poids de l'échantillon exprimé en grammes

D : Diamètre équivalent maximale du plus gros grain exprimé en millimètres

* Étapes de l'essai

1- Constituer la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de haut vers le bas après avoir pesé chacun d'eux à vide;

2- Mettre l'échantillon dans le tamis supérieur;

3- Faire soumettre la colonne à la vibration mécanique ;

4- Reprendre un à un les tamis pour compléter le tamisage à l'aide d'un pinceau et les peser

5- Récupérer les particules se trouvant dans le fond qui ferme la colonne et les peser. Si ce poids dépasse 15% du poids initial; l'analyse granulométrique doit être complétée par la sédimentométrie.

► Les tableaux suivants présentent les résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur nos matériaux (sable de dune) :

Tableau II.3 : analyse granulométrique du sable de dune

Echantillon : Sable de dune				Date : 05/02/2026
Référence dossier : EN 933-1 et EN 933-2				Température = 22 °C
Masse de l'échantillon = 1000g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	0	0	0	0
2.5	0	0	0	100
1.25	0	0	0	100
0.630	0	0	0	100
0.315	9.4	9.4	0.94	99.06
0.16	892.7	902.1	90.21	9.79
0.08	90	992.1	99.21	0.79

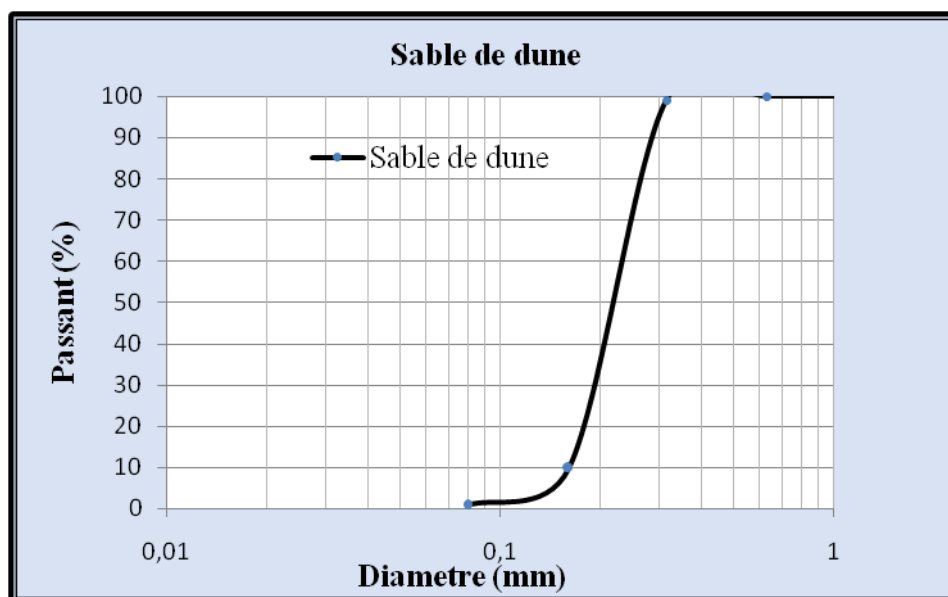


Figure II.8 : la courbe de l'analyse granulométrique du sable de dune

II.5.1.3.4 Module de finesse

Le module de finesse (Mf) est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante. Généralement, le module de finesse (FM) est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentages, sur les différents tamis de la série suivante (mm) : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5 mm.

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

Tableau II.4 : Grosseur ou finesse du sable mesurée à partir du module de finesse

Module de finesse		
Sable à gros grains (CF)	Sable à grains moyens (MF)	Sable à grains fins (FF)
4,0 à 2,4	2,8 à 1,5	2,1 à 0,6

* -Module de finesse :

$$Mf = \frac{\sum [0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0.94 + 90.21]}{100} = 0.912$$

Dans notre cas le résultat obtenus sont :

☛ **0.6 < MF =0.912 < 2,1** : le sable a une majorité d'éléments fins et très fins ;

II.5.1.4 Essai de l'équivalent de sable : (NF P 18-598)**II.5.1.4.1 But de L'essai :**

Il permet de mesurer rapidement l'importance relative des éléments fins au sein d'un matériau sableux.

II.5.1.4.2 Principe de l'essai :

Après un lavage énergétique, il s'agit de mettre en suspension les éléments fins de l'échantillon de sol au moyen d'un flocculat (solution de chlorure de calcium, de glycérine..) qui entraîne une coagulation des particules argileuse sous forme de flocons.

Cette opération étant réalisée dans une éprouvette transparente, on mesure d'une part la hauteur du flocculat, d'autre part celle du sable. Le rapport entre ces deux chiffres représente, par définition, l'équivalent de sable du matériau étudié.

II.5.1.4.3 Appareillage :

- 1- 3 éprouvettes cylindriques graduées (32mm de diamètre, 430mm de hauteur).
- 2- Un réservoir de 5 litres contenant la solution flocculante.
- 3- Un tube laveur relié au réservoir par un tuyau de caoutchouc.
- 4- Un piston taré.
- 5- Une boîte de mesure de 88 cm³.
- 6- Eventuel, un agitateur mécanique.
- 7- Machine agitatrice électrique

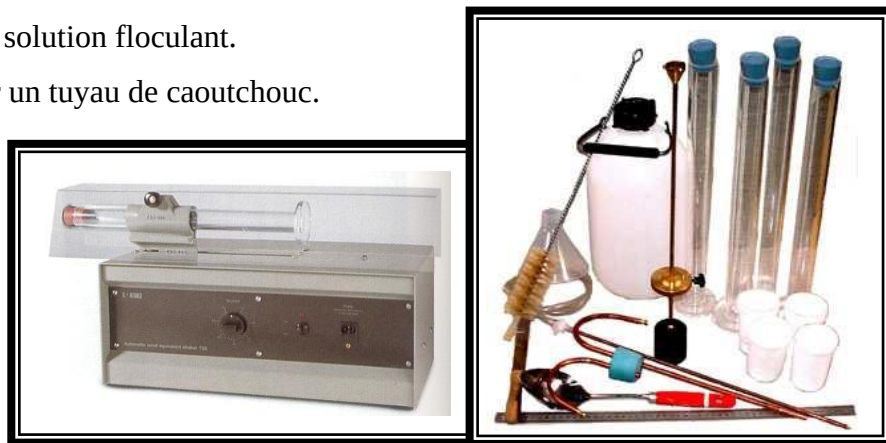


Tableau II.9: Equipements de l'essai d'équivalent de sable

II.5.1.4.4 Le protocole de l'essai

- 1- Tamiser l'échantillon.
- 2- Préparation des échantillon
- 3- Verser la solution lavante dans l'éprouvette.
- 4- Laisser reposer 10min.
- 5- Boucher l'éprouvette et fixer sur la machine.
- 6- Faire subir à l'éprouvette 90cycles en 30s.
- 7- Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table.

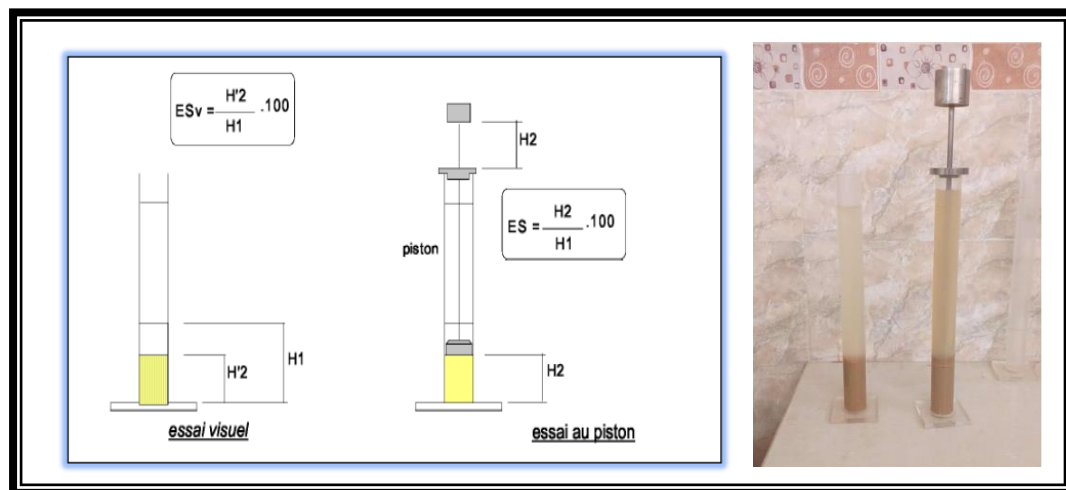


Figure II.10 : Essai d'équivalent de sable

II.5.1.4.5 Résultats :

L'équivalent de sable se calcul avec la formule suivante :

$$Es = \frac{h2}{h1} \times 100 \quad Esv = \frac{h'2}{h1} \times 100$$

Esv : équivalent de sable visuel

Es : équivalent de sable piston

h 1 : hauteur totale du sable mesurée en utilisant le piston.

h 2 : hauteur totale du sable mesurée en utilisant le piston.

h'2 : hauteur totale du sable mesurée visuellement en utilisant une règle.

- les résultats obtenus dans notre cas :

Tableau II.5 : résultats équivalent de sable de dune

Esv %	h1 : 10.4 cm	h'2 :9.9 cm	95.19
Es %	h1 : 10.4 cm	h2 :9.25 cm	88.94

II.5.1.4.6 Interprétation des résultats :

Les Valeurs préconisées par la norme (NF P 18-598) pour déterminer la nature et la qualité du sable sont illustrées dans le tableau II.6.

Tableau II.6 : Valeurs de l'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable

Esv	Es	Nature du sable	Qualité du sable
< 65	< 60	Sable argileux	Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$65 \leq Esv \leq 75$	$60 \leq Es \leq 70$	Sable largement argileux	De propreté admissible pour le béton de qualité
$75 \leq Esv \leq 85$	$70 \leq Es \leq 80$	Sable propre à faible de fines	Convenant parfaitement pour les bétons de qualité
$Esv \geq 85$	$Es \geq 80$	Sable très propre	Risque d'entraîner un défaut de plasticité

Interprétation :

D'après les résultats obtenus (**$Es=88.94\% > 80\%$**) , on constate que le sable utilisé est très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau

II.6 Déchets Céramique :

La préparation de la poudre de céramique pour son incorporation dans le mortier nécessite généralement une série d'opérations de traitement pour obtenir une poudre fine et homogène. Les principales étapes pour préparer la poudre de céramique sont les suivantes :

- ☛ Broyage : Le broyage est le processus de réduction de la taille des déchets céramiques en une poudre plus fine. Cela est effectué à l'aide de la machine micro Derval (broyeur à boulets) par 24000 rotations à une vitesse régulière.
- ☛ Tamisage : Après le broyage, la poudre de céramique est tamisée à travers des tamis pour éliminer les particules de taille excessive et obtenir une poudre avec une granulométrie uniforme.
- ☛ Séchage : La poudre de céramique doit être séchée pour éliminer toute humidité résiduelle, ce qui peut affecter les propriétés du mortier.
- ☛ Stockage : Une fois la poudre de céramique préparée, elle doit être stockée dans des conditions appropriées pour éviter la contamination ou l'humidité jusqu'à son utilisation dans le béton ou le mortier.





Figure II.11 : Processus de broyage des déchets céramiques

II.6.1 La masse volumique apparente :

On suit la même procédure effectuée sur le sable pour déterminer ρ_{App} Après l'essai on a obtenu les résultats suivants pour 3 échantillons:

Tableau II.7; La masse volumique apparente de déchets de céramique

Propriété	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1070.80	1073.60	1068.20
Moyenne	1070.87 ≈ 1071		

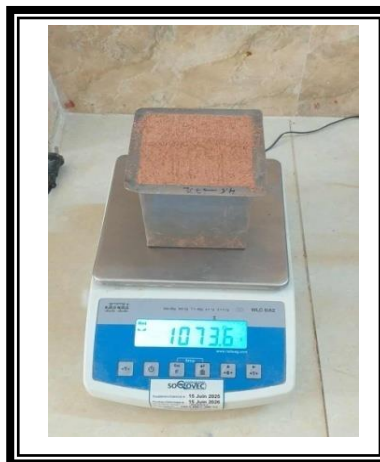


Figure II.12 : La masse volumique apparente de déchets de céramique

II.6.2 La masse volumique absolue :

Aussi ici on suit le même principe que le sable pour déterminer la masse volumique absolue. ρ_{Abs} Après l'essai, nous avons obtenu les résultats suivants :

$$- \rho_{abs} = \frac{M}{V_{ech}} \quad - M_s = 150g \quad - V_1 = 100 \text{ ml} \quad - V_2 = 164 \text{ ml} \quad V_{ech} = V_2 - V_1 = 64 \text{ ml}$$

$$\rho_{abs} = \frac{150}{64} = 2.34 \text{ g/cm}^3$$



Figure II.13 : La masse volumique absolue de déchets de céramique

II.7 L'eau de gâchage:

Pour mélanger notre mortier, nous avons utilisé l'eau du robinet disponible dans notre laboratoire (LBTP) à El oued. Cette eau doit être conforme à la norme NA 1966. Et ne doit pas contenir d'impuretés nocives telles que chlorure, sulfate, matière organique, nitrates, sodium (Na), sels de potassium (K) ... etc. L'analyse chimique de l'eau a été effectuée à L'Algérienne des Eaux (unité Eloued).

II.8 Confection et essais sur mortiers

II.8.1 Constituants du mortiers

II.8.1.1 Fixation d'une teneur en eau (E/C)

La teneur en eau de mortier avec des granulats très fin (fines) doit être augmentée pour maintenir la maniabilité , car la surface spécifique élevés des fines absorbe plus d'eau et puisque l'ensemble des formulations de notre étude composée des matériaux fin (sable de dune , Déchet de céramique broyée), a ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau E (g), suffit pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur des essais préliminaires et par l'expérience, alors on prend un dosage approximatif en eau pour 450 g en ciment égal à 292.5 g (E/C= 0.65) .

II.8.1.2 Formulation du mortier avec le remplacement partiel de sable par le déchets de céramique:

Dans cette étude, nous avons choisi le remplacement partiel de sable par de la poudre de céramique préparée.

Tableau II.8 : Les mortiers avec le remplacement partiel de sable par le poudre de céramique

Référence de mortier	Ciment (g)	Sable de dune (g)	Déchets de Céramique (g)		Eau (g)	E/C
			Poudre	Grossier		
M0 0%	2250	6750	0	0	1462.5	0.65
MCG 30%	2250	4725	0	2025	1462.5	0.65
MCGP 15%P+15%G	2250	4725	1012.5	1012.5	1462.5	0.65
MCP 30%	2250	4725	2025	0	1462.5	0.65

- **Formulation M0** : mortier témoin formulé avec 100% de sable;
- **Formulation MCG** : mortier formulé avec 30% de déchet de céramique (Grossier) et 70% sable;
- **Formulation MCGP15/15** : mortier formulé avec 30% de déchet céramique (15% P + 15%G) et 70% sable;
- **Formulation MCP** : mortier formulé avec 30% de déchet de céramique (Poudre) et 70% sable;

II.8.1.3 Formulation du mortier avec le remplacement partiel de ciment par le déchets de céramique:

Autres formulations dans notre étude caractérisé par le remplacement partiel de ciment par la poudre de céramique préparée.

Tableau II.9 : Les mortiers avec le remplacement partiel de ciment par le poudre de céramique

Référence de mortier	Ciment (g)	Sable de dune (g)	Déchets de Céramique (g)		Eau (g)	E/C
			Poudre	Grossier		
M0 0%	2250	6750	0	0	1462.5	0.65
MCC 10%	2025	6750	225	0	1462.5	0.65
MCC 20%	1800	6750	450	0	1462.5	0.65

- **Formulation M0** : mortier témoin formulé avec 100% de ciment;
- **Formulation MCC10**: mortier formulé avec 10% de déchet de céramique (poudre) et 90% ciment.
- **Formulation MCC20**: mortier formulé avec 20% de déchet de céramique (poudre) et 80% ciment.

II.8.1.4 Préparation du mortier

II.8.1.4.1 Appareillage

- 1- Assiette pour effectuer les essais
- 2- Moule triple de dimensions (4 x 4 x 16 cm)
- 3- Éprouvettes graduées en verre.
- 4- Table à choc
- 5- Malaxeur normalisé
- 6- Balance
- 7- Etuve



Figure II.14 : Equipement pour préparation des mortiers

II.8.1.4.2 Malaxage du mortier

Pour Malaxer chaque gâchée de mortier mécaniquement au moyen du malaxeur, il faut suivre les étapes suivantes :

- 1- Verser l'eau dans le récipient et introduire le ciment ;
- 2- Mettre alors immédiatement le malaxeur en marche à petite vitesse et après 30 s, introduire régulièrement tout le mélange (sable + déchets de céramiques) (pendant les 30 s suivantes). Mettre le malaxeur à sa vitesse la plus grande et continuer à mélanger pendant 30 s supplémentaires ;
- 3- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci ;
- 4- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s. La durée des diverses périodes de malaxage doit être observée à ± 1 s près.



Figure II.15 : Matériaux utilisés dans les mélanges

Tableau II.10:Séquence de malaxage du mortier

Opérations	Durée	Etat du malaxeur
Introduction de l'eau	15 s	Arrêt
Introduction du ciment		
Malaxage	30s	Vitesse lente
Introduction du sable	30s	
Malaxage	30s	Vitesse rapide
Raclage de la cuve	15s	Arrêt
Repos	1 min 15 s	
Malaxage	60s	Vitesse rapide

II.9 Essais de caractérisations physiques et mécaniques des mortiers

II.9.1 Essais sur mortiers frais

II.9.1.1 Mesure de la consistance des mortiers

La consistance est une mesure de la fluidité et/ou de l'humidité du mortier frais et donne une mesure de la déformabilité du mortier frais lorsqu'il est soumis à un certain type de contrainte.

II.9.1.1.1 Essai d'étalement à la table à secousse : (NF EN 1015-3)

II.9.1.1.1.1 Principe

Cet essai est une mesure testant l'aptitude d'un cône de mortier, posé sur une table à secousse, à s'étaler par écoulement sous l'effet d'un certain nombre d'impacts. La consistance est caractérisée par le diamètre moyen de l'éprouvette de mortier frais après secousse.

II.9.1.1.1.2 Appareillage

- 1- Une table à secousse .
- 2- Un moule tronconique, en acier inoxydable ou en laiton, d'une hauteur de $60 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ et d'un diamètre intérieur de $100 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ en bas et de $70 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ en haut ;
- 3- Une dame : constituée d'une tige ronde, rigide et non absorbante, de 40 mm de diamètre et de 200 mm de longueur ;
- 4- Un pied à coulisse, capables de mesurer des diamètres jusqu'à 300 mm ;
- 5- Une truelle ;
- 6- Un couteau à palette.



Figure II.16 : Equipement essai d'étalement à la table à secousse

II.9.1.1.1.3 Le protocole de l'essai

Le mortier frais pour cet essai doit avoir un volume minimal de 1,5 litre et doit être obtenu par réduction de l'échantillon d'essai global à l'aide d'un diviseur d'échantillon ou par quartage. Deux échantillons d'essai doivent être testés.

1 - Avant chaque test, essuyer et nettoyer le disque de la table à secousse, la surface intérieure et les bords du moule avec un chiffon humide, laisser sécher et lubrifier légèrement les surfaces avec de l'huile minérale (sans résine) à très faible viscosité. Si la table n'a pas été utilisée au cours des dernières 24 h, la faire fonctionner pendant dix fois avant utilisation.

2- Placer le moule au centre du disque de la table et introduire le mortier en deux couches. Chaque couche est compactée par au moins 10 petits coups de dame pour assurer un remplissage uniforme du moule. Pendant le remplissage, maintenir fermement le moule sur le disque avec une main.

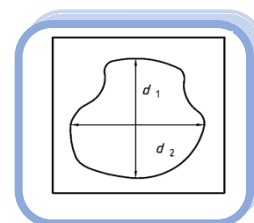
3- Ôter l'excès de mortier à l'aide d'un couteau à palette et essuyer la zone libre du disque, en prenant particulièrement soin d'éliminer l'eau éventuellement présente autour du bord inférieur du moule tronconique.

4- Après environ 15 s, soulever le moule lentement à la verticale et étaler le mortier sur le disque en secouant la table 15 fois à une fréquence constante d'environ une par seconde.

5- Mesurer le diamètre du mortier dans deux directions perpendiculaires l'une à l'autre à l'aide d'un pied à coulisse. Exprimer les résultats en mm (arrondi au mm près).

6 - Calculer la valeur moyenne des deux mesures. Cette valeur moyenne est la valeur d'étalement de l'échantillon de mortier.

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



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

Tableau II.11: Les Classes d'aptitude à l'étalement à la table

Consistance d'utilisation	Etalement à la table (mm)
Mortier Raide	< 140 mm
Mortier Plastique	Entre 140-200 mm
Mortier Fluide	> 200 mm

Après les essais, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau II.12: Les résultats d'étalement à la table

Référence de Formulation	Etalement (mm)
M0 0%	148
MCG 30%	126
MCPG 15%P+15G%	125
MCP 30%	123
MCC 10%	136
MCC 20%	138

II.9.1.2 La masse volumique apparente :

On suit la même procédure effectuée sur le sable de dune pour déterminer ρ_{App} de mortier à l'état frais. Après l'essai, on a obtenu les résultats suivants pour les six mélanges :



Figure II.17: Essais la masse volumique de mortier

Après les essais, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau II.13: Les résultats de la masse volumique

Référence de Formulation	Masse Volumique (kg/m ³)
M0 0%	2076
MCG 30%	2038
MCP 30%	2112
MCPG 15%P+15G%	2095
MCC 10%	2071
MCC 20%	2061

II.9.2 Essais sur mortier durci

II.9.2.1 Mesure des résistances à la compression et à la traction : (EN 196-1: 1994)

II.9.2.1.1 Objectifs

Il s'agit de déterminer les résistances à la compression et à la traction d'un mortier de ciment.

II.9.2.1.2 Principe

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature du liant hydraulique ; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du liant utilisé.

II.9.2.1.3 Laboratoire et équipement

II.9.2.1.3.1 Laboratoire

- 1- Le laboratoire où a lieu la préparation des éprouvettes doit être maintenu à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.
- 2- La chambre humide (ou la grande armoire) pour la conservation des éprouvettes dans le moule doit être maintenue d'une manière continue à une température de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 90 %.
- 3- La température de l'eau dans les récipients de conservation doit être maintenue à $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

II.9.2.1.3.2 Equipements

- 1- Un malaxeur normalisé
- 2- Des moules normalisés: les moules doivent comporter trois compartiments horizontaux permettant la préparation simultanée de trois éprouvettes prismatiques de section transversale de $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ et de 160 mm de longueur (ces éprouvettes sont appelées « éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ ») ;
- 3- Une hausse en métal bien ajustée avec des parois verticales de 20 mm à 40 mm de hauteur. Elle doit être utilisée pour faciliter le remplissage du moule ;
- 4- Deux spatules et une règle métallique plate du type pour étendre et araser le mortier ;
- 5- Un appareil à chocs , il permet d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de $15\text{ mm} \pm 0,3\text{ mm}$ à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s ;
- 6- Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 kN avec une vitesse de mise en charge de $50\text{ N/s} \pm 10\text{ N/s}$. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion;
- 7 - Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 kN (ou plus si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de $2400\text{ N/s} \pm 200\text{ N/s}$. Cette machine est équipée d'un dispositif de compression .



Figure II.18 : Hausse du moule

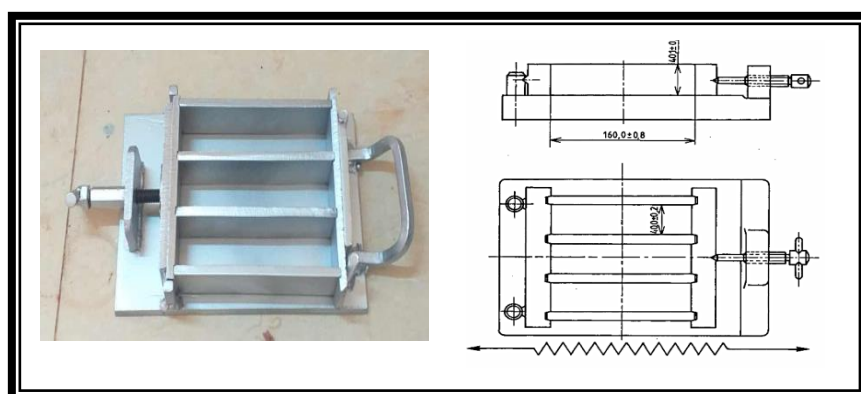


Figure II.19 : Moules normalisés

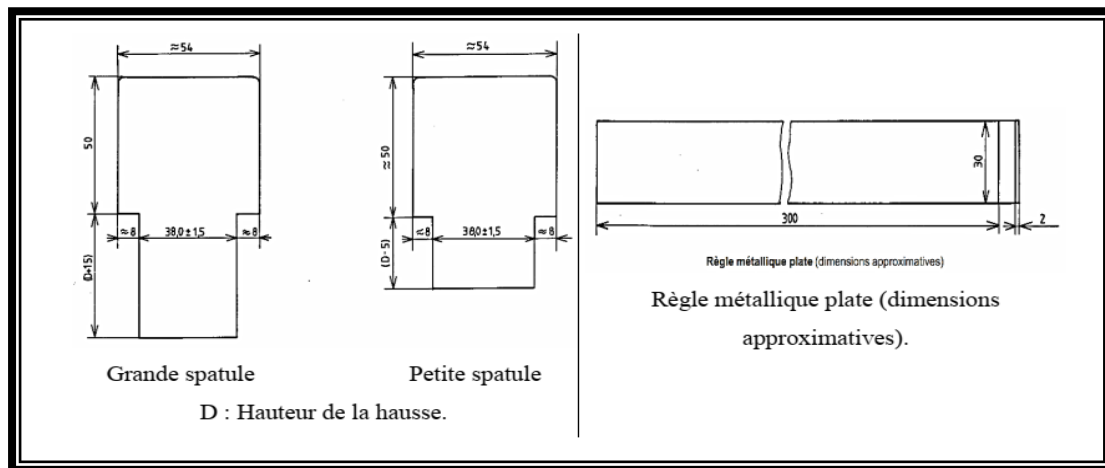


Figure II.20 : Exemple de spatules et de règle métallique.



Figure II.21 : Machine d'essai de compression

II.9.2.1.4 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes doivent être de forme prismatique 40 mm × 40 mm × 160 mm.

II.9.2.1.4.1 Moulage des éprouvettes

Les éprouvettes doivent être moulées immédiatement après la préparation du mortier en suivant les étapes suivantes :

- 1- Fixer fermement le moule et sa hausse à la table à chocs (la longueur des compartiments parallèle à la direction des bras et donc perpendiculaire à l'axe de rotation de la came) ;
- 2- Introduire en une ou plusieurs fois, avec une cuillère convenable, la première de deux couches de mortier (chacune à peu près 300 g) dans chaque compartiment du moule, directement à partir du récipient de malaxage ;
- 3- Étaler la couche uniformément en utilisant la plus grande spatule, qui doit être tenue verticalement, ses épaulements en contact avec la partie supérieure de la hausse et la tirer une fois dans chaque direction, c'est-à-dire en avant et en arrière le long de chaque compartiment du moule ;
- 4- Serrer la première couche de mortier par 60 chocs ;

- 5- Introduire la seconde couche de mortier, niveler avec la petite spatule et serrer à nouveau par 60 chocs
- 6- Retirer avec précaution le moule de la table à chocs et ôter la hausse ;
- 7- Enlever immédiatement l'excès de mortier avec la règle métallique plate posée de chant, animée de lents mouvements transversaux de scie, une fois dans chaque direction comme indiqué à la figure 3.5 ;
- 8- Lisser la surface des éprouvettes en utilisant la même règle tenue presque à plat.
- 9- Étiqueter ou marquer les moules pour identifier les éprouvettes et leur position relative sur la table à chocs.

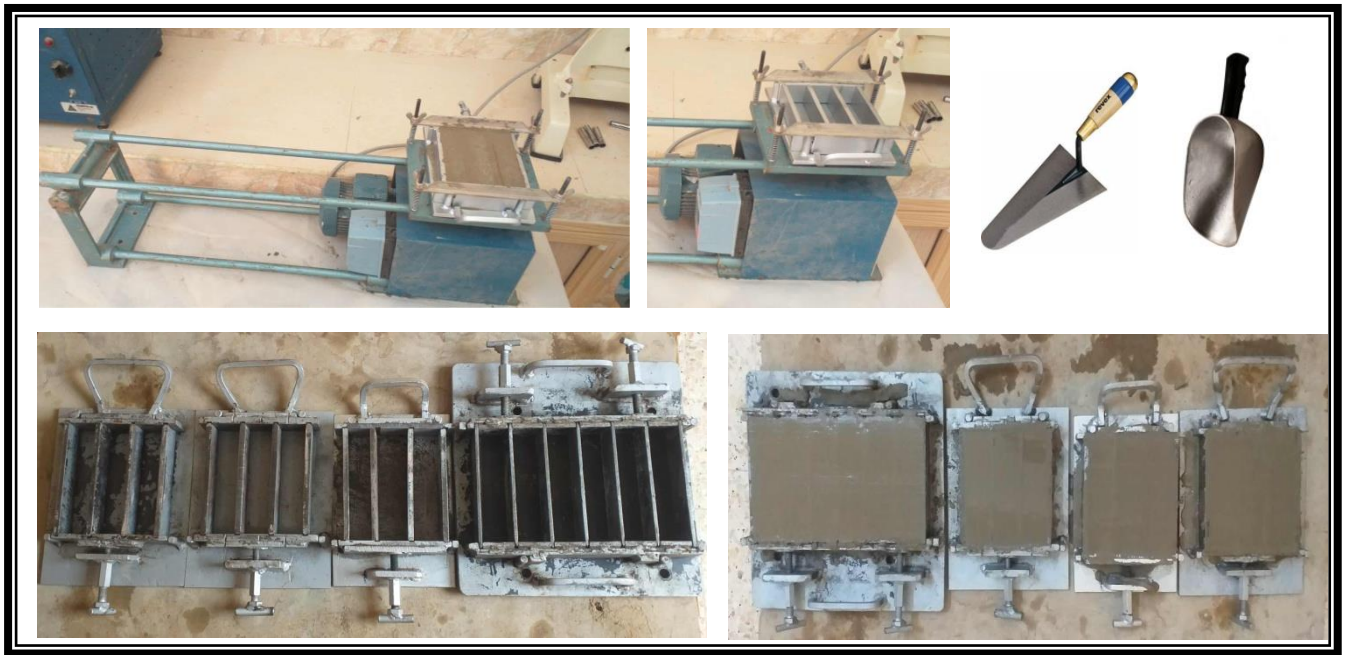


Figure II.22 : Ensemble des Moulage et des éprouvettes avec appareil à choc

II.9.2.1.5 Conservation des éprouvettes

II.9.2.1.5.1 Manutention et magasinage avant démoulage

- 1- Enlever le résidu de mortier restant sur le périmètre du moule par suite de l'arasement.
- 2- Poser une plaque plane de verre de 6 mm d'épaisseur sur le moule. Une plaque en acier ou tout autre matériau imperméable de dimensions semblables peut être utilisé.
- 3- Placer chaque moule couvert, convenablement identifié, sans retard sur un support horizontal dans la chambre ou armoire humide.
- 4- Chaque moule est extrait de la chambre de conservation à l'heure prévue pour son démoulage.

II.9.2.1.5.2 Démoulage des éprouvettes

1- Effectuer le démoulage avec toutes les précautions requises à l'aide de marteaux en plastique ou en caoutchouc ou des dispositifs spéciaux. Le démoulage est effectué :

au plus tôt 20 min avant l'essai pour les essais à 24 h ;

entre 20 h et 24 h après le moulage pour les essais au-delà de l'échéance de 24 h.

2- Après démoulage, conserver les éprouvettes à essayer à 24 h (ou 48 h quand ce délai de démoulage est nécessaire) recouvertes d'un linge humide jusqu'à ce qu'elles soient essayées.

3- Marquer convenablement les éprouvettes à conserver dans l'eau, pour l'identification ultérieure, par exemple avec une encre ou un crayon résistant à l'eau.



Figure II.23: Éprouvettes démoulées nommées et numérotées.

II.9.2.1.5.3 Conservation des éprouvettes dans l'eau

1- Immerger sans retard les éprouvettes marquées, de manière convenable, soit horizontalement, soit verticalement, dans l'eau à $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et dans des récipients adéquats (la lame d'eau entre les éprouvettes ou les couvrants ne peut être inférieure à 5 mm).

2- Les éprouvettes, devant être essayées à des échéances particulières (autres que 24 h ou 48 h dans le cas de retard du démoulage), doivent être retirées de l'eau au maximum 15 min avant que l'essai soit exécuté.

3- Enlever tout dépôt sur les faces d'essai.

4- Recouvrir les éprouvettes d'un linge humide jusqu'au moment des essais.



Figure II.24: Epreuves conservées dans l'eau.

II.9.2.1.5.4 Âge des éprouvettes pour les essais de résistance mécanique

Compter l'âge des éprouvettes à partir du moment du malaxage du ciment et de l'eau, jusqu'au début de l'essai. Les essais de résistance doivent être effectués à différents âges dans les limites suivantes :

24 h ± 15 min ; 48 h ± 30 min ; 72 h ± 45 min ; 7 jours ± 2 h ; 28 jours ± 8 h.

II.9.2.2 Résistance à la flexion (EN 196-1:1994):

- 1- Placer le prisme dans un dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci.
- 2- Appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter sans à-coups à raison de 50 N/s ± 10 N/s, jusqu'à rupture.
- 3- Conserver les demi-prismes humides jusqu'au moment des essais en compression.
- 4- Calculer la contrainte de traction (la résistance à la flexion) R_f (en N/mm²) en utilisant la formule suivante :

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

Où :

- R_f : est la résistance à la flexion, en N/mm² ;
 - b : est le côté de la section carrée du prisme, en mm ;
 - F_f : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en N ;
 - l : est la distance entre les appuis, en mm.
- Calculer la moyenne de trois contraintes de traction



Figure II.25 :Essai de résistance à la flexion

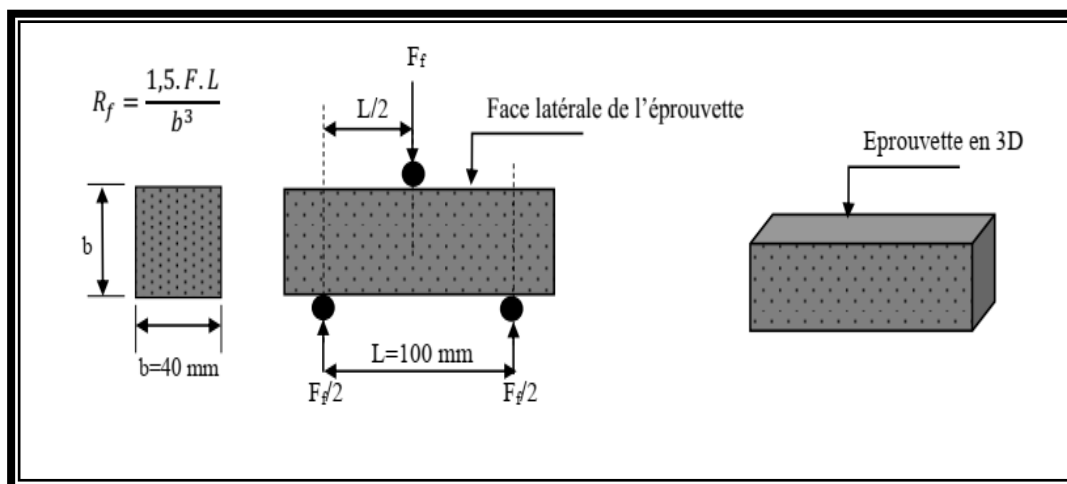


Figure II.26:Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

II.9.2.3 Résistance à la compression (EN 196-1:1994):

Les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion doivent être essayés en compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 40 mm × 40 mm.

- 1- Essayer les demi-prismes en compression sur les faces latérales de moulage
- 2- Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0,5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux ou aux plaques auxiliaires d'environ 10 mm.
- 3- Augmenter la charge sans à-coups à la vitesse de 2400 N/s ± 200N/s durant toute la durée d'application de la charge jusqu'à la rupture.
- 4- Calculer la résistance à la compression R_c (en N/mm²) au moyen de la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{16000}$$

Où :

R_c : est la résistance à la compression, en N/mm² ;

F_c : est la charge maximale à la rupture, en N

$1600 = 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ est l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires, en millimètres carrés.



Figure II.27 :Essai de Compression

II.10 Essais thermiques

Pour étudier le comportement à haute température des mortiers, il est nécessaire d'appliquer des traitements thermiques. Pour cela, les éprouvettes subissent un traitement lent ($5^{\circ}\text{C}/\text{min}$), correspondant à la vitesse recommandée pour les dimensions d'éprouvettes utilisées et afin de déterminer les propriétés mécaniques des mortiers étudiés.

Afin de réaliser ces cycles de chauffage, on a utilisé un four. Il est piloté par un régulateur connecté à un thermocouple placé dans le four. Une ventilation est associée au chauffage pour brasser l'air et ainsi avoir une température uniforme dans le four.

Les échantillons sont soumis à des différentes températures (200°C , 450°C et 700°C), une stabilité de deux heures est appliquée afin d'homogénéiser la température au sein des éprouvettes, puis un refroidissement jusqu'à la température ambiante. Le choix de ces températures est fait par rapport au comportement des différents composants de la matrice cimentaire, des fibres de polypropylène et la capacité du four.

La période de chauffage était de deux heures à chaque augmentation de température pour permettre au mortier à l'intérieur des échantillons d'atteindre la température requise. Après chaque étape du traitement thermique, les échantillons ont été pesés pour calculer la perte de masse et calculer la résistance résiduelle en compression et résistance résiduelle à la traction par flexion.

II.10.1 Disposition dans le four

Les éprouvettes prismatiques de mortier ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$) doivent être disposées dans le four de manière à assurer une répartition homogène de la chaleur, généralement à plat ou sur la tranche sur des grilles, avec un espacement suffisant pour permettre la circulation de l'air chaud. Elles sont souvent chauffées à des températures cibles (ex. 200°C - 800°C) avant des essais mécaniques, avec la procédure suivante :

II.10.2 La méthodologie

- ☛ **Positionnement** : Placer les éprouvettes sur la tranche (position verticale ou horizontale) sur des supports perforés (grilles) permettant une circulation de l'air à 360° .
- ☛ **Espacement** : Veiller à ce qu'elles ne se touchent pas entre elles et ne touchent pas les parois du four pour éviter des points chauds ou froids.
- ☛ **Préchauffage** : Le four doit atteindre la température de consigne avant d'introduire les éprouvettes.
- ☛ **Vitesse de chauffe** : Une vitesse de ($5^{\circ}\text{C}/\text{min}$), est souvent utilisée pour éviter un endommagement prématuré, la fissuration étant un risque important lors d'un chauffage rapide.
- ☛ **Sécurité** : Les éprouvettes de ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$) doivent être bien séchées avant l'essai pour éviter l'éclatement.



Figure II.28: Disposition des éprouvettes dans le four

II.11 Absorption par immersion totale (NBN B 15-215)

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, en déterminant la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée.

Rappelons que l'essai consiste à un séchage des éprouvettes (4x4x16) cm³ du mortier jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à 150°C. Ensuite l'immersion totale des éprouvettes dans un bac à eau à 20±2°C durant un minimum de 48h et jusqu'à saturation du matériau. Avant la pesée l'éprouvette est essuyée avec une éponge humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle. La masse est considérée constante lorsque deux pesées successives à 24h d'intervalle ne donnent pas une différence supérieure à 0.1%. Une fois la masse saturée est obtenue et la masse à sec préalablement connue, nous avons déterminé la masse d'eau absorbée.

L'absorption d'eau par immersion Ab est exprimée en % de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

M_a : masse de l'échantillon imbibé d'eau.

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C

$$Ab\% = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$



Figure II.31 : Des éprouvettes de mortier durci au cours de séchage

II.12 Perte de masse (EN 12390)

Pour la détermination de la perte de masse en fonction du cycle de chauffage-refroidissement, les éprouvettes sont pesées avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement. Les éprouvettes issues du chauffage sont pesées directement afin d'éviter tout phénomène de réhydratation avec le milieu ambiant.

L'essai consiste donc à déterminer la perte de matière (ou de masse) qu'ont subi les éprouvettes lors du chauffage par rapport à leur état initial (état avant le chauffage). La perte de masse exprimée en pourcentage est obtenue de la façon suivante :

$$\text{Perte de masse} = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100\%$$

Avec :

M₀ : la masse de l'éprouvette à la température ambiante (avant le chauffage),

M_t : la masse de l'éprouvette refroidie après le cycle de chauffage-refroidissement. Elles sont pesées à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0,1g

II.13 Essai d'auscultation dynamique (EN 12504-4)

C'est un essai non destructif très important qui nous permet de détecter - à la fois plusieurs caractéristiques du mortier durci telles que : le degré de compacité, le taux de fissuration, les dommages causés par le gel ou l'écart de température...etc.

Cet essai consiste à mesurer la vitesse longitudinale du son dans le mortier à l'aide d'un appareil comportant une boîte de mesure, et deux têtes (une émettrice et l'autre réceptrice).



Figure II.32: Appareil d'auscultation sonique et ses accessoires.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la vitesse du son :

- ☛ Mesure en surface;
- ☛ Mesure en transparence.

Cette dernière présente la meilleure méthode. Elle consiste à presser les deux têtes de mesure sur les deux faces de l'éprouvette, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission du son. La surface du mortier doit être raisonnablement plane et bien nettoyée.

Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation en micro -seconde (μs). La vitesse de propagation est donnée alors par l'équation suivante :

$$V = \frac{S}{t}$$

- V : vitesse de propagation en m / sec.
- S : distance entre les têtes en (mètre) mesurée avec une précision de 1 %
- t : temps en micro - seconde (μs).

La vitesse dans un mortier normal est environ de 4000 à 4800 m/sec.

Tableau II.14: Propagation des impulsions.

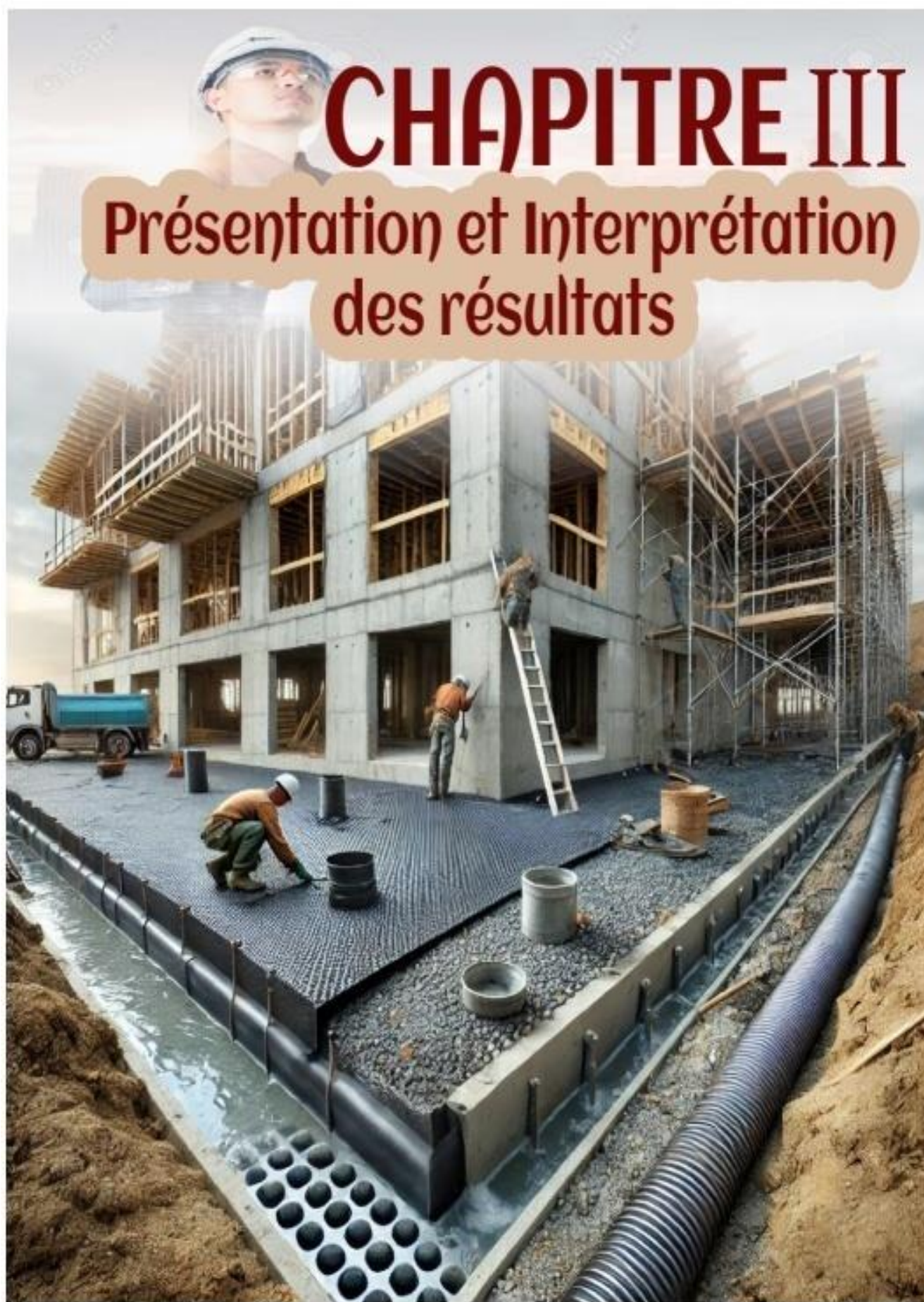
Vitesse du son en m/s	Appreciation de quality
$V \geq 4200 \text{ m/s}$	Mortier à très haute résistance
$3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$	Mortier à haute résistance
$3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$	Mortier de moyenne résistance
$2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$	Mortier de faible résistance



Figure II.33: Essai d'auscultation.

II.13 Conclusion

La présentation des caractéristiques des matériaux utilisés, décrit une étude sur la faisabilité technique basé sur des mortiers écologiques de remplacer des constituants traditionnels par sable de dune et de déchets céramiques broyés , en se concentrant sur la méthodologie et la caractérisation des matériaux , Cette étude démontre le potentiel de valorisation des déchets céramiques pour produire des mortiers écologiques performants, satisfaisant les critères de maniabilité, aspect, résistance et durabilité, tout en soulignant la nécessité d'ajuster le dosage en eau pour maintenir une maniabilité adéquate Les caractérisations et protocoles normalisés garantissent la fiabilité, ouvrant des perspectives pour une utilisation durable en construction locale les matériaux locaux (sable de dune) et les déchets (céramique), une fois correctement caractérisés et préparés, constituent une base méthodologique solide pour formuler des mortiers durables et résistants .



III.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, on présente les résultats obtenus lors des expériences de façon à pouvoir les interpréter. L'analyse portera d'abord sur les propriétés des six types de mortiers basé sur le sable de dune et les déchets de céramique (0% ,30%G , 30%(15%G+15%P) , 30%P) comme une substitution par rapport le sable et (10% , 20%) par rapport le ciment à l'état frais et à l'état durci. Le test de compression a été fait sur des échantillons de forme prismatique de dimensions (4x4x16cm), pour la caractérisation sous chargement de traction par flexion trois points.

Ce chapitre vise également à étudier le comportement de ces types de mortiers sous différents cycles de chauffage-refroidissement (80°C, 250°C, 500°C , 750°C). L'analyse des résultats qui concernent la perte de masse, la résistance en compression et la résistance à la traction par flexion sous différentes températures.

Pour chaque mode opératoire, au moins trois tests ont été effectués pour caractériser la reproductibilité et la dispersion des résultats obtenus. Les courbes, les histogrammes et tableaux sont présentés et analysés pour chaque variante

III.2 Formulations des mortiers:

Nous avons confectionné six (06) formulations de mortier au total :

- ☛ **Formulation (M0)** : mortier témoin formulé avec 100% de sable de dune;
- ☛ **Formulation (MCG)** : mortier formulé avec 30% de déchet de céramique (100% Grenu) +70% sable de dune
- ☛ **Formulation (MCGP15/15)** : mortier formulé avec 30% de déchet de céramique (15% Grenu +15% Poudre) + 70% sable de dune
- ☛ **Formulation (MCP)** : mortier formulé avec 30% de déchet de céramique (100% Poudre) +70% sable de dune
- ☛ **Formulation (MCC10)** : mortier formulé avec 10% de déchet de céramique (100% Poudre) +90% ciment
- ☛ **Formulation (MCC20)** : mortier formulé avec 20% de déchet de céramique (100% Poudre) +80% ciment

III.3. Résultats des essais sur mortier frais:

III.3.1. Ouvrabilité:

III.3.1.1 Remplacement partiel de sable par les déchets de Substitution:

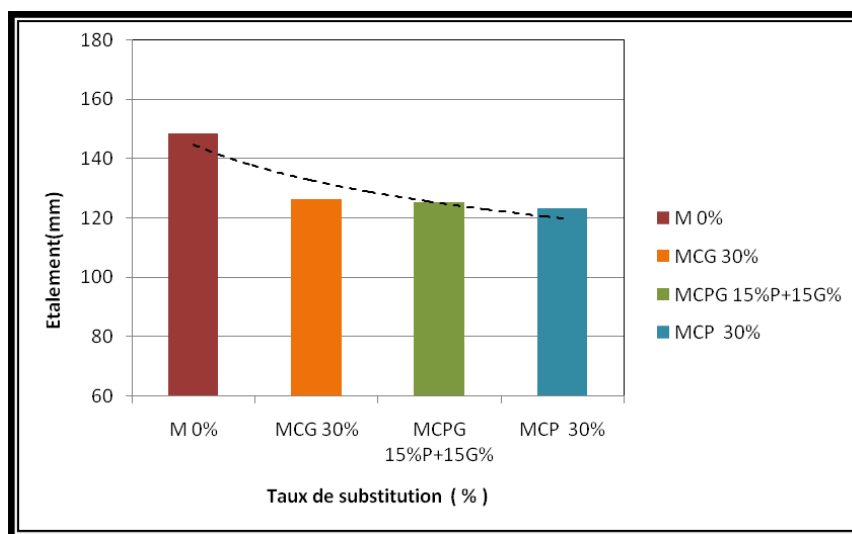


Figure III.1 : Evolution de l'étalement des mortiers sur la table à secousses en fonction du taux de substitution

III.3.1.2 Remplacement partiel de ciment par les déchets de Substitution:

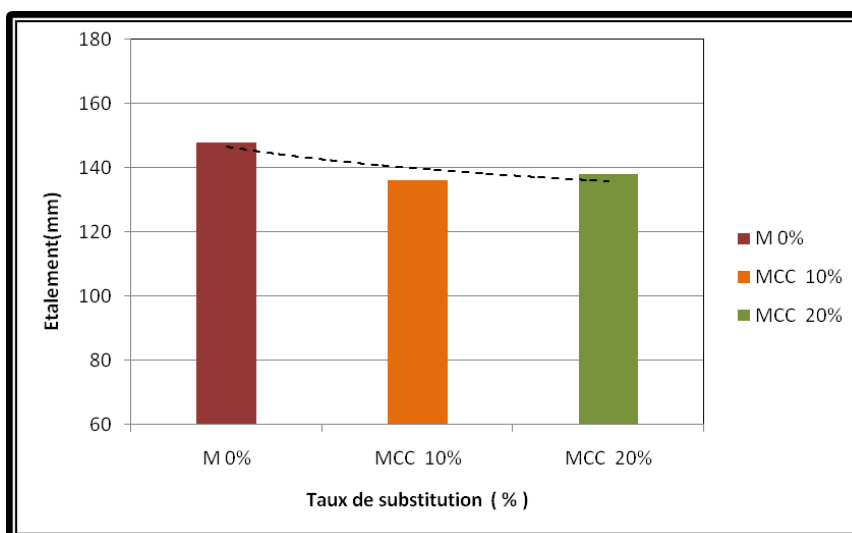


Figure III.2 : Evolution de l'étalement des mortiers sur la table à secousses en fonction du taux de substitution

Interprétation: Le remplacement par des déchets substitution influence négativement l'ouvrabilité des mortiers, surtout à des taux élevés de substitution (**MCG 30%**) et (**MCP 30%**). Toutefois, certaines substitutions modérées, comme (**MCC 10% et 20%**), donnent des résultats acceptables. Ainsi, l'utilisation des déchets céramiques reste possible, mais nécessite un ajustement de la teneur en eau ou l'ajout d'adjuvants plastifiants pour conserver une bonne consistance.

III.3.2 Densité à l'état frais

III.3.2.1 Remplacement partiel de sable par les déchets de Substitution:

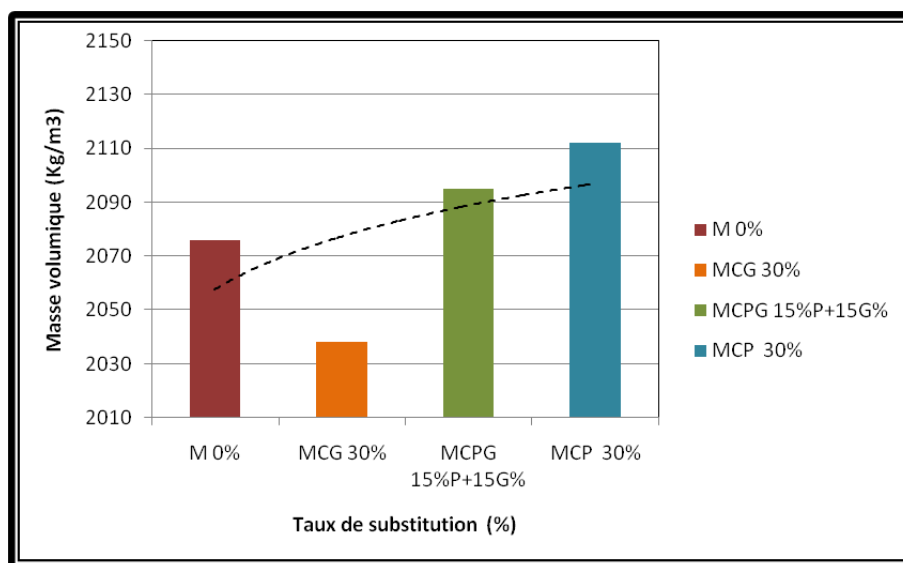


Figure III.3 : Effet du taux de substitution sur la masse volumique des mortiers

III.3.2.2 Remplacement partiel de ciment par les déchets de Substitution:

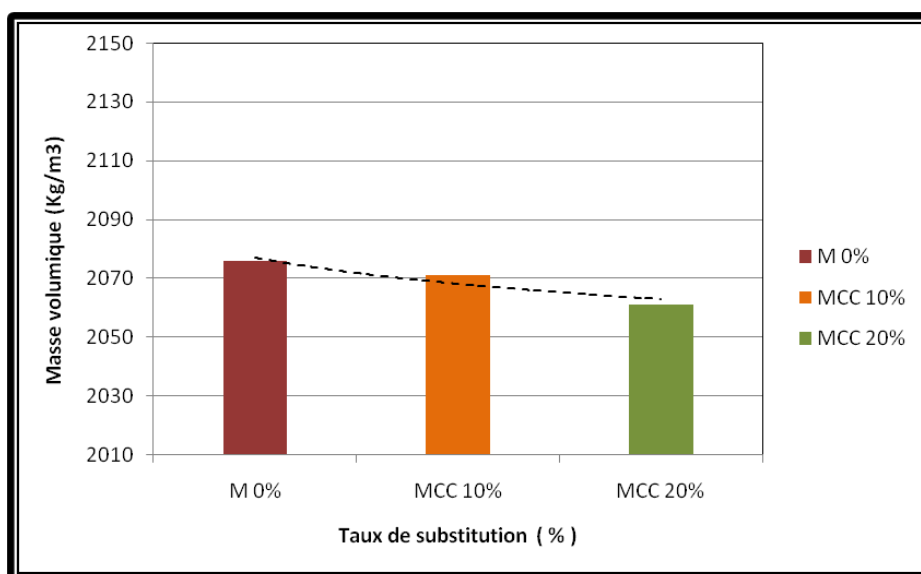


Figure III.4 : Effet du taux de substitution sur la masse volumique des mortiers

Interprétation: Globalement, la masse volumique apparente dépend fortement de la granulométrie et du taux de substitution incorporée : Les particules fines (poudre céramique) améliorent la compacité et augmentent la masse volumique. Les particules grossières tendent à réduire la densité en raison des vides générés. Les mélanges combinés offrent un compromis intéressant entre compacité et substitution. Ainsi, la formulation MCP 30 % apparaît comme la plus favorable pour obtenir un mortier plus dense et potentiellement plus performant mécaniquement et durablement.

III.4 Résultats des essais sur mortier à l'état durci :

III.4.1 Remplacement partiel de sable par les déchets de Substitution:

III.4.1.1 Caractérisation physique :

III.4.1.1.1 Absorption d'eau :

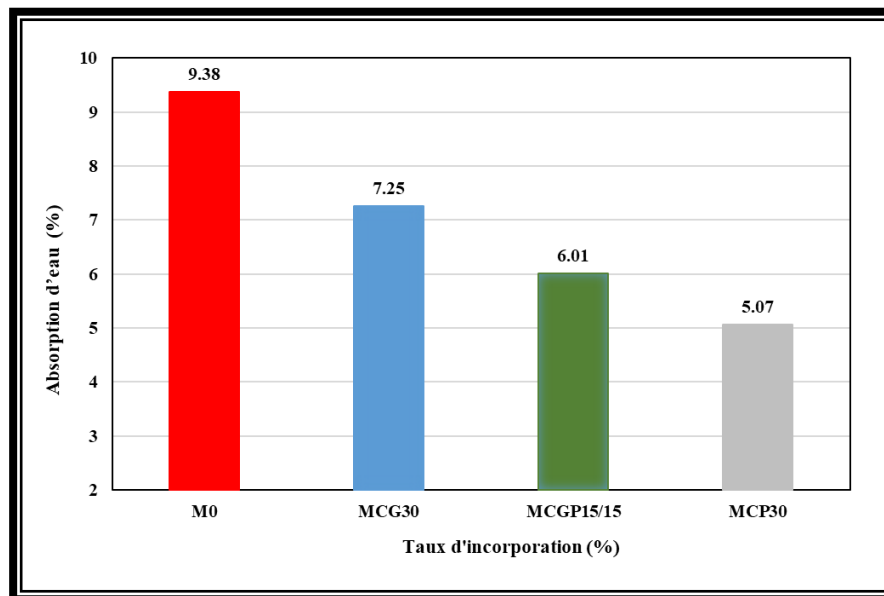


Figure III.5 : Evolution de l'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution

III.4.1.1.2 Masse volumique apparente :

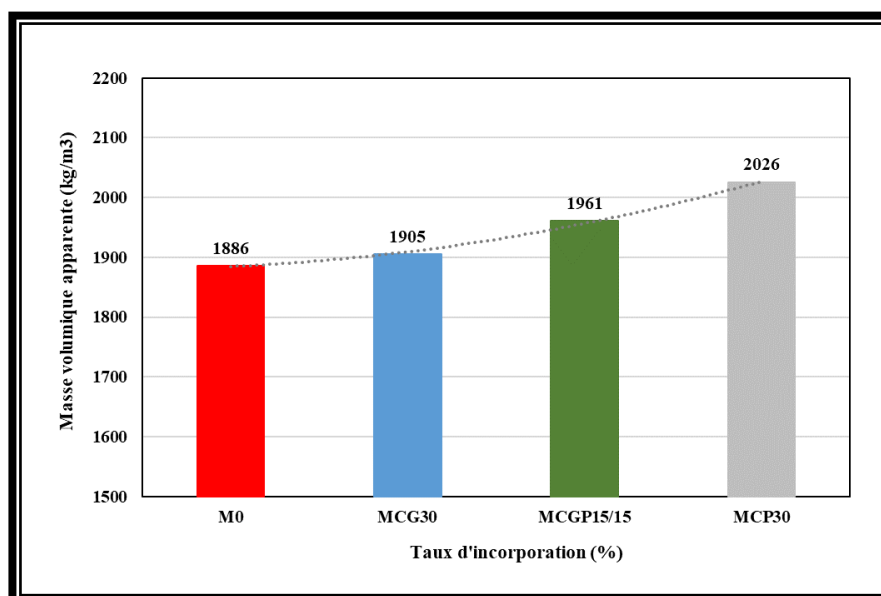


Figure III.6 : Effet du taux de substitution sur la masse volumique

III.4.1.1.3 Résultats d'ultrason (UPV) :

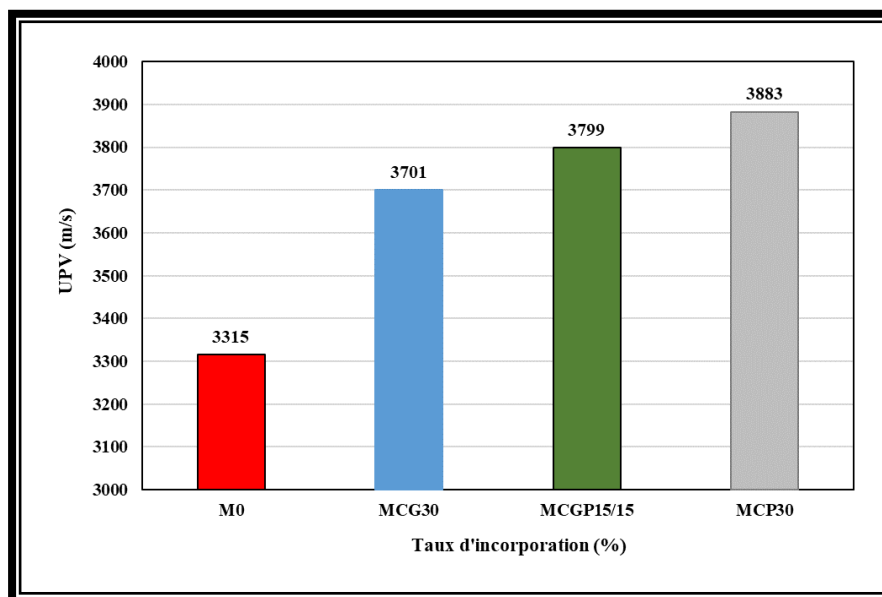


Figure III.7 : Evolution de l'UPV en fonction du taux de substitution

Interprétation:

- ✓ L'incorporation des déchets entraîne une diminution progressive du taux d'absorption d'eau du mortier, qui passe de **9,38 %** pour le témoin (M0) à **5,07 %** pour le mélange MCP30. Cette baisse traduit une réduction de la porosité ouverte, indiquant que la substitution du sable par ces déchets améliore la compacité et l'imperméabilité de la matrice cimentaire.
- ✓ L'incorporation des déchets en substitution partielle du sable entraîne une augmentation progressive de la masse volumique apparente du mortier, qui passe de **1886 kg/m³** (M0) à **2026 kg/m³** (MCP30). Cette évolution positive confirme l'amélioration de la compacité du matériau, corrélée directement à la baisse de l'absorption d'eau observée précédemment.
- ✓ La vitesse de propagation des ultrasons (UPV) augmente nettement avec l'incorporation des déchets à la place du sable, s'élevant de **3315 m/s** (M0) à **3883 m/s** (MCP30). Cette hausse de la vitesse ultrasonique confirme la densification de la structure interne du mortier et la réduction de ses vides, ce qui est en parfaite cohérence avec l'augmentation de la masse volumique et la baisse de l'absorption d'eau.

III.4.1.2 Caractérisation mécanique :

III.4.1.2.1 Résistance à la flexion :

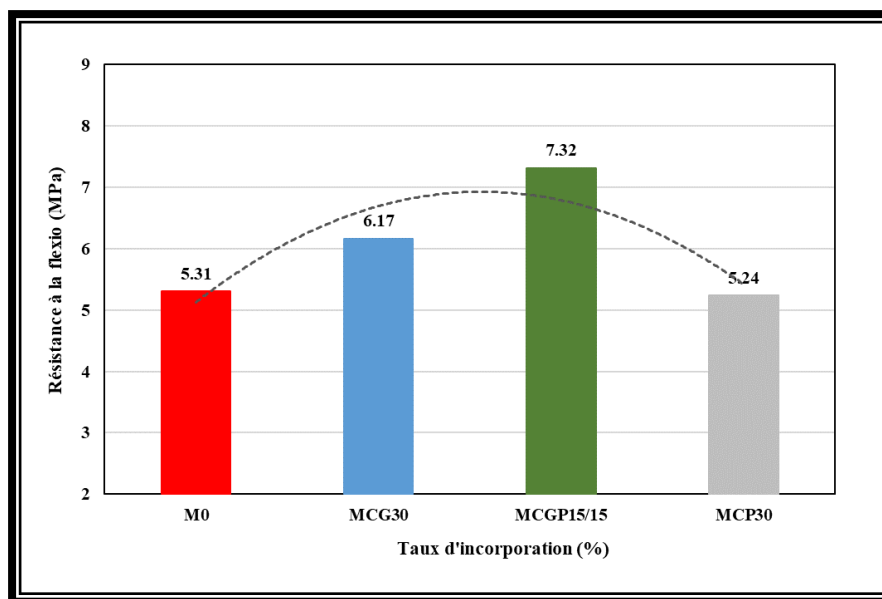


Figure III.8 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du taux de substitution

III.4.1.2.2 la résistance à la compression :

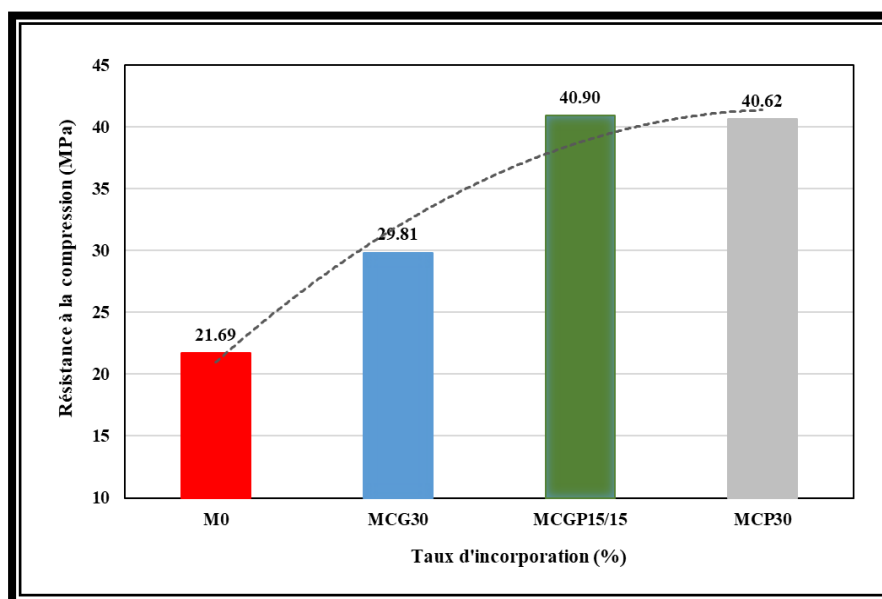


Figure III.9 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution

Interprétation:

☛ La résistance à la flexion s'améliore significativement avec l'incorporation des déchets à la place du sable, atteignant un maximum de **7,32 MPa** pour le mélange MCGP15/15 contre **5,31 MPa** pour le témoin (M0). Cette augmentation, qui fléchit légèrement à **5,24 MPa** pour MCP30, met en évidence un effet de synergie optimal entre les constituants qui renforce l'adhérence matrice-granulats et la cohésion interne du mortier.

☛ La résistance à la compression augmente de manière spectaculaire avec la substitution du sable, passant de **21,69 MPa** (M0) à un maximum de **40,90 MPa** pour le mélange MCGP15/15. Cette nette amélioration structurelle s'explique par la forte densification du squelette granulaire (effet filler) et le renforcement mécanique apporté par ces déchets de substitution au sein de la matrice

III.4.2 Remplacement partiel de ciment par les déchets de Substitution:

III.4.2.1 Caractérisation physique :

III.4.2.1.1 Absorption d'eau :

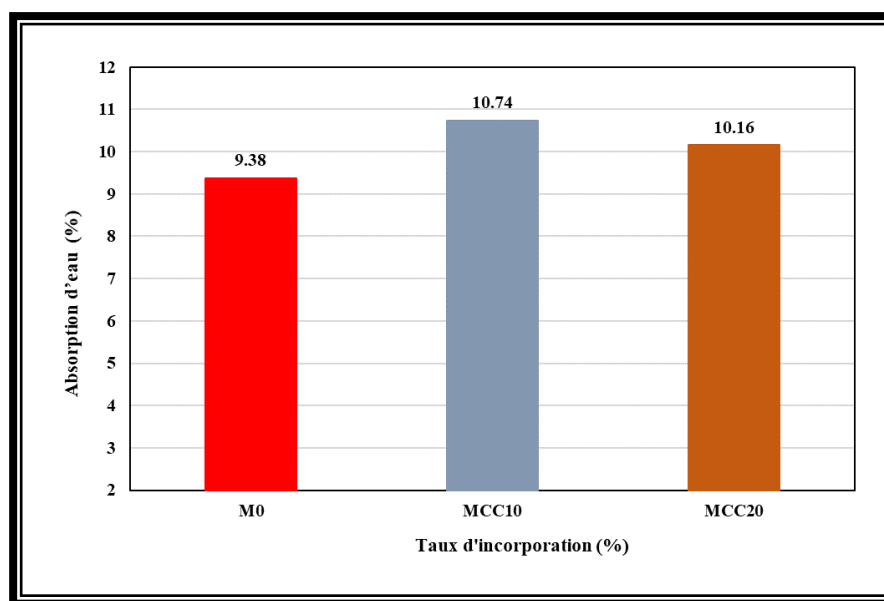


Figure III.10 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du taux de substitution

III.4.2.1.2 Masse volumique apparente

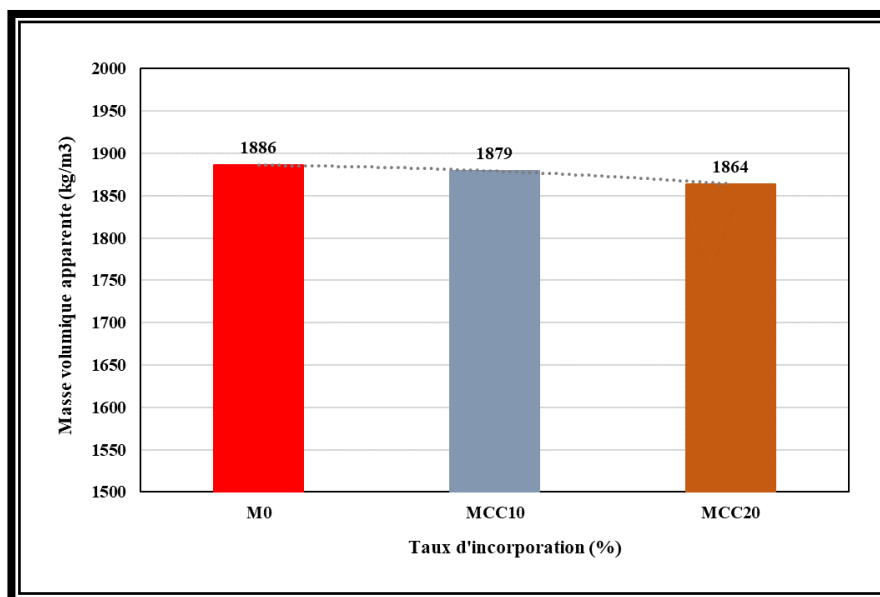


Figure III.11 : Effet du taux de substitution sur la masse volumique

III.4.2.1.3 Résultats d'ultrason (UPV)

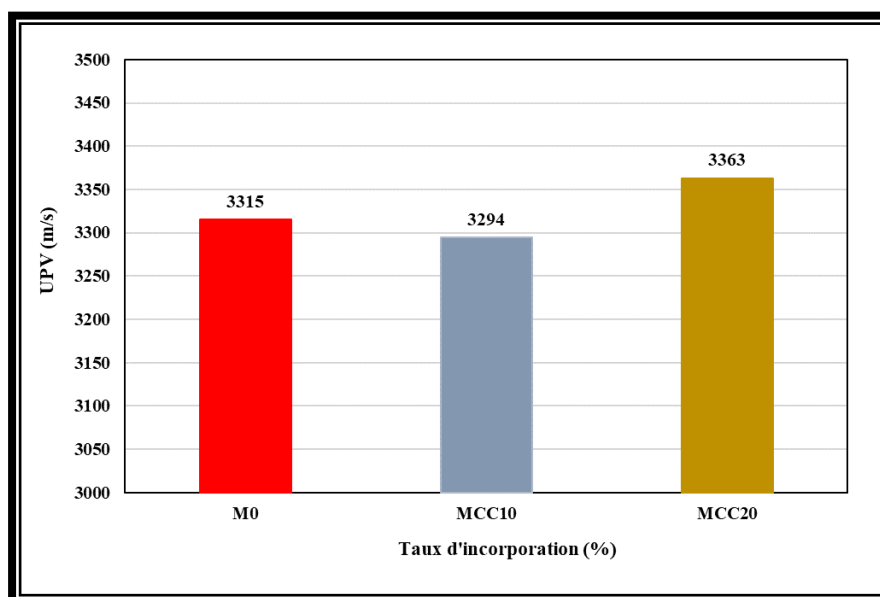


Figure III.12 : Evolution de l'UPV en fonction du taux de substitution

Interprétation:

☛ Le remplacement partiel du ciment par ces déchets de substitution entraîne une augmentation du taux d'absorption d'eau, qui s'élève à **10,74 %** pour MCC10 avant de redescendre légèrement à **10,16 %** pour MCC20, restant toutefois supérieur au témoin (M0 à **9,38 %**). Cette hausse indique un accroissement de la porosité ouverte du mortier, potentiellement lié à une modification de la demande en eau ou à une réactivité plus faible des déchets par rapport au ciment initial.

☛ Le remplacement partiel du ciment par les déchets provoque une diminution progressive de la masse volumique apparente, chutant de **1886 kg/m³** (M0) à **1864 kg/m³** (MCC20). Ce gain de légèreté s'explique par la densité plus faible des déchets substitués ou par une augmentation de la porosité interne, ce qui concorde avec la hausse de l'absorption d'eau notée précédemment

☛ Le remplacement partiel du ciment par les déchets provoque d'abord une légère baisse de la vitesse des ultrasons (UPV) à **3294 m/s** pour MCC10, suivie d'une hausse à **3363 m/s** pour MCC20, dépassant le témoin M0 (**3315 m/s**). Cette évolution suggère qu'à un taux d'incorporation plus élevé (20 %), un effet filler ou une activité pouzzolanique tardive compense la perte de compacité initiale en densifiant la matrice cimentaire

III.4.2.2 Caractérisation mécanique :

III.4.2.2.1 Résistance à la flexion :

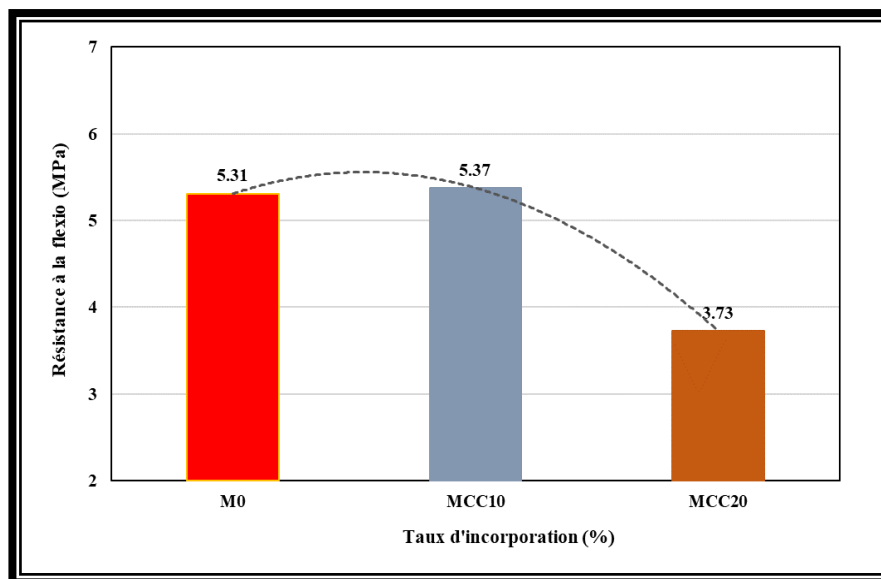


Figure III.13 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du taux de substitution

III.4.2.2.2 la résistance à la compression :

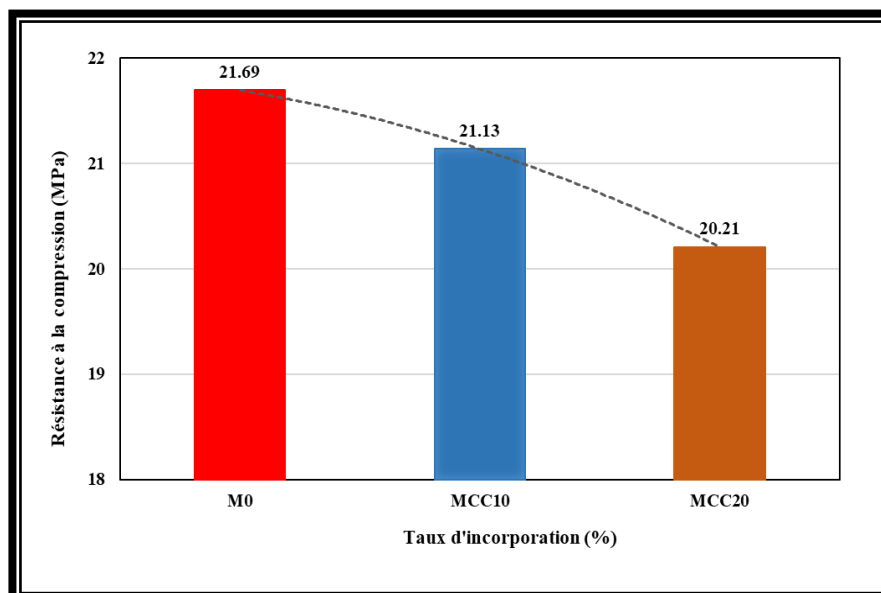


Figure III.14 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution

Interprétation:

☛ Le remplacement partiel du ciment par les déchets maintient une résistance à la flexion stable à **5,37 MPa** pour un taux de 10 % (MCC10), avant d'enregistrer une chute notable à **3,73 MPa** à 20 % (MCC20). Cette diminution à fort taux s'explique par l'effet de dilution du clinker, où la réduction de la quantité de ciment actif limite la formation des hydrates (C-S-H) responsables de la cohésion de la matrice

☛ Le remplacement partiel du ciment par les déchets entraîne une diminution progressive de la résistance à la compression, qui baisse de **21,69 MPa** (M0) à **20,21 MPa** (MCC20). Cette chute s'explique par la réduction de la quantité de clinker disponible (effet de dilution), ce qui ralentit ou limite le développement des produits d'hydratation responsables des performances mécaniques du mortier.

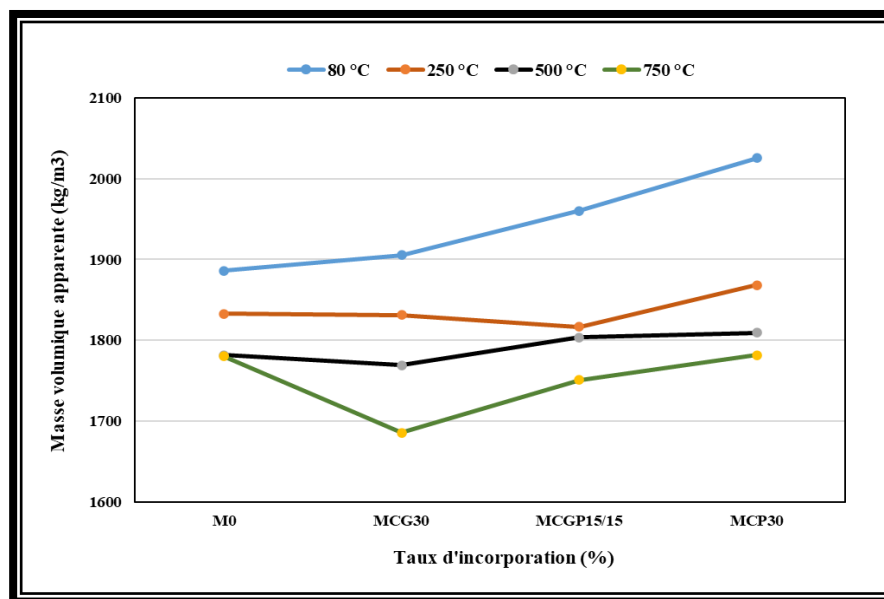
III.5 Caractérisation thermophysique:**III.5.1 Remplacement partiel de sable par les déchets de Substitution:****III.5.1.1 Caractérisation physique :****III.5.1.1.1 Masse volumique apparente :**

Figure III.15 : Évolution de la masse volumique apparente à la haute température

III.5.1.1.2 Résultats d'ultrason (UPV) :

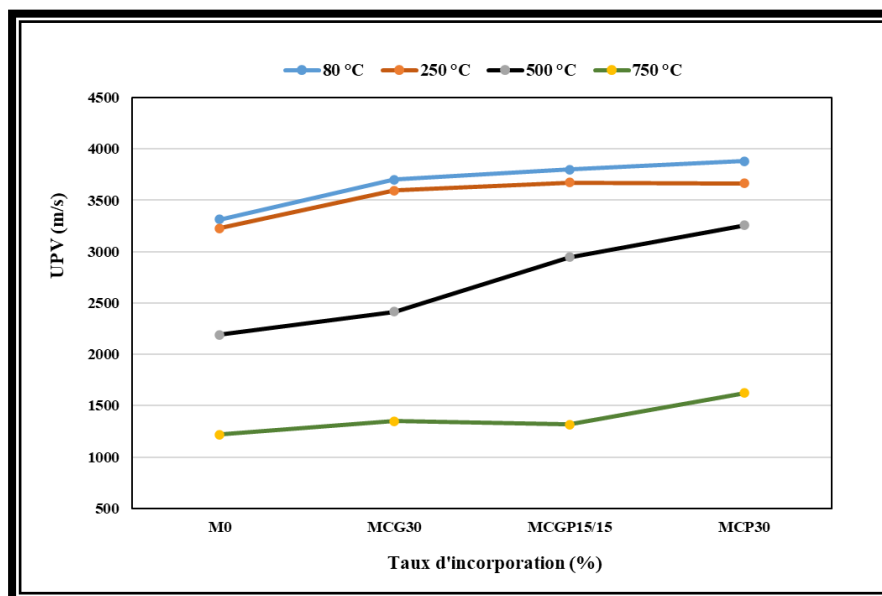


Figure III.16 : Évolution de l'ultrason à la haute température

III.5.1.1.3 Perte de masse :

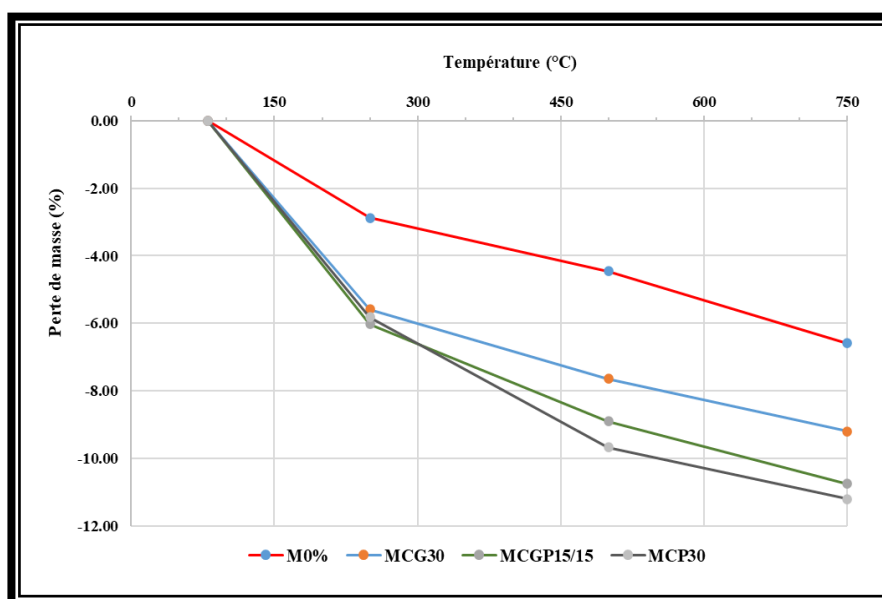


Figure III.17 : Évolution de la perte de masse à la haute température

Interprétation:

☛ L'augmentation de la température de 80 °C à 750 °C provoque une baisse systématique de la masse volumique apparente pour tous les mortiers, liée au départ de l'eau (libre puis liée) et à la décomposition des hydrates. Cependant, quel que soit le palier thermique, les mortiers contenant les déchets de substitution (en particulier MCP30) maintiennent une masse volumique supérieure au témoin M0, confirmant leur meilleure stabilité physique à haute température.

☛ L'exposition aux hautes températures de **80 °C à 750 °C** entraîne une chute sévère de la vitesse des ultrasons (UPV) pour tous les mélanges, traduisant la dégradation microstructurale et la fissuration thermique de la matrice. Néanmoins, à chaque palier thermique, les mortiers intégrant les déchets en substitution du sable (surtout MCP30) affichent des vitesses systématiquement supérieures au témoin M0, prouvant leur meilleure intégrité structurelle face au feu.

☛ L'augmentation de la température accentue de manière continue la perte de masse pour tous les mélanges, atteignant son maximum à **750 °C** en raison de l'évaporation de l'eau liée et de la décomposition thermique des hydrates. Les mortiers avec substitution de sable (en particulier MCP30) affichent une perte de masse supérieure au témoin M0% sur toute la plage thermique, ce qui témoigne d'un départ d'eau plus important lié à leur constitution ou à la nature des déchets incorporés.

III.5.1.2 Caractérisation thermomécanique:

III.5.1.2.1 Résistance à la flexion :

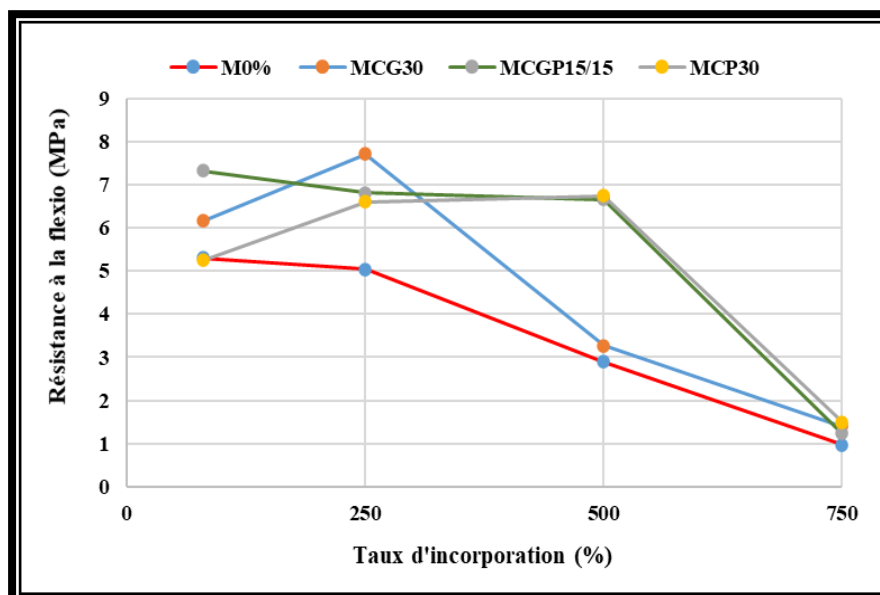


Figure III.18 : Évolution de la résistance à la flexion (à haute température)

III.5.1.2.2 la résistance à la compression :

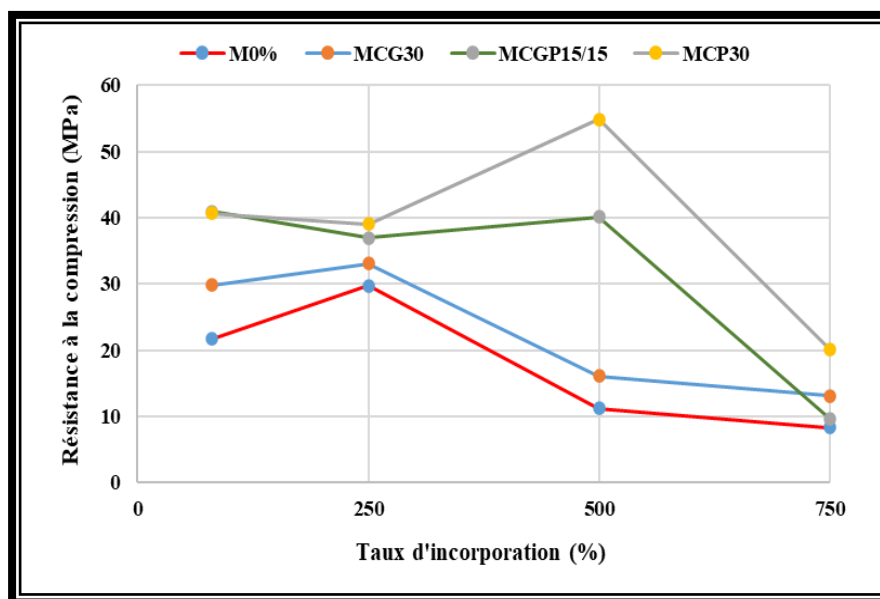


Figure III.19 : Évolution de la résistance à la compression (à haute température)

Interprétation:

☛ L'incorporation des déchets de substitution (MCG30, MCGP15/15, MCP30) améliore globalement la résistance à la flexion par rapport au mortier témoin (M0%) jusqu'à une température de 500°C. Au-delà, toutes les formulations subissent une chute drastique de leurs performances mécaniques à 750°C en raison de la dégradation thermique sévère de la matrice cimentaire.

☛ Les mortiers avec substitution partielle du sable par les déchets (notamment MCP30 et MCGP15/15) affichent une résistance à la compression nettement supérieure au témoin (M0%) sur toute la plage thermique, atteignant une performance maximale à 500°C. À 750°C, une chute importante de la résistance affecte l'ensemble des formulations, bien que les mortiers écologiques préservent une meilleure résistance résiduelle que le témoin.

III.5.2 Remplacement partiel de ciment par les déchets de Substitution:

III.5.2.1 Caractérisation physique :

III.5.2.1.1 Masse volumique apparente :

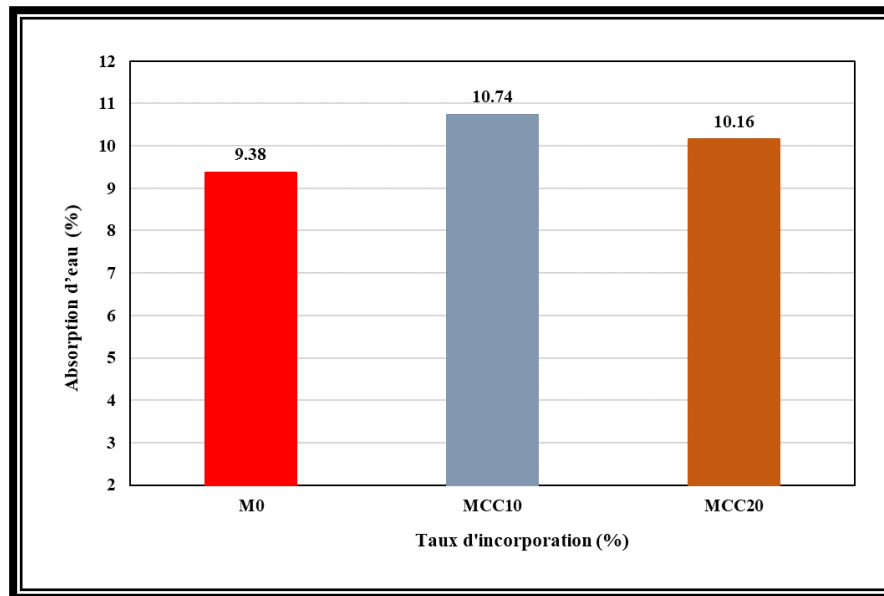


Figure III.20 : Évolution de la masse volumique apparente à la haute température

III.5.2.1.2 Résultats d'ultrason (UPV) :

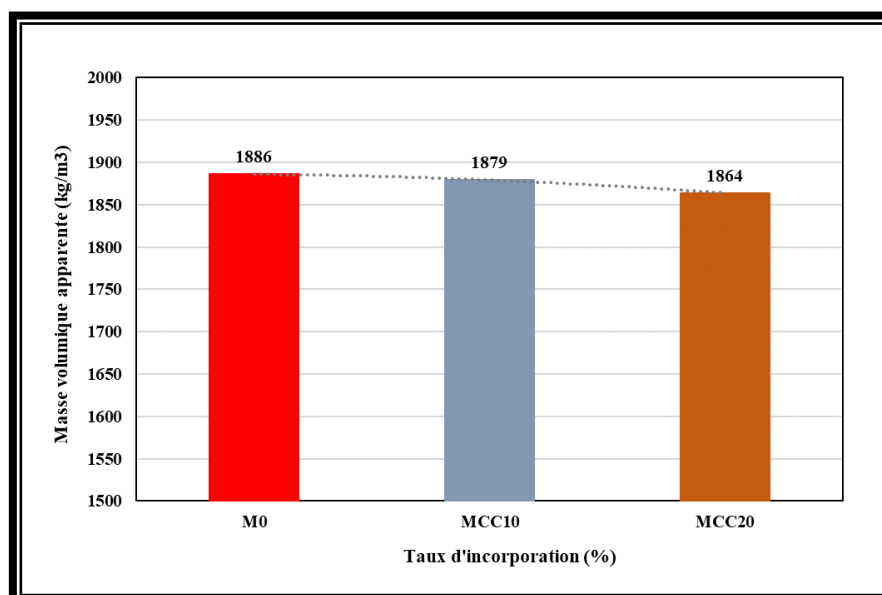


Figure III.21 : Évolution de l'ultrason à la haute température

III.5.2.1.3 Perte de masse :

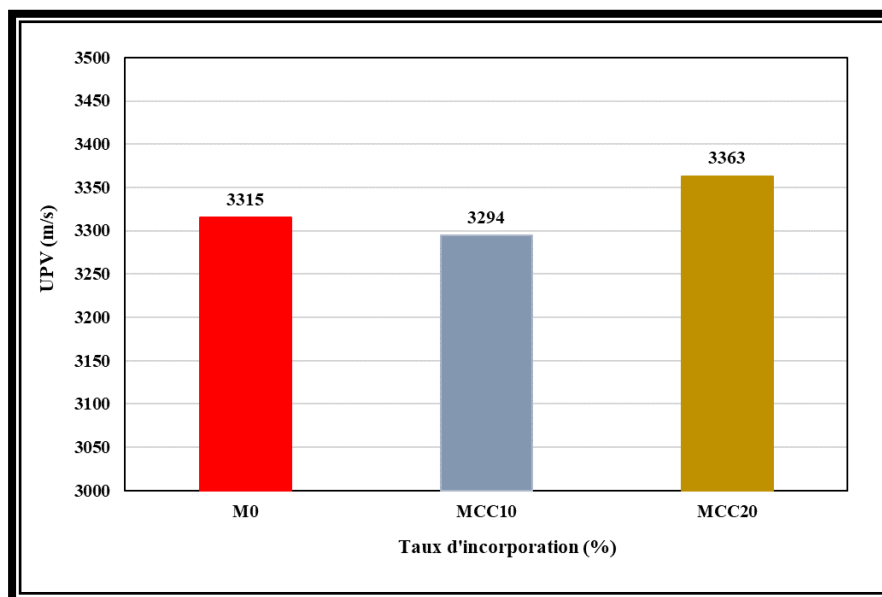


Figure III.22 : Évolution de la perte de masse à la haute température

Interprétation:

☛ L'élévation de la température de **80 °C à 750 °C** entraîne une chute globale de la masse volumique apparente pour l'ensemble des mélanges en raison de la déshydratation de la matrice de ciment. De plus, à chaque palier thermique, l'augmentation du taux de déchet en substitution du ciment accentue cette diminution, le mortier MCC20 affichant la masse volumique la plus faible en raison de sa porosité initiale plus élevée et de sa moindre densité.

☛ L'élévation de la température provoque une chute importante de la vitesse des ultrasons (UPV) pour tous les mortiers, reflétant l'apparition de microfissures et la dégradation thermique de la matrice cimentaire. À chaque palier, l'impact de la substitution du ciment reste globalement similaire au témoin M0, hormis à **500 °C** où le mélange MCC20 se distingue par une nette amélioration de son UPV, suggérant une meilleure résistance résiduelle de sa structure à ce niveau thermique précis.

☛ L'élévation de la température accentue progressivement la perte de masse de tous les mortiers jusqu'à **750 °C** en raison de la déshydratation et de la décomposition des phases cimentaires. Les mélanges avec substitution de ciment (MCC10 et MCC20) suivent une cinétique très proche de celle du témoin (M0%), affichant des pertes finales quasiment identiques à environ **-6,6 %**, ce qui indique que la substitution partielle du ciment n'altère pas de manière significative la stabilité pondérale globale du matériau sous l'effet du feu.

III.5.2.2 Caractérisation thermomécanique:

III.5.2.2.1 Résistance à la flexion :

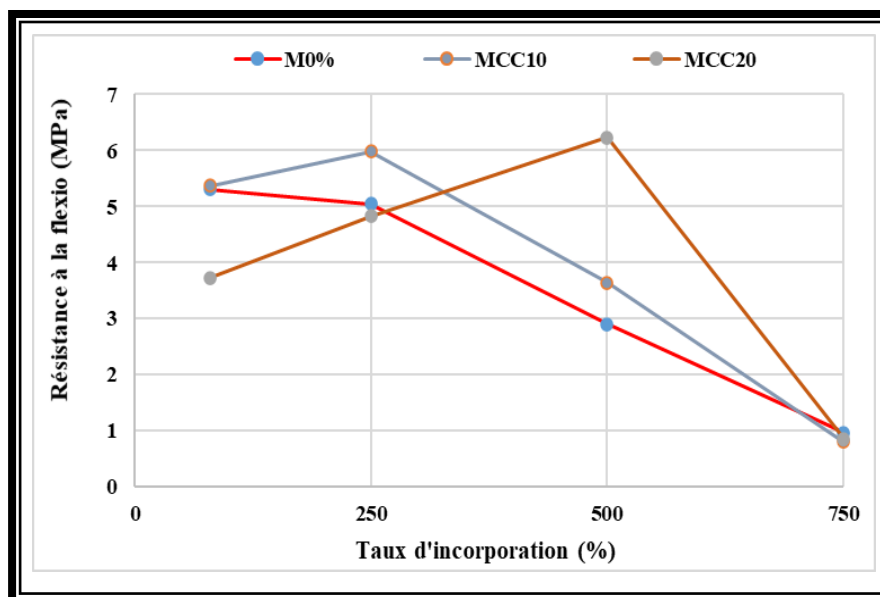


Figure III.23 : Évolution de la résistance à la flexion (à haute température)

III.5.2.2.2 la résistance à la compression :

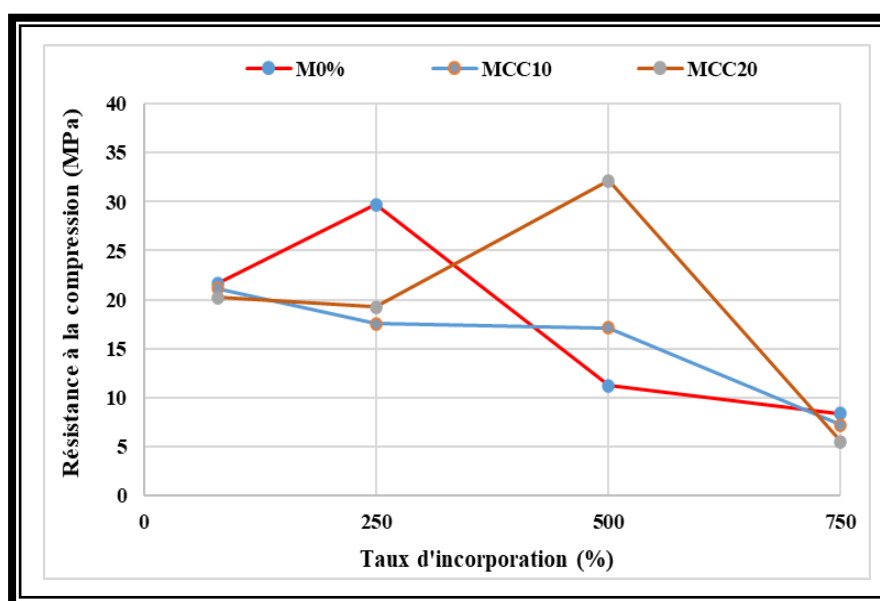


Figure III.24 : Évolution de la résistance à la compression (à haute température)

Interprétation:

☛ La substitution partielle du ciment par les déchets (MCC10 et MCC20) améliore la résistance à la flexion à moyenne température, avec un pic de performance optimal à 250°C pour MCC10 et à 500°C pour MCC20 face au témoin. Cependant, une détérioration thermique sévère et généralisée survient à 750°C, ramenant la résistance de toutes les formulations à un niveau résiduel critique inférieur à 1 MPa

☛ La substitution du ciment par MCC20 induit une excellente stabilité thermique avec un pic de résistance maximal remarquable à 500°C, surpassant nettement le témoin (M0%) et MCC10 à cette température. À 750°C, une dégradation thermique sévère et généralisée affecte toutes les formulations, réduisant leur résistance à la compression à des valeurs résiduelles minimales similaires.

III.5 Conclusion

L'intégration des déchets de substitution en remplacement partiel des constituants du béton (le sable d'une part, et le ciment d'autre part) offre des perspectives technologiques et environnementales contrastées mais globalement prometteuses :

- **Substitution du sable (MCG30, MCGP15/15, MCP30) :** À l'état durci initial, cette approche s'avère particulièrement performante. Elle densifie la matrice cimentaire, ce qui augmente la masse volumique apparente et la vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV) , tout en réduisant significativement la porosité accessible par une baisse de l'absorption d'eau. Sur le plan mécanique, elle engendre une nette amélioration des résistances à la flexion et à la compression. Face aux hautes températures, bien que ces mortiers subissent une perte de masse plus importante que le témoin (M0) et une chute de leurs propriétés au-delà de 500°C , ils conservent globalement des performances mécaniques résiduelles supérieures ou équivalentes au béton de référence.
- **Substitution du ciment (MCC10, MCC20) :** Cette alternative induit une légère baisse de la masse volumique à l'état initial et une augmentation de l'absorption d'eau , ce qui se traduit par une diminution progressive des résistances mécaniques à température ambiante à mesure que le taux de substitution augmente. Cependant, sous l'effet des hautes températures, ces formulations (notamment MCC10) font preuve d'une excellente stabilité thermophysique, limitant la perte de masse et préservant une résistance résiduelle très proche, voire parfois supérieure, à celle du témoin.

En somme, le remplacement partiel du sable se positionne comme une solution idéale pour maximiser les performances mécaniques et physiques globales de la structure, tandis que la substitution du ciment constitue une option écologique pertinente pour réduire l'empreinte carbone tout en maintenant un comportement thermique stable et résilient à haute température.

Conclusions générale

La présente étude expérimentale avait pour objectif d'évaluer le comportement thermique et la résistance au feu de mortiers écologiques formulés à partir de sable de dune et de déchets de substitution, deux matériaux locaux abondants et sous-valorisés. Les résultats obtenus permettent de tirer plusieurs enseignements majeurs sur les potentialités et les limites de ces formulations innovantes.

Sur le plan de la caractérisation des matières premières, il a été établi que le sable de dune, malgré sa granulométrie fine et uniforme, et les déchets de céramique broyés, grâce à leur nature minéralogique stable et leur bonne résistance intrinsèque, constituent des constituants complémentaires pour la formulation de mortiers aux propriétés intéressantes. La combinaison de ces deux matériaux confère aux mortiers une matrice plus dense, avec une porosité réduite et une meilleure compacité, conditions favorables à une meilleure tenue en température.

L'analyse du comportement mécanique résiduel après exposition à différents paliers thermiques a révélé que les mortiers à base de sable de dune et de déchets de céramique présentent une résistance au feu globalement satisfaisante jusqu'à des températures modérées. Au-delà de 400–500°C, une dégradation progressive des performances mécaniques est observée, liée à la déshydratation des C-S-H, à la décomposition de la portlandite et aux incompatibilités de dilatation thermique entre les différentes phases constitutives. Néanmoins, l'incorporation des déchets de céramique tend à atténuer ces effets, grâce à la stabilité thermique des phases cristallines de la céramique et à leur rôle de filler thermiquement inerte.

Du point de vue environnemental et économique, les formulations étudiées s'avèrent particulièrement pertinentes : elles permettent de valoriser des déchets industriels, de réduire l'exploitation de granulats naturels et de diminuer l'empreinte carbone des matériaux de construction, tout en offrant des performances acceptables pour des applications en zones à risque thermique limité.

En définitive, cette recherche confirme que l'association du sable de dune et des déchets de céramique représente une voie prometteuse pour le développement de mortiers écologiques résistants au feu, adaptés aux contextes géographiques disposant de ces ressources locales. Toutefois, des investigations complémentaires s'avèrent nécessaires, notamment l'optimisation des taux de substitution, l'étude de l'effet de l'ajout de fibres ou d'additions minérales actives sur la tenue au feu, ainsi que l'analyse microstructurale fine par DRX et MEB après traitement thermique, afin de mieux comprendre les mécanismes de dégradation et d'affiner les formulations pour des applications structurelles exigeantes.

Recommandations

À l'issue de cette étude expérimentale sur la résistance au feu de mortiers écologiques à base de sable de dune et de déchets de céramique, plusieurs recommandations peuvent être formulées à l'intention des chercheurs, des industriels et des acteurs du secteur de la construction

1. Recommandations à l'échelle industrielle et applicative

- ✓ Promouvoir la valorisation industrielle du sable de dune et des déchets de céramique à grande échelle, en encourageant les partenariats entre les centres de recherche, les cimenteries et les industries céramiques locales pour développer des filières de recyclage structurées et économiquement viables.
- ✓ Développer des référentiels techniques et normatifs adaptés aux mortiers écologiques à base de matériaux locaux, afin de faciliter leur homologation et leur intégration dans les cahiers des charges des projets de construction, notamment dans les régions sahariennes.
- ✓ Encourager l'utilisation de ces mortiers dans des applications ciblées, telles que les revêtements de protection incendie, les murs coupe-feu, les garnissages de fours industriels et les éléments de construction exposés à des risques thermiques élevés.
- ✓ Sensibiliser les professionnels du bâtiment aux avantages techniques, économiques et environnementaux des mortiers écologiques, à travers des journées techniques, des guides pratiques et des formations spécialisées destinées aux ingénieurs et techniciens du secteur.

2. Recommandations relatives à la formulation des mortiers

- ✓ Standardiser la caractérisation des matières premières utilisées, notamment la granulométrie du sable de dune et la nature minéralogique des déchets de céramique, afin de garantir la reproductibilité et la fiabilité des résultats entre différentes régions et sources d'approvisionnement.
- ✓ Étudier l'influence du rapport eau/liant sur la résistance au feu des mortiers formulés, ce paramètre jouant un rôle déterminant sur la porosité et la compacité de la matrice cimentaire, et donc sur son comportement thermique.

3. Recommandations d'ordre scientifique et expérimental

- ✓ Étudier l'effet des cycles thermiques répétés sur les propriétés mécaniques et microstructurales des mortiers, afin de simuler des conditions réelles d'exposition au feu et d'évaluer la durabilité à long terme des formulations développées.
- ✓ Optimiser les taux de substitution du sable de dune et des déchets de céramique en réalisant des plans d'expériences systématiques, afin d'identifier les formulations offrant le meilleur compromis entre performance mécanique, résistance thermique et impact environnemental.
- ✓ Intégrer d'autres types de déchets complémentaires, tels que les cendres volantes, le laitier de haut-fourneau ou la pouzzolane naturelle, en combinaison avec les déchets de céramique, pour améliorer davantage les propriétés des mortiers écologiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Yahia, M. Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie, 2016.
- [2] KADRI. M. R, ROUIGUEB. S et CHIKH. H. A. (2017). Contribution à la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production: Cas de la cimenterie de Béni-Saf. Mémoire de master en génie industriel, Université de Tlemcen.
- [3] <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/>.
- [4] Jean-Pierre Adam. Sixième édition. La construction romaine. Matériaux et technique Grands manuels picards.
- [5] http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_deux.html
- [6] Boutiba Aldjia .accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci, thèse de magistère.
- [7] Michel Cliche, ing, CEMENTS CANADA LAFARGE, LES CEMENTS PORTLAND, Revue hebdomadaire.
- [8] S. N. Gosh, Advances in cement technology, Pergaman Press Ltd, 1983.
- [9] M. Regourd, « L'hydratation de ciment Portland », Dans Le béton hydraulique
- [10] L. E. Copeland et Kantro D. L., "Hydration of Portland cement" 5th. Int. Symp. Chem. Ceme., Tokyo. 1968, VII p.387
- [11] A. Bentur, " Effect of gypsum on the hydration and strength of C3S pastes", J. Am. Ceram. Soc., 59(5), 210 (1976)
- [12] K. Fuji, W. Kondo, Roc. 5th. Int. Symp. On Chem. Cem., V II, p. 362, Tokyo, 1968
- [13] M. Regourd, "L'hydratation du ciment portland", dans "Le béton hydraulique", Paris Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1982.
- [14] Rédadaa F, Mahamdi S. Caractérisation physiques et de durabilité des ciments composées a base de brique, Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 de Guelma, Algérie ,2018.
- [15] Goto T, Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex. Thèse de doctorat, L'université paris vi - pierre et marie curie, Paris vi, France, 2006.
- [16] Nigri G. Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique, Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2018.

- [17] Bordy.A, « Influence des conditions thermo-hydriques de conservation sur l'hydratation de matériaux cimentaires à base d'une fine recyclée», thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2016.
- [18] R. H. Bogue, La chimie du ciment portland, Ed. Eyrolles, Paris, 1952.
- [19] D. Elhaj Guesmia . "Comportement d'un mélange Tuf -Sable de dune sous sollicitations monotones et cycliques". 2019.
- [20] <https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton>
- [21] N. Meftah, Hani A, Merdas A, Sadik C, Sdiri A. "Aholistic approach towards characterizing the El-Oued siliceous sand (eastern Algeria) for potential industrial applications". Arab J Geosci 2021;14. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08591-1>.
- [22] SEE. Khay, Neji J, Loulizi A. "Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements". Construction Building Materiles <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.008>.
- [23] B. Krobba Bouhicha M, Kenai S, Courard L." Formulation of low cost eco-repair mortar based on dune sandand Stipa tenacissima microfibers plant". Construction Building Materiles 2018;171:950–9.
- [24] N.J. Saleh, Ibrahim RI, Salman AD."Characterization of nano-silica prepared from local silica sand and its application in cement mortar using optimization technique". Advenced Powder Technol 2015;26:1123–33.
- [25] Elipe MGM, López-Querol S. Aeolian sands "Characterization, options of improvement and possible employment in construction"The State of the art. Construction Building Materiles 2014;73:728–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.008>.
- [26] Nassima M, Hani A, Merdas A. "Extraction and Physicochemical Characterization of Highly pure Amorphous Silica Nano particles from Locally Available Dunes Sand". Chem Africa 2023. <https://doi.org/10.1007/s42250-023-00688-2>.
- [27] N Meftah, MS Mahboub. "Spectroscopic Characterizations of Sand Dunes Minerals of El-Oued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD Analyses". Silicon 2020;12:147–53. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00109-5>.
- [28] Raghavan, D., Huynh, H., Ferraris, C."Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyrerubber-filled cementitious composite". Journal of Materials Science. 1998, 33(7): 1745-1752.
- [30] Mathieu Duarand, Yamna Djellouliet et Cyrille Naoarine (dir) « Gestion des déchets » ISBN 978-2-7535-4181-8 Presse université de Rennes ,2015 ; www.pur-edition.fr.
- [31] Les déchets et leur élimination. « Les déchets en chiffre : Edition 2015 » ADEME. Fiche 25 à 46.

- [32] (Consulter le 11/3/2021) AbdedouK., BoussadS.,(2015): "Evaluation de la gestion des déchets ménagers dans la commune de Bouzeguène et implication pour la mise en œuvre d'un mode de gestion plus durable", Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (Consulter le 12/3/2021).
- [33] JORA.,(2001) : journal officiel algérien n°77 : la loi n° 01-19 de 12/12/2001 sur la gestion, le contrôle et l'élimination des déchets solides (Consulter le 12/3/2021).
- [34] Damien A., (2004) : « guide du traitement des déchets » .3ème édition. France. P 430 (Consulter le 14/3/2021).
- [35] <https://www.bsenvironnement.fr/nos-prestations/dechets-pris-en-charge/27- déchets non dangereux.htm> (Consulter le 14/3/2021)
- [36] https://www.aenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition / dechet_ultime.php4 (Consulter le 16/3/2021).
- [37] <https://www.ecophylle.org/l-accompagnement-de-demarches-3/53- fiches ressources/783-déchets-généralités> (Consulter le 16/3/2021).
- [38] Chograni Y.,(2017) : "Gestion du CET II (Centre d'enfouissement Technique des déchets ménagers) de Hammame Boughrara et risque environnementaux", Mémoire de Master, Université Tlemcen (Consulter le 16/3/2021).
- [39] https://www.memoireonline.com/11/13/7979/m_Connaissances-attitudes-etpratiquesdes-professionnels-de-sante-sur-la-gestion-des-dechets-hosp11.html (Consulter le 17/3/2021).
- [38] Ghani S.,l'impact des déchets sur l'environnement port soudan 5240 doctoral dissertation ??????
- [40] BOUALI Khaled ; « Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts De déchets de briques réfractaires », mémoire de magister (spécialité: Génie des Matériaux) Option Physique et Mécanique des Matériaux UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES 2013/2014.
- [41] BOMBLED J-P, « Rhéologie des mortiers et des bétons frais, influence du facture ciment.
- [42] BELLEM. M ; « Valorisation des déchets plastiques pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers »mémoire de master, université de M'sila, juin 2013.
- [43] <https://blog.teraltaemortier#:~:text=Le%20mortier%20de%20montage%20se,1%20ou%20du%200%2F4> (Consulter le 5/3/2021).
- [44] SYLVER. P <<science des matériaux>>, université pierre et marie curie 2005 ,2006
- [45] GC 1712, « Durabilité et réparation du béton », département génie civil, université de Sherbrooke – Canada, avril 2009
- [46] F.jean –marie haussounne, céramiques pour composant électronique (1996) ;
- [47] A –Boultif , thèse de doctorat d'université de rennes(1993) ;

- [48] Safi Brahim, « Procèdes et mise en forme des matériaux des produit céramique », Université de Boumerdès, Faculté des Sciences de l'ingénieur, Département Génie des Matériaux.
- [49] S .zahi , thèse de magister , université de Constantine ,(2002) ;
- [50] documentation 04/11/2008 [http: //www.univirta.org /dentaire /documentation.versioimprimable.php](http://www.univirta.org/dentaire/documentation.versioimprimable.php);
- [51] J. Dorlot, J. Bailon et J. Masounave, Des Matériaux, (1986) ;
- [52] Michel Ruman "membrane ,transfert " encyclopédie universalise (consulté le 29 novembre 2015) ;
- [53] Thème «les céramiques industrielles :propriétés , mise en forme et application » Préface De Jean-François Baumard ;
- [54] la céramique, sur Wikipédia .Commons [http: //www.arqueo-ecuatoriana ec /fr/galerie ceramologie/59-orient/102](http://www.arqueo-ecuatoriana.ec/fr/galerie/ceramologie/59-orient/102) ;
- [55] [http : //www.univirta.org /dentaire /documentation](http://www.univirta.org/dentaire/documentation). Version imprimable ;
- [56] Safi Brahim, « Procèdes et mise en forme des matériaux des produit céramique », Université de Boumerdès, Faculté des Sciences de l'ingénieur, Département Génie des Matériaux.
- [57] Ghani S.,l'impact des déchets sur l'environnement port soudan 5240 doctoral dissertation
- [58] Bouchard M., 'Utilisation en technique routière de granulats provenant du concassage de béton de démolition', Bulletin liaison laboratoire Pont et Chaussée, n° 134, Réf. 2852, Nov.-Déc. 1984
- [59] Hansen T. C., 'Recycling of demolished concrete and masonry', RILEM Report 06, Published by E & FN Spon, London, 1992
- [60] De Pauw C., 'Recyclage des décombres d'une ville sinistrée', CSTC, Revue n° 4,
- [61] KHENNICHE, L. Cours « Recyclage et valorisation des déchets », Université A.MIRA-BEJAIA .
- [62] MOUSSACEB,K. Cours : 3ème année département mines et géologies : « recyclage des matériaux de construction (RMC) », Université A.MIRA-BEJAIA
- [63] Luc COURARD, Recyclage et valorisation des déchets et sous-produits industriels en construction conditions et expériences, Eco matériaux de construction : pilier de la croissance verte en Afrique, Ouagadougou, Burkina Faso, 10-12 juin 2013.
- [64] Guendouz M., Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base de déchets plastique : application au béton de sable, Thèse doctorat, Département Génie Civil, Université de Médéa Algérie, 2017
- [65] https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dechet_organique.php4
- [66] LAMTIGUI Abdelaziz, BENDANI Youssef « Valorisation des laitiers d'aciéries en Génie Civil », Etude Bibliographique, 2014
- [67] <http://paysdefayence.free.fr/ordures-menageres/bagnols112009/main1.htm>.

- [68] OULAD MEBAREK, I., BOUKHARI C. «Effets de la poudre de gravier roulé sur la durabilité de mortier auto-plaçant exposé aux attaques chimiques», Mémoire Master, université de Ghardaïa, 2021.
- [69] ABADOU, Y. «Influence de l'ajout de déchets de céramique broyés sur les performances des mortiers à base de sable de dune », Thèse de doctorat, école nationale polytechnique, 2018
- [70] Pitarch, A.M., Reig, L., Tomas, A.E., López , F.J. «Effect of tiles, bricks and ceramic sanitaryware recycled aggregates on structural concrete properties», Waste and Biomass Valorization. V. 10, pp. 1-15 , 2017.
- [71] Alves, A.V., Vieira, T.F., de Brito, J, Correia, J.R. « Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates », Construction and building materials, V. 64, pp. 103-113 , 2014.
- [72] Bommisetty, J., Keertan, T.S, Ravitheja, A., Mahendra, K. « Effect of waste ceramic tiles as a partial replacement of aggregates in concrete», material today : proceeding, V. 19 (2), pp. 875-877 , 2019.
- [73] C. Lemaitre, "Mise en œuvre et emploi des matériaux de construction. Editions eyrolles.2012.
- [74] R.H BOGUE and W. LERCH, Hydratation of portland cement compounds, Industrial and Engineering Chemistry, 26, No. 8, pp. 837-47 (Easton, Pa., 1934).
- [75] ADAM M. NEVILLE
(Propriétés des Bétons) traduit par le CRIB centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Sherbrooke-Laval.
- [76] benguedouar afeff ; « synthèse et caractérisation de silicates de calcium hydrates (c.s.h) hybrides », mémoire magister en chimie, université de Yaoundé i ,2013
- [77] N. Bourmatte, "Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques, Thèse de Doctorat," Université Des Frères Mentouri Constantine, 2017.
- [78] Caractérisation de la longévité des briques brutes et très bien écrasées réutilisées d'employer de bétons et des agrégats, des matériaux et du RILEM concrets 2011.
- [79] Propriétés mécaniques et de longévité des agrégats réutilisés souillés employant béton Ciment et composé concret, 32(2010)421-426.Elsevier, la science directe.
- [80] site web: <https://fr.dreamstime.com/photo-stock-%c3%a9ditorial-desd%C3%A9chetsdomestiques-en-d%C3%A9charge-image41772978>
- [81] SITE WEB: <https://www.batirama.com/article/16113-les-cimentiers-veulent-doubler-la-quantite-dedechets-de-bois-utilisee-d-ici-a-2025.html>
- [82] SITE WEB : <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-dechetultime-5727/>

- [83] A. Carles-Gibergues et M. Pigeon. "La durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse", Paris, Ed. Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 1992
- [84] C. Alonso et L. Fernandez. "Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments", *Journal of Materials Science*, vol. 39, n°9, p. 3015-3024, 2004.
- [85] M. Castellotea, C. Alonsoa, C. Andradea, X. Turrillas, and J. Campoc. Composition and micro structural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 1633–1644.
- [86] Piasta 1984] J. Piasta. "Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste", *Materials and Structures*, vol. 17, n°6, p. 415-420, 1984.
- [87] A. Noumowé. "Effet de hautes températures (20-6000C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances", Thèse de Doctorat, Génie civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1995.
- [88] G. A. Khoury. "Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment", *Magazine of Concrete Research*, vol. 44, n°161, p. 291-309, 1992.
- [89] [Xing 2011] Z. Xing. "Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température", Thèse de Doctorat, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- [90] [Menou 2004] A. Menou. "Étude du comportement thermomécanique des bétons à haute température: Approche multi échelles de l'endommagement thermique", Thèse de Doctorat, Mécanique des solides, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- [91] U. Diederichs, U.M. Jumppanen, V. Penttala, Behaviour of high strength concrete at high temperatures. Espoo, 1989, Helsinki University of Technology, Department of structural engineering, report 92, 1989.
- [92] Hager I.G. (2004) Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris et Ecole Polytechnique de Cracovie, novembre, 183p.
- [93] G. A. Khoury. "Strain components of nuclear-reactor-type concretes during first heat cycle", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 156, n°1-2, p. 313-321, 1995.
- [94] G. A. Khoury, B. N. Grainger et P. J. E. Sullivan. "Transient Thermal Strain of Concrete: Literature Review, Condition Within Specimen and Behaviour of Individual Constituent.", *Magazine of Concrete Research*, vol. 37, n°132, p. 131-144, 1985.

- [95] [Schneider et al. 1982] U. Schneider, U. Diederichs et C. Ehm. "Effect of temperature on steel and concrete for PCRV's", Nuclear Engineering and Design, vol. 67, n°2, p. 245-258, 1982. [96] M. Kanema. "Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons", Thèse de Doctorat, Génie civil, Université de Cergy-Pontoise, 2007.
- [97] V.T. NGYEN. « Comportement des béton ordinaire et hautes performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions », thèse de Doctorat, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise France, 2013.
- [98] R. Haniche. "Contribution à l'étude des bétons portés en température / Évolution des propriétés de transfert : Étude de l'éclatement", Thèse de doctorat, Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.
- [99] F. Cheng, V. Kodur et T. Wang. "Stress-Strain Curves for High Strength Concrete at Elevated Temperatures", Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 16, n°1, p. 84-90, 2004.
- [100] [Suhaendi et al. 2006] S. L. Suhaendi et T. Horiguchi. "Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition", Cement and Concrete Research, vol. 36, n°9, p. 1672-1678, 2006.
- [101] [Toumi 2010] B. Toumi. "Étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton ", Thèse de doctorat, Matériaux, Université Mentouri Constantine, 2010.



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar Eloued



Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique & de Génie Civil
Spécialité : Matériaux en génie civil

Centre de développement de l'entrepreneuriat El oued
Université Echahid Hamma Lakhdar Eloued

THEME

En vue d'obtention d'un diplôme du

MASTER ET PROJET D'INSTITUTION ECONOMIQUE

(Cadre de l'arrêté ministériel 1275 tel que modifié et complète par le décret 008)

FABRICATION DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION
FABRICATION DES MORTIERS ECOLOGIQUES SEC A
BASE DE SABLE DE DUNE ET DE DECHETS DE

Introduction à l'obtention d'un certificat pour une (micro entreprise économique), conformément décret ministériel 1275, tel que modifié et complète par le décret ministériel 008 du 23 février 2025

Présenté par : **Mansouri Toufik - Kholadi Salah**

Encadreur : **Dr. Choungara Toufik**

Slogan de l'entreprise :

**Un mortier responsable pour
des ouvrages durables**



Logo de l'entreprise :



Année Universitaire 2025/2026

1. Équipes de travail et encadrement :

1.1 Équipe de travail :

Equipe de projet	Spécialité	Faculté / Institut	Expérience /compétence
Kholladi Salah	Génie Civil (Matériaux en génie civil)	Faculté de Technologie	Master Matériaux en génie civil
Mansouri Toufik	Génie Civil (Matériaux en génie civil)	Faculté de Technologie	Master Matériaux en génie civil

1.2 Équipe d'encadrement :

Équipe d'encadrement	
Encadreur principale	Spécialité
Dr : Choungara Toufik	Matériaux en génie civil

2. Présentation du projet :

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une initiative visant à valoriser les ressources locales et les déchets Industriels dans le domaine du génie civil. L'idée est née de la nécessité de réduire l'exploitation du sable des oueds et de trouver des solutions écologiques adaptées aux régions désertiques où le sable des dunes est abondant mais sous-exploité. L'étude vise à mettre au point un mortier écologique sec intégrant ces matériaux de substitution. Le développement repose sur une approche expérimentale consistant à réaliser différents mélanges et à évaluer leurs performances mécaniques après les avoir exposés à des températures élevées, afin d'évaluer leur résistance au feu.

Code d'activité	Secteur d'activité	Détermination de l'activité
109106	Secteur de production de biens et de réalisation	Préfabrication d'éléments en béton et fabrication du béton prêt à l'emploi

3. Description de l'idée du projet :

3.1 Problématique :

Le secteur de la construction est confronté à un double défi : la rareté du sable des oueds et l'augmentation des déchets industriels, sur un marché en constante expansion, notamment dans les régions désertiques où le besoin en infrastructures est criant. Malgré l'abondance du sable des dunes, son utilisation reste limitée en raison de ses faibles propriétés physiques, tandis que les matériaux de substitution issus des déchets ne sont pas exploités de manière optimale. En tant que spécialistes du génie civil, ce projet tire parti de notre expertise en matière d'étude et d'essai des matériaux pour proposer une solution innovante, consistant à développer un mortier écologique présentant une bonne résistance au feu et intégrant des ressources locales et des déchets industriels. Le projet vise ainsi à répondre à un besoin réel du marché en proposant un matériau résistant et économique, adapté aux conditions climatiques extrêmes.

3.2 Solution proposée :

Développement et essai d'un mortier écologique à base de sable des dunes et de déchets de substitution (déchets céramiques), en mettant particulièrement l'accent sur ses performances mécaniques et sa résistance aux températures élevées. Dans le cadre d'une approche expérimentale : préparation de différents mélanges, réalisation de tests mécaniques avant et après exposition à des températures élevées, puis analyse comparative des résultats. Nous accomplirons ce travail dans le cadre de la partie pratique de notre programme de fin d'études, sous la supervision d'un professeur spécialisé dans les matériaux de construction. Les travaux expérimentaux seront menés dans le laboratoire et le bureau des travaux publics d'El Oued, équipés pour réaliser des essais mécaniques et thermiques.

On conclue L'idée consiste à créer une unité de production de **mortier industriel écologique sec** à faible empreinte carbone. Contrairement au mortier classique qui utilise du sable de rivière (ressource qui s'épuise) et beaucoup de ciment, ce projet valorise deux ressources locales sous-exploitées :

- ☛ Le sable de dune, souvent (oubliés et abandonnés) par la construction.
- ☛ Les déchets de céramique (rebuts de fabrication de carrelage ou sanitaire), broyés

3.3 Quels sont mes produits?

Les produits de notre projet (الصافي) sont des matériaux de construction écologiques (mortier sec) fabriqués à partir de sable de dune et de déchets de céramique recyclés, tels que :

- ✓ Mélanges de mortier écologique sec prêts à l'emploi pour la construction durable.
- ✓ Mortier écologique pour maçonnerie et enduits.
- ✓ Mortier de revêtement thermique et décoratif.

Ces produits offrent une solution économique et respectueuse de l'environnement.



Ensemble des produits de notre projet

ملاط الصافي علامة التميز

3.4 Qui sont mes clients ?

Les principaux clients ciblés sont :

- Entreprises de construction et de travaux publics.
- Entrepreneurs et maçons.
- Promoteurs immobiliers.
- Particuliers construisant des maisons individuelles.
- Collectivités locales et projets publics.
- Entreprises spécialisées dans la construction écologique.

3.5 Où sera implanté le projet ?

L'implantation d'une usine de fabrication de matériaux de construction est une décision stratégique qui dépend de facteurs logistiques, géographiques, économiques et réglementaires. Les critères clés incluent la proximité des matières premières, l'accessibilité au transport, la disponibilité de la main-d'œuvre et le respect des règles d'urbanisme.

Donc à partir de cette synthèse des conditions, nous avons trouvé que le meilleur site pour localiser notre société est dans le site de commune d'Oued al alnda.

3.6 Comment fonctionnera le projet ?

Le fonctionnement du projet se déroule en plusieurs étapes :

- 1- Collecte et Transport du sable de dune.
- 2- Collecte des déchets de céramique provenant des ateliers et usines.
- 3- Transformation : Nettoyage du sable, broyage contrôlé de la céramique (pour obtenir la granulométrie souhaitée) et tamisage.
- 4- Préparation la quantité de ciment utilisé
- 5- Mélange : Dosage précis en usine {Sable + Céramique + /Ciment + Adjuvants(peut être)} pour garantir une qualité constante.
- 6- Contrôle de qualité pour vérifier la résistance et la durabilité.
- 7- Conditionnement : Mise en sacs ou stockage en silos.
- 8- Distribution : Livraison directe sur chantier ou via des distributeurs de matériaux de construction.

3.7 Justification du choix de l'idée

Le choix de cette idée est justifié par plusieurs raisons :

- ☛ Exploitation des ressources locales comme le sable de dune.
- ☛ Valorisation des déchets de céramique au lieu de les jeter dans l'environnement.
- ☛ Réduction du coût des matériaux de construction.
- ☛ Réponse à la demande croissante en matériaux écologiques et durables.
- ☛ Contribution à la protection de l'environnement et au développement durable.
- ☛ Création d'opportunités d'emploi dans le domaine du recyclage et de la construction verte.

4. Étude de marché

Le marché des matériaux de construction écologiques connaît une croissance importante grâce à l'augmentation des projets de construction durable et à la recherche de solutions moins coûteuses et plus respectueuses de l'environnement.

Dans les régions sahariennes désertiques comme El oued, la disponibilité du sable de dune représente un avantage économique important. De plus, les déchets de céramique provenant des ateliers et commerces de matériaux constituent une ressource recyclable disponible localement.

La demande potentielle concerne :

- Les entreprises de bâtiment et travaux publics (BTP).
- Les promoteurs immobiliers.
- Les artisans maçons.
- Les particuliers construisant des logements.
- Les projets publics et écologiques.

4.1 Nature et intensité de la concurrence :

Les concurrents	Nature de la concurrence		Force de la concurrence		
	Directe	Indirecte	Forte	Moyenne	Faible
-Les fabricants de mortier traditionnel	x		x		
-Les entreprises de matériaux écologiques	x			x	
-Producteur de mortier prêt à l'emploi	x		x		
-Techniques modernes (construction modulaire)		x		x	
-Béton (matériaux concurrent)		x	x		

4.2 Besoins du marché

Les clients recherchent principalement :

- Des matériaux moins chers.
- Une bonne résistance mécanique.
- Une isolation thermique adaptée au climat chaud.
- Des produits écologiques et recyclés.
- Une disponibilité locale rapide.

4.3 Opportunités du projet

- ✓ Faible coût des matières premières.
- ✓ Augmentation de l'intérêt pour le recyclage.
- ✓ Soutien aux projets de développement durable.
- ✓ Possibilité de collaboration avec les entreprises de céramique et de construction.

4.4 Analyse de la concurrence

Le projet peut faire face à plusieurs types de concurrents :

1. Les fabricants de mortier traditionnel

Ils produisent des mortiers classiques à base de sable ordinaire et de ciment.

☛ Points forts :

- Grande présence sur le marché.
- Habitude des clients envers ces produits.

☛ Points faibles :

- Coût parfois élevé des matériaux.
- Impact environnemental plus important.

2. Les entreprises de matériaux écologiques

Certaines entreprises proposent déjà des produits recyclés ou écologiques.

☛ Points forts :

- Expérience dans le domaine écologique.
- Bonne image environnementale.

☛ Points faibles :

- Prix souvent plus élevés.
- Disponibilité limitée dans certaines régions.

3. Avantages concurrentiels du projet

Le projet possède plusieurs avantages :

- Utilisation de matières premières locales et abondantes.
- Réduction des déchets de céramique.
- Coût de production plus faible.
- Bonne isolation thermique adaptée aux régions désertiques.
- Produit innovant et écologique répondant aux besoins actuels du marché.

4.5 Les stratégies de notre entreprise pour faire face à nos concurrents

4.5 1-Stratégies de la différenciation

- ✓ Utilisation de sable de dune
- ✓ Utilisation de déchets céramiques recyclés
- ✓ Réduction de l'impact environnemental
- ✓ Innovation dans les matériaux

4.5 2-Stratégies de domination par les coûts

- ✓ Utilisation de matières premières locales et abondantes (Sable de dune et déchets céramique)
- ✓ Production locale pour réduire le transport
- ✓ Offrir un rapport qualité-prix supérieur à celui des mortiers industriels importés
- ✓ Réduction des intermédiaires commerciaux par la vente directe aux entreprises de construction et aux grossistes

4.5 3-Stratégie de Proximité et d'Ancre Local

- ✓ Implantation d'unités de production décentralisées proches des gisements de sable de dune (régions sahariennes)
- ✓ Développement d'un réseau de distribution local couvrant les wilayas du Sud et progressivement le Nord du pays
- ✓ Sensibilisation des entrepreneurs et maçons locaux à l'utilisation correcte des mortiers secs écologiques
- ✓ Création d'emplois locaux comme argument de responsabilité sociale d'entreprise .

4.5 4-Stratégie Qualité et Conformité Normative

- ✓ Réalisation régulière d'essais en laboratoire (résistance à la compression, flexion, adhérence, retrait) pour garantir la constance des performances
- ✓ Conformité aux normes algériennes et européennes en vigueur (NA 442, EN 998-1/2) pour les mortiers
- ✓ Contrôle systématique des matières premières (granulométrie du sable, résistance des déchets céramiques) et des produits finis

4.6 Marché cible et potentiel

4.6 .1 Marché cible

Le marché cible du projet de mortier écologique à base de sable de dune et de déchets de céramique comprend plusieurs catégories de clients :

1. Entreprises de construction et BTP

Les sociétés de bâtiment utilisent le mortier pour :

- La maçonnerie.
- Les enduits.
- Les travaux de rénovation et de finition.

2. Promoteurs immobiliers

Les promoteurs recherchent des matériaux économiques et écologiques pour les projets de logements et bâtiments modernes.

3. Artisans et maçons

Les artisans locaux constituent un marché important grâce à l'utilisation quotidienne du mortier dans les chantiers.

4. Particuliers

Les particuliers qui construisent ou rénovent leurs maisons cherchent souvent des solutions moins coûteuses et adaptées au climat chaud.

5. Collectivités et projets publics

Les administrations publiques et projets de développement durable peuvent utiliser ce matériau dans les écoles, logements sociaux et infrastructures locales.

4.6 .2 Potentiel du marché

Le projet possède un potentiel important pour plusieurs raisons :

☛ Disponibilité des matières premières

Dans des régions comme Eloued, le sable de dune est disponible en grande quantité, ce qui réduit les coûts de production.

☛ Croissance du secteur de la construction

Le développement urbain et les nouveaux projets immobiliers augmentent la demande en matériaux de construction.

☛ Tendance vers les matériaux écologiques

Les consommateurs et entreprises s'intéressent de plus en plus aux produits recyclés et respectueux de l'environnement.

☛ Réduction des coûts

L'utilisation des déchets de céramique permet de diminuer les dépenses liées aux matières premières traditionnelles.

4.7 Analyse SWOT du projet

Swot	Facteurs contribuant à la réalisation des objectifs	Facteurs qui entravent la réalisation des objectifs
Facteurs internes	☛ Forces (Strengths) • Valorisation et exploitation du sable de dunes et des déchets solides • Réduction de l'impact environnemental. • Innovation dans les matériaux écologiques résistants au feu.	☛ Faiblesses (Weaknesses) • Nécessités de tests expérimentaux supplémentaires • Résistance culturelle au changement (mortier gâché traditionnel)
Facteurs externes	☛ Opportunités (Opportunities) • Croissance du marché de la construction durable • Disponibilité du sable des dunes dans les régions désertiques • Intérêt croissant pour les matériaux recycles. • Possibilité de créer des partenaires industriels.	☛ Menaces (Threats) • Réticence de l'entreprise à adopter des matériaux de construction innovants. • Concurrence des matériaux traditionnels bien établis sur le marché. • Variabilité des propriétés des déchets utilisés selon les cas.

4.8 Modèle économique BMC de mon projet :

Partenaire clés



- × Carrières de sable de dune
- × Fournisseurs de ciment
- × Chantier de construction
- × Industries de céramique
- × Centre de recyclage
- × Ministère d l'environnement
- × Université et laboratoire

Ressources clés



- × Sable de dune.
- × Déchets de céramique recyclés.
- × Main-d'œuvre qualifiée.
- × Formulation technique.
- × Laboratoire d'analyse et équipement.
- × Main-d'œuvre qualifiée.
- × Réseaux de fournisseurs et partenaires.

Activité clés



- × Valorisation sable de dune
- × Collecte et traitement des déchets céramiques
- × Formulation et test du mortier
- × Ensachage & conditionnement
- × Recherche et développement
- × Optimisation des formules pour différents usages
- × Logistique et distribution
- × Contrôle Qualité : Tests réguliers de résistance

Proposition de valeur



- × Solution adaptée aux régions désertique riches en sable de dune.
- × Valorisation des déchets de céramique recyclés.
- × Production d'un mortier écologique et durable.
- × Performance technique : Mortier fin, isolant et résistant.
- × Contribution à la protection de l'environnement et à l'économie circulaire.
- × Bonne résistance mécanique et thermique.
- × Produit économique grâce aux matières premières locales
- × Disponibilité locale : Moins de dépendance aux pénuries de sable de rivière.

Relation client



- × Assistance technique : Conseils d'application sur chantier.
- × Démonstrations et essais du produit.
- × Assistance technique et conseils d'utilisation.
- × Fidélisation par des contrats à long terme

Canaux de distribution



- × Vente directe aux entreprises de BTP.
- × Partenariats avec les quincailleries et fournisseurs locaux.
- × Distributeurs de matériaux de construction.
- × Participation aux salons de construction et environnement.
- × Plateforme numérique et réseaux sociaux.

Segments de clients



- × Fabricants de matériaux de construction.
- × Bureaux d'études et laboratoires.
- × Entreprise de construction.
- × Organismes publics de logement.
- × Particuliers construisant des maisons écologiques.
- × Promoteurs immobiliers.
- × Universités et centres de recherche

Structure des coûts



- × Transport de sable de dune.
- × Collecte et transport des déchets.
- × Salaires et formation.
- × Maintenance des équipements.
- × Marketing et distribution.
- × Coûts de production
- × Traitement et broyage de la céramique.
- × Recherche et essais en laboratoire

Sources de revenus



- × Vente du mortier écologique.
- × Prestation de recherche et développement.
- × Subventions liées aux projets écologiques.
- × Contrats avec entreprise de construction.
- × Vente de licences ou formulation du produit.

5. Étude Technique :

5.1 Besoins en Ressources Humaines

Pour démarrer une unité de taille petit ,nous aurons besoin d'une équipe polyvalente répartie en trois pôles :

Nature des utilisateurs	Nombre	Compétences/qualifications
Gérant	1	Master (Génie civil matériaux)
Cadre (Master/Ingénieur)	2	Master-licence (Comptabilité)
Maitrise (Techniciens)	2	Techniciens (Génie civil-maintenances)
Exécution	5	Chauffeur/Livreur/ Ouvriers/maintenance

Fiches de postes détaillées :

☛ Pôle Direction et Administratif

***1 Gérant :** Gestion stratégique. Pilotage stratégique et opérationnel de l'entreprise.

***1 Responsable Administratif:** Gestion des RH,

***1 Responsable commercial & logistique :** Développement du portefeuille clients, suivi des livraisons et stocks,

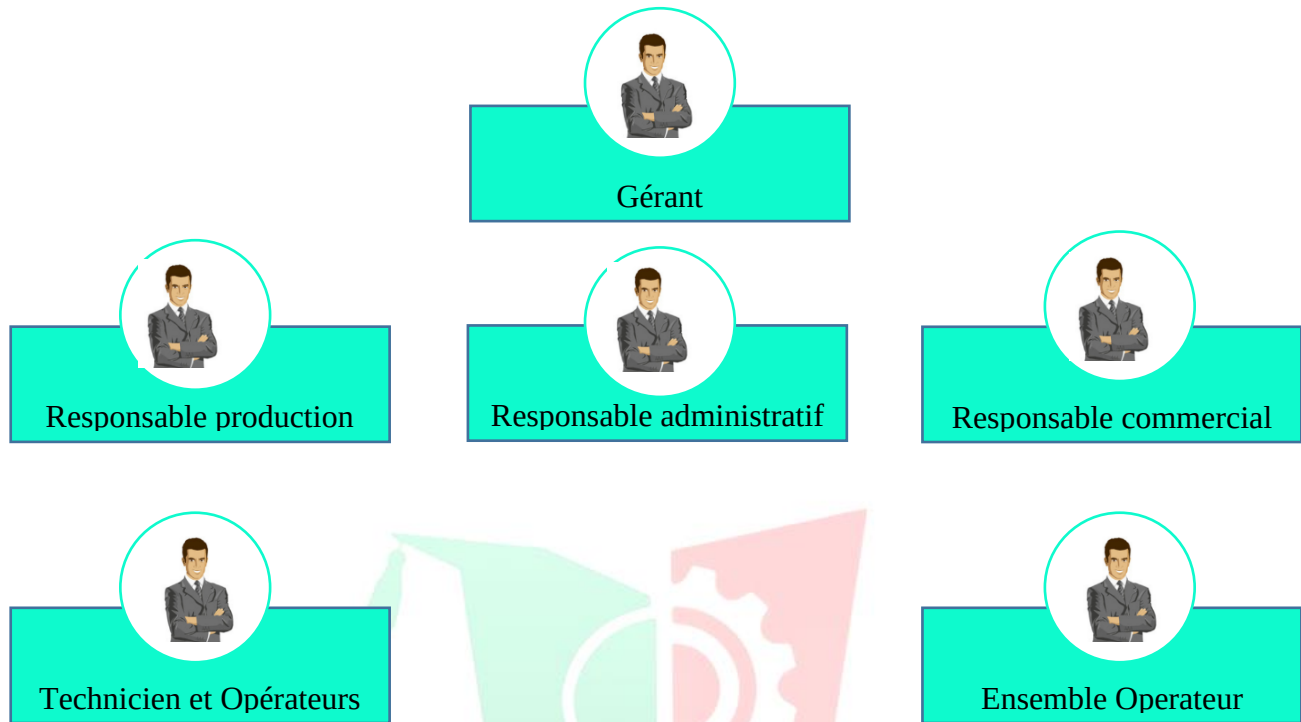
☛ Pôle Technique et Production

***1 Responsable production & qualité :** Supervision du processus de fabrication, contrôle qualité des matières premières et produits finis, optimisation des formulations, planification de la production, gestion du laboratoire et conformité normative .

***1 Technicien de laboratoire :** Réalisation des essais mécaniques (résistance à la compression, flexion, adhérence), analyse granulométrique du sable de dune, contrôle des dosages, rédaction des rapports d'essais et traçabilité des lots.

***3 Opérateurs de production :** Conduite des équipements de broyage et mélange, pesage et dosage des matières premières, ensachage et conditionnement, nettoyage et entretien courant des machines, respect des consignes de sécurité et des procédures qualité.

*** 2 Chauffeur-livreur:** Gestion des entrées et sorties (produits finis).



ORGANIGRAMME FONCTIONNEL

5.2 Choix du Site d'Implantation

Le choix du terrain est stratégique car il impacte directement notre coût de revient final.

Critères de sélection :

1. Proximité des matières premières (Le plus important) :

- × S'installer à l'environ d'un gisement de sable de dune.
- × Être proche des zones industrielles produisant des déchets céramiques (pour réduire le coût de collecte qui est souvent gratuit ou payé par l'usine productrice).

1. Accessibilité :

- × Le site doit être accessible aux camions de fort tonnage (semi-remorques).
- × Proximité des grands axes routiers pour desservir les chantiers urbains.

2. Infrastructures :

- × Disponibilité d'une puissance électrique industrielle (pour les broyeurs).
- × Zone couverte pour le stockage fini.

3. Réglementation :

- × Le site doit être classé en "Zone Industrielle" ou "Zone d'Activité" pour respecter les normes environnementales et de bruits liés au broyage. Donc à partir de cette synthèse des conditions, nous avons trouvé que le meilleur site pour localiser notre société est dans le site de commune d'Oued Al alnda.



Localisation d'usine
Zone industrielle Oued Al âLanda

5.3 Processus de production

Le processus repose sur l'intégration du sable de dune et de la céramique dans une chaîne de production automatisée.

Les étapes de production :

- ✓ **Traitement du sable de dune** : Séchage et tamisage pour éliminer les impuretés (matières organiques ou débris) et stabiliser la finesse.
- ✓ **Broyage de la céramique** : Passage des déchets de céramique dans un concasseur à mâchoires puis un broyeur à billes pour obtenir une granulométrie spécifique .
- ✓ **Dosage et Mélange** : Utilisation d'un mélangeur industriel horizontal où sont intégrés le sable, la céramique, le liant (ciment ou chaux) et des adjuvants (pour la rétention d'eau).
- ✓ **Contrôle Qualité** : Test de chaque lot (consistance, temps de prise, résistance).
- ✓ **Conditionnement** : Mise en sacs de 25 kg.

6. Estimation des couts et des revenus du projet**6.1 Estimation des couts du projet****6.1.1 Estimation de montant total de l'investissement :(cout du projet)**

Équipements et besoins	Coût estimé (DA)
Machine et équipements de production	3, 200,000.00
Aménagement de local	500,000.00
Actifs biologiques (animaux, arbres, etc.....)	0
Matériel roulant	3, 800,000.00
Matériel informatique	350,000.00
Matériel de bureau	400,000.00
Matériel audiovisuel	100,000.00
Matériel de télécommunication	100,000.00
Installation des équipements	50,000.00
Frais généraux liées a la création	350,000.00
Fons de roulement (matières premières)	400,000.00
Montant Total estimé	9.250.000,00

6.1.2 Estimation des achats de matières premières :

Désignation matière première		Année 1	Année 2	Année 3
Ciment	Quantité	270	285	300
	Prix unitaire (DA)	9.600,00	10.000,00	10.800,00
	Montant (DA)	2.592.000,00	2.850.000,00	3.240.000,00
Sable de dune	Quantité	720	755	800
	Prix unitaire (DA)	250,00	270,00	300,00
	Montant (DA)	180.000,00	203.850,00	240.000,00
Déchets de céramiques	Quantité	210	220	250
	Prix unitaire (DA)	1.200,00	1.100,00	1.000,00
	Montant (DA)	252.000,00	242.000,00	250.000,00
Emballage	Quantité	40.000	42.000	44.100
	Prix unitaire (DA)	25,00	25,00	25,00
	Montant (DA)	1.000.000,00	1.050.000,00	1.102.500,00
Montant total des achats		4.024.000,00	4.345.850,00	4.832.500,00

6.1.3 Estimation de Coût de la main-d'œuvre

Poste	Nbre Travailleur			Salaire		
	Année 1	Année 2	Année 3	Année 1	Année 2	Année 3
Gérant	1	1	1	1650.000,00	1770.000,00	1920.000,00
Cadre (Master/Ingénieur)	2	2	2	1240.000,00	1358.000,00	1539.000,00
Maitrise (Techniciens)	2	2	2	1430.000,00	1515.000,00	1680.000,00
Agents d'exécution	5	7	8	2981.000,00	3082.000,00	3216.000,00
Total				7301.600,00	7725.000,00	8355.000,00

6.1.4 Estimation des couts externe du projet :

Charges	Année 1	Année 2	Année 3
Frais Électricité /Gaz / eau	200.000,00	220.000,00	250.000,00
Couts de Maintenance et réparation	50.000,00	100.000,00	200.000,00
Frais de location	300.000,00	350.000,00	400.000,00
Frais d'assurance du matériel et des équipements	25.000,00	30.000,00	8.000,00
Frais de Marketing et publicité	30.000,00	15.000,00	200.000,00
Coûts de formation et d'entraînement	150.000,00	30.000,00	30.000,00
Autres frais généraux (charges externes)			
Divers	100.000,00	60.000,00	50.000,00
Total	855.000,00	805.000,00	973.000,00

6.1.5 Estimation des courts d'amortissements

Équipements	Durée estimée (en années)	Amortissement annuel (DA)
Machines et équipements de production	5	640.000,00
Matériels roulants	5	760.000,00
Matériels de bureaux	8	50.000,00
Matériels informatiques	4	87.500,00
Matériels d'audiovisuel	4	25.000,00
Matériels de télécommunication	4	25.000,00
Montant Total		1.587.500,00

6.3 Estimation des des revenus du projet

6.3.1 Estimation du volume des ventes annuelles

Produits		Année 1	Année 2	Année 3
Mortier sec (25 Kg)	Quantité (tonne)	1200	1260	1350
	Prix unitaire(DA)	12.400,00	13.000,00	13.400,00
	Montant(DA)	14.880.000,00	16.380.000,00	18.090.000,00
Mortier sec (40 Kg)	Quantité (tonne)	-	-	-
	Prix unitaire(DA)	-	-	-
	Montant(DA)	-	-	-
Chiffre d'affaire Total		14.880.000,00	16.380.000,00	18.090.000,00

6.3.2 Résultat annuel estimé

Désignations	Année 1	Année 2	Année 2
Chiffre d'affaires (ventes).....1	14.880.000,00	16.380.000,00	18.090.000,00
Achats consommés2	4.024.000,00	4.345.850,00	4.832.500,00
Charges externes.....3	855.000,00	805.000,00	973.000,00
Valeur ajoutée.....1-2-3=4	10.001.000,00	11.229.150,00	12.284.500,00
Salaires et charges sociales.....5	7.301.600,00	7.725.000,00	8.355.000,00
Excédent brut d'exploitation.....5-4=6	4.896.600,00	4.821.150,00	5.049.500,00
Amortissement et provisions.....7	1.587.500,00	1.587.500,00	1.587.500,00
Résultats d'exploitation.....7-6=8	3.309.100,00	3.233.650,00	3.462.000,00
Imports sur les sociétés /IFU.....9	50.000,00	50.000,00	50.000,00
Résultat net.....9-8=10	1.101.900,00	1.606.650,00	2.332.000,00
Évolution du chiffre d'affaires	Évolué	Évolué	Évolué

7. Conclusion :

Le projet repose sur un avantage concurrentiel fondamental rarement réuni dans le secteur des matériaux de construction : la **quasi-gratuité des matières premières**. Le sable de dune, abondant dans les régions sahariennes algériennes, et les déchets de céramique, récupérés auprès des industries locales à coût marginal, permettent de comprimer le coût de revient unitaire. La projection financière sur trois ans révèle une trajectoire ascendante cohérente et réaliste. Le chiffre d'affaires passe de **15 millions DA en première année à 18 millions DA en troisième année**, porté par la montée en puissance de la production, l'élargissement du réseau de distribution et la consolidation de la notoriété commerciale de l'entreprise

Le positionnement sur l'économie circulaire et la valorisation des ressources locales confère à l'entreprise une image distinctive, susceptible de séduire les donneurs d'ordre publics de plus en plus sensibles aux critères environnementaux, ainsi que les investisseurs engagés dans le financement de projets verts.

En définitive, le projet de fabrication de mortier écologique sec à base de sable de dune et de déchets de céramique présente un profil économique attractif à faible risque initial, combinant des coûts de production compétitifs, une rentabilité rapide, un marché porteur et un positionnement écologique différenciant. Il s'inscrit pleinement dans les orientations nationales de diversification économique, de valorisation des ressources locales et de transition vers une industrie plus durable.

NCCFIUE